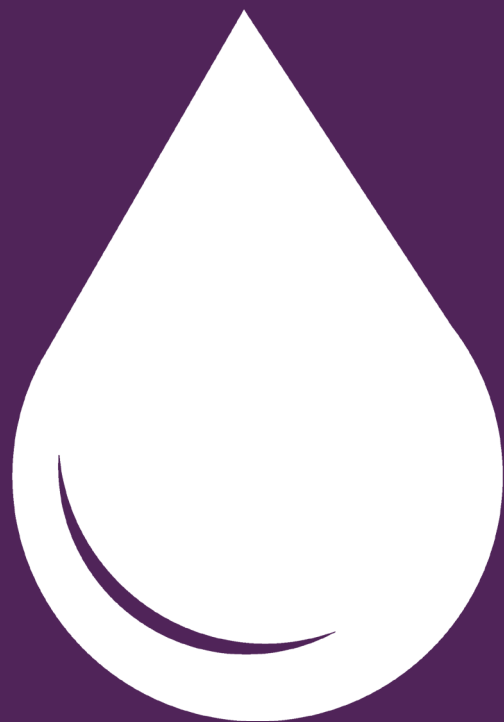


ESTUDIOS UNIVERSITARIOS DE  
POSGRADO EN HIDROLOGÍA

máster en  
hidrología  
y gestión  
de recursos hídricos

**PROYECTOS**  
**2017**



**instituto**  
**imdeaagua traguánet**

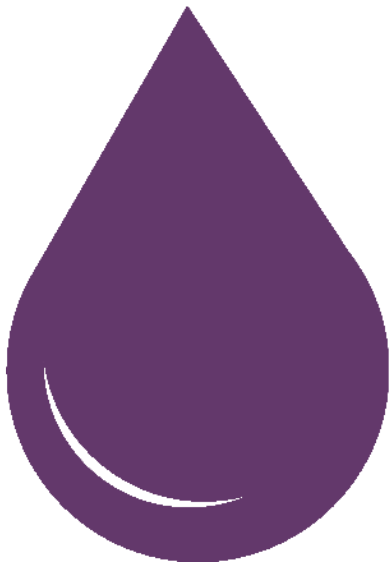
Estudios Universitarios de Posgrado de las  
Universidades de Alcalá y Rey Juan Carlos  
(coordina Universidad de Alcalá)

**Con este libro seguimos la trayectoria de publicar los mejores Trabajos Fin de Máster de cada curso académico.**

**Este volumen recoge los realizados en el curso 2016-2017.**

**Felicitemos a los autores por el interesante trabajo realizado.**

**La Comisión Docente**





# Índice

**BINOMIO AGUA-ENERGÍA: ENERGÍA PARA EL AGUA. CONSUMO DE ENERGÍA EN EL CICLO DEL AGUA EN ESPAÑA.** 3

Autor: Víctor Bernal Chaves

Director: Dr. Eloy García Calvo

Alcalá de Henares , 10 Julio 2017

**GEOESTADÍSTICA APLICADA AL ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN HIDROGEOLÓGICA POR NITRATOS EN LAS LAGUNAS DE VILLAFÁFILA (ZAMORA)** 43

Autor: Azahara Cidón Trigo

Directores: Dr. Idelfonso Armenteros Armenteros

Dr. Antonio Martínez Graña

Alcalá de Henares , 12 Septiembre 2017

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA ACTIVIDAD PORCINA EN LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA: APLICACIÓN EN LA MAS “SIERRA DE LOS CABALLOS – ALGÁMITAS”** 91

Autor: Ilduara M<sup>a</sup> Díaz Justo

Directora: Dr. Alberto Jiménez Madrid

Alcalá de Henares , 12 Septiembre 2017

**VALORACIÓN DEL POTENCIAL ECOLÓGICO DE LAS AGUAS DEL EMBALSE DE ITAIPU BINACIONAL** 141

Autor: Ana Carolina Gossen Siani

Directora: Dra. Irene de Bustamante Gutiérrez

Alcalá de Henares , 4 Julio 2017

**LA UTILIZACIÓN DE CARTOGRAFÍA ANTIGUA PARA LA RECONSTRUCCIÓN DEL PATRIMONIO CULTURAL Y PAISAJES DEL AGUA EN EL RÍO MIJARES (CASTELLÓN)** 183

Autor: Jaime Alberto Jaramillo Giraldo

Directora: Dr. Juan Antonio Pascual Aguilar

Alcalá de Henares , 6 Junio 2017

**IMPACTOS DE LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA PARA LA EXTRACCIÓN DE HIDROCARBUROS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LAS CONSIDERACIONES PARA SU APLICACIÓN EN TERRITORIO COLOMBIANO** 247

Autor: Sonia López López

Directores: Dr. Javier Lillo

Alcalá de Henares , 05 Junio 2017

**UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**  
**Y**  
**UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS**



**MASTER OFICIAL EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**PROYECTO DE FIN DE MASTER**

**“BINOMIO AGUA-ENERGÍA:  
ENERGÍA PARA EL AGUA.  
CONSUMO DE ENERGÍA EN EL CICLO DEL AGUA  
EN ESPAÑA”**

**“THE WATER-ENERGY BINOMIAL: ENERGY FOR WATER.  
ENERGY CONSUMPTION IN THE WATER CYCLE IN SPAIN”**

**AUTOR:  
V́ctor Bernal Chaves**

**DIRECTOR:  
Eloy Garća Calvo (IMDEA)**

Alcalá de Henares, 10 de Julio de 2017

## ÍNDICE

RESUMEN.....	8
1. INTRODUCCIÓN .....	8
2. OBJETIVOS.....	10
3. METODOLOGÍA .....	10
3.1. FASE DE ABASTECIMIENTO.....	12
3.2. FASE DE UTILIZACIÓN.....	16
3.2.1. USO EN AGRICULTURA .....	16
3.2.2. USO EN PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA .....	17
3.2.3. USO URBANO .....	18
3.3. FASE DE SANEAMIENTO ....	20
4. RESULTADOS.....	24
5. DISCUSIÓN.....	27
6. FACTORES DETERMINANTES DEL CICLO URBANO DEL AGUA .....	28
6.1. DESALACIÓN DE AGUA DE MAR .....	29
6.2. AGRICULTURA.....	32
6.3. PÉRDIDAS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN .....	34
6.4. SISTEMAS DE ACS.....	35
6.5. DEPURACIÓN.....	37
6.6. REUTILIZACIÓN.....	38
7. CONCLUSIONES .....	39
8. BIBLIOGRAFÍA.....	41

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de costes de inversión y explotación derivados del ciclo urbano de agua por fases.....	12
<b>Tabla 2.</b> Horquilla de consumo de energía/m <sup>3</sup> en España en el abastecimiento superficial vs subterráneo vs agua del mar .....	13
<b>Tabla 3.</b> Intensidad energética promedio en España en abastecimiento .....	14
<b>Tabla 4.</b> Consumo energético estimado en España en la fase de abastecimiento .....	15
<b>Tabla 5.</b> Consumo energético en la fase de abastecimiento por etapas .....	16
<b>Tabla 6.</b> Consumo energético estimado en España en la fase de Utilización de agua para la agricultura en un año .....	17
<b>Tabla 7.</b> Consumo energético estimado en España en la fase de Utilización de agua para los sistemas de ACS en un año .....	19
<b>Tabla 8.</b> Consumo energético estimado en planta de tratamiento de aguas residuales tipo (0,19 Hm <sup>3</sup> /día) en España.....	22
<b>Tabla 9.</b> Consumo energético estimado de las etapas de mayor consumo en las centrales de tratamiento de aguas residuales en planta de tratamiento de aguas residuales en España.....	23

**Tabla 10.** Resumen de consumo energético anual estimado de cada etapa del Ciclo del agua en España..... 25

## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.** Fases del Ciclo Urbano del Agua ..... 11

**Figura 2.** Esquema de Funcionamiento de aplicación de CDI entre desembocadura de un río y el mar ..... 32

**Figura 3.** Barsha pump, de aqysta ..... 33

**Figura 4.** Tecnología Dron para la Inspección de redes ..... 35

**Figura 5.** Circuito de energía solar como aporte en sistemas de ACS ..... 36

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Producción bruta de electricidad según el tipo de tecnología.....	18
<b>Gráfico 2.</b> Porcentaje de consumo energético en la fase de Abastecimiento .....	25
<b>Gráfico 3.</b> Porcentaje de consumo energético en la fase de Utilización .....	25
<b>Gráfico 4.</b> Porcentaje de consumo energético en la fase de Saneamiento .....	26
<b>Gráfico 5.</b> Porcentaje de consumo energético del ciclo del agua por fases.....	26
<b>Gráfico 6.</b> Porcentaje de consumo energético del ciclo del agua por etapas.....	26
<b>Gráfico 7.</b> Porcentaje de consumo energético por m <sup>3</sup> en potabilización según la fuente .....	30
<b>Gráfico 8.</b> Porcentaje de consumo energético en abastecimiento según destino .....	34
<b>Gráfico 9.</b> Porcentaje de consumo energético de los procesos críticos en una planta tipo de depuración de aguas residuales en España .....	37

## TABLA DE ABREVIATURAS

ACS: Agua Caliente Sanitaria
CALAGUA: Grupo de Investigación “Calidad del agua”.
CDI: Deionización capacitiva.
CEC: California Energy Commission
CTE: Código Técnico de la Edificación.
EA: Environment Agency
EDAM: Estación de Desalación de Agua de Mar
EDAR: Estación de Depuración de Aguas Residuales
EH: Energía Hidroeléctrica
ERAR: Estación de Regeneración de Aguas Residuales
ETAP: Estación de Tratamiento de Agua Potable
FCC Aqualia: Compañía de servicios públicos de agua en Madrid.
GEI: Gases de Efecto Invernadero
GWRC: Global Water Research Coalition
IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
INE: Instituto Nacional de Estadística
IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
MARM: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (disuelto en 2011), actualmente Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
MSF: Destilación por múltiple efecto.

OI: Ósmosis Inversa

PNSD: Plan Nacional de Saneamiento y  
Depuración 1995-2005

PNSD II: Plan Nacional de  
Saneamiento y Depuración 2007-2015

RO: Osmosis inversa

TICs: Tecnologías de las Información y  
de la Comunicación.

UE: Unión Europea

WEF: Water Environment Federation  
(2009)

## **CONVENIO DE SIGNOS**

Se utiliza (.) para separación de miles y  
(,) para separación de decimales.



## RESUMEN

El binomio energía agua puede analizarse desde dos vertientes: desde el consumo de agua necesario para la producción de energía y desde el consumo de energía necesario para la producción o adecuación del agua. La característica clave del binomio es que ambos recursos no son ilimitados, y por tanto, al estudiar la interdependencia de los dos recursos es imprescindible un enfoque de ahorro y eficiencia.

El presente estudio analiza el binomio desde el enfoque de la energía para el agua en un caso concreto: La energía que se consume en el ciclo del agua en España, con el objetivo de identificar las fases menos eficientes del proceso y tratar de encontrar soluciones sostenibles para los cuellos de botella del proceso, esto es detectar los factores que destacan por propiciar la ineficiencia o el posible derroche de energía y analizar las posibles consecuencias de modificarlos de alguna manera.

Los resultados obtenidos muestran que es posible incidir sobre diferentes aspectos tanto tecnológicos como humanos para mejorar la eficiencia de los procesos involucrados en el ciclo del agua con diferente peso en cada caso y/o valorándolo en conjunto; siendo el componente más representativo el hecho fundamental de que es necesario un cambio de mentalidad urgente en la sociedad para conseguir un cambio definitivo que perdure en el tiempo dando mayor valor a los

recursos involucrados en el binomio entiendo el problema de manera conjunta.

## 1. INTRODUCCIÓN

El binomio agua y energía viene definido por la necesidad bilateral de un recurso para el otro: Es tan necesario utilizar agua para cualquier método de generación de energía como lo es el consumo de energía para todas las etapas en el ciclo del agua.

La relación es bilateral, pero obviamente no es tan simple pensar que cuanto más tengamos de un recurso más tendremos del otro, hay otro tipo de consideraciones que deben ser valoradas para llegar a un valor óptimo de producción de agua y de eficiencia energética para aprovechar los recursos que se tienen en cada momento, puesto que la triste realidad es que la disponibilidad de uno y otro siempre se verá limitada por las circunstancias propias de cada región, ya sean de carácter políticas, geográficas, etc, dentro de la ya de por sí poca cantidad de recurso disponible: En el caso del agua se habla de una cantidad  $< 3\%$  de agua dulce, de la cual solo está disponible una cantidad  $< 1\%$  que es la que se encuentra en estado líquido en la naturaleza (el resto en los polos) y el restante  $< 97\%$  se trata de agua salada; y en el caso de la energía, no conseguimos aprovechar ni una diezmilésima parte de la energía que emite directamente el Sol ( $1,35 \text{ kJ/m}^2$  llegan a la estratosfera cada segundo).

La situación actual crea la absoluta necesidad de dotar de un nivel de máxima importancia a la optimización en el uso de estos recursos: El calentamiento global con las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI), las crecientes sequías y el aumento de la temperatura del agua del mar, junto al crecimiento de la población y la creciente urbanización, han despertado una conciencia social a nivel global que parece habernos hecho despertar: La energía no debe ni puede ser derrochada, al igual que el agua. Es necesario optimizar la eficiencia de nuestros procesos.

De esta manera, la visión tradicionalista de vincular el binomio agua y energía a la producción de Energía Hidroeléctrica (EH) se ha visto superada por la de la optimización de recursos, considerando además que la tecnología al servicio de la EH está ya muy desarrollada y en la actualidad centra sus esfuerzos en las mejoras de los rendimientos de las turbinas, de manera que, en comparación, el estudio de la eficiencia energética toma valor y manifiesta su espectacular margen de mejora.

El primer estudio destacable se llevó a cabo por EEUU en California en 2.005 de la mano de California Energy Commission (CEC). En Europa se reaccionó de inmediato con la publicación de la Environment Agency (EA) en Inglaterra en 2.008, así como en el mismo año, la UE celebró su primer “Taller de Energía y Agua” en Londres de la mano del Global Water Research Coalition (GWRC)

en el que se fijó como objetivo la disminución del consumo de energía en un 20% dando comienzo a un programa que persigue un ciclo de agua urbana con una huella energética y de carbono neutral para el año 2.030.

Este fue solo el pistoletazo de salida, al que siguieron otros estudios sobre el tema, y por supuesto tiene su continuación natural en España, un país al que este problema le afecta desde cualquier óptica en gran medida. Tanto por su notable dependencia energética del exterior como porque sólo estableciendo unas concretas reglas y asumiendo compromisos adecuados al momento actual, se establezca un orden para el uso del agua y se ponga fin a las disputas internas, y al mismo tiempo, se amortigüen los impactos generados por el cambio climático. Siendo esta una de las áreas geográficas del planeta a la que las predicciones de los modelos climáticos del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (en lo referente a la disponibilidad de recursos) le auguran un futuro más sombrío (Cabrera, Pardo, Cabrera Jr y Corbacho, 2010), urge afrontar con decisión este asunto.

En la actualidad se estima que España dedica a los procesos de desalación el 1% de la energía total producida, y otro 1% a los procesos de depuración. Además, para el uso doméstico e industrial (juntos) se estima entre un 2% y un 3%, siendo el total del ciclo urbano del agua entre el 4% y el 5% del total.

En el presente trabajo de fin de máster, se va a afrontar el problema desde el punto de vista de la Energía para el Agua, analizando la energía que se consume en la actualidad en España a lo largo del ciclo del agua. Para ello, se realizará un estudio diferenciando cada etapa del mismo, partiendo de valores de consumo extraídos de la bibliografía, en busca de los posibles cuellos de botella que puedan estar dificultando el camino de la sostenibilidad y tratando de buscar soluciones viables que puedan favorecer la eficiencia energética. Para evitar conflictos con la semántica, en el siguiente epígrafe se expresan de manera clara y concisa los objetivos del presente estudio.

## 2. OBJETIVOS

- Identificar las etapas del ciclo del agua **menos eficientes**.
- Identificar y evaluar los diferentes **factores determinantemente influyentes** o **“cuellos de botella”** del proceso en función de la energía requerida.
- Establecer **alternativas** en forma de acciones y/o herramientas que pueden ser desarrolladas para optimizar la eficiencia energética del ciclo y evaluar las posibles implicaciones socioeconómicas y/o técnicas de su implementación, así como sus relaciones con el consumo de agua.

## 3. METODOLOGÍA

Para beneficiarse del agua, el ser humano ha creado una serie de infraestructuras para su captación, canalización, almacenamiento, distribución y tratamiento que alteran el ciclo natural del agua, para adaptar las características del fluido a las necesidades de la sociedad, y después devolverla a la naturaleza para que siga su curso. Toda esta serie de alteraciones es lo que se conoce como Ciclo Urbano del Agua.

Para simplificar el análisis de los datos encontrados en la bibliografía se van a establecer tres fases diferenciadas para dicho ciclo: **Abastecimiento**, **Utilización** y **Saneamiento**.

Así mismo, cada fase se subdivide en distintas etapas, que se presentan en la figura 1 de manera cronológica.

De manera muy resumida, el agua es captada a través de fuentes como ríos, lagos, embalses, presas, pozos o incluso del mar y se realiza un tratamiento para potabilizarla (ETAP si es agua dulce o EDAM en caso de agua salada), se almacena en grandes depósitos y a continuación se dirige a la red de distribución hacia los usuarios finales ya sean de naturaleza doméstica, industrial o agrícola. Una vez usada el agua pasa a la red de saneamiento o alcantarillado hacia las plantas de depuración (EDAR) para su tratamiento, donde se eliminan los contaminantes acumulados para, o bien pasar



**Figura 1.** Fases del Ciclo Urbano del Agua.  
Fuente: Aqualia

a la etapa de reutilización, o bien para su retorno al medio natural. Dichas etapas pueden clasificarse dentro de cada fase tal y como se describe en la tabla 1.

Aproximadamente un 15% del agua extraída del medio natural es usada para el consumo doméstico (el dato se demostrará más adelante), el resto se reparte entre consumo agrícola e industrial, pero la totalidad requiere una inversión inicial enorme tanto económica como de recursos energéticos para la consecución de infraestructuras, así como unos costes no menos despreciables dedicados a la explotación de las mismas: Sistemas de bombeo, redes de tuberías, depósitos, ETAP's, EDAM's, EDAR's, alcantarillado, etc, además de dotar a cada sistema de apropiados sistemas de control con un constante y continuo mantenimiento e inversión de mejoras dedicado al óptimo

funcionamiento (control de fugas, reparaciones, análisis de calidad del agua, etc) y por último y no menos importante, el coste ambiental asociado al proceso supone un considerable impacto ecológico.

Infraestructuras, energía, ecología, materias primas, recursos humanos... el ciclo urbano del agua lleva asociados grandes costes dada su enorme complejidad y cantidad de actores implicados. Para el caso que nos ocupa, no se va a realizar el análisis de los costes, sino la cuantificación del consumo de energía eléctrica de cada fase.

**Tabla 1.** Clasificación de costes de inversión y explotación derivados del ciclo urbano de agua por fases

<i>FASE</i>	<i>ETAPA</i>	<i>OPERACIONES DE INVERSIÓN</i>	<i>OPERACIONES DE EXPLOTACIÓN</i>
<i>ABASTECIMIENTO</i>	<i>Captación</i>	<i>Presas, pozos, tomas marinas, conducción</i>	<i>Bombeos, turbinas</i>
	<i>Potabilización</i>	<i>ETAP / EDAM</i>	<i>Bombeos, reactivos</i>
	<i>Almacenamiento</i>	<i>Depósitos</i>	<i>Mantenimiento</i>
	<i>Red de distribución</i>	<i>Redes de conducciones</i>	<i>Bombeos</i>
<i>UTILIZACIÓN</i>	<i>Uso agrícola</i>	<i>Equipos usuarios (ACS)</i>	<i>Calentamientos</i>
	<i>Uso en energía</i>		
	<i>Uso urbano</i>		
<i>SANEAMIENTO</i>	<i>Alcantarillado</i>	<i>Estaciones de bombeo</i>	<i>Bombeos</i>
	<i>Depuración</i>	<i>EDAR</i>	<i>Bombeos, reactivos</i>
	<i>Reutilización</i>	<i>Tratamiento terciario, ERAR</i>	<i>Bombeos, reactivos</i>
	<i>Retorno</i>	<i>Conducciones</i>	<i>Bombeos</i>

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.1. Fase de abastecimiento

Como se ha descrito la fase de abastecimiento abarca desde la captación de agua del medio natural hasta que el agua potable llega a las acometidas de los edificios/industrias. En el caso de España, las etapas de captación, potabilización y almacenaje están reguladas y gestionadas por cada Demarcación Hidrográfica (cuencas), mientras que la etapa correspondiente a la red de distribución del agua potable está regulada por los ayuntamientos y entidades locales y gestionada por empresas concesionarias o contratadas, o bien por los propios

ayuntamientos de manera directa (cada vez menos habitual).

La calidad del agua “apta para el consumo” es responsabilidad del Ministerio de Sanidad (SINAC) y de las comunidades autónomas. El nivel de exigencia de dicha calidad requiere un consumo de energía cada vez mayor. Los clásicos métodos de filtración y adición química se sustituyen por otros métodos más innovadores como la utilización de membranas que dan mejores resultados pero también implican utilizar más energía.

**Tabla 2.** Horquilla de consumo de energía/m<sup>3</sup> en España en el abastecimiento superficial vs subterráneo vs agua del mar

<i>Procedencia agua potable</i>	<i>Horquilla de consumo (kWh/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Horquilla de consumo (%)</i>
<i>Superficial (corta distancia &lt;10 km)</i>	0,0002 – 0,37	0,0 – 4,0
<i>Superficial (larga distancia &gt;10 km)</i>	0,15 – 1,74	2,5 – 18,0
<i>Subterránea (acuíferos locales)</i>	0,37 – 0,75	6,0 – 8,0
<i>Subterránea (acuíferos lejanos)</i>	0,60 – 1,32	10,00 – 14,0
<i>Desalación (incluso distribución)</i>	4,94 – 5,41	56,0 – 81,5

Fuente: Sala, L. 2.007

Existen diferentes maneras de extraer el agua del recurso natural en la captación en función de su procedencia: Agua dulce superficial, agua dulce subterránea o agua de mar, y todas ellas tienen un denominador común: Es necesario el empleo de energía a través de estaciones de bombeo para la extracción, transporte a través de las tuberías, y para dotar al agua de la presión necesaria para ser desalada en las EDAM, así como para ser tratadas en ETAP. En la tabla 2 se muestra la horquilla de consumo en España en función de su origen, en la que se puede comprobar que el mayor gasto de energía por m<sup>3</sup> se produce notablemente en los procesos de procedencia de agua del mar, donde se requiere entre el 56,0% y el 81,5% del total de energía empleado en el abastecimiento.

Pero no se puede afirmar que es en desalación donde se produce el mayor coste energético, puesto que el número de instalaciones EDAM es muy pequeño (aunque cada vez mayor) frente a las estaciones ETAP. Además, cuantificando las unidades no solo de tratamiento, sino también la longitud y frecuencia de los tramos de conducciones para captación y suministro, así como el volumen total de agua bombeado y teniendo en cuenta la topografía del terreno se pueden lograr aproximaciones medias de consumo que no se obtienen usando horquillas de consumo (que sólo darán valores máximos y mínimos). En este sentido, se presenta la tabla 3 en la que se muestra la intensidad energética media, que tienen en cuenta todo lo explicado anteriormente, cuyos resultados muestran la realidad.

**Tabla 3. Intensidad energética promedio en España en abastecimiento**

<i>Etapa</i>	<i>Rango de intensidad energética (kWh/m<sup>3</sup>)</i>			
	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Med</i>	<i>%</i>
<i>Captación y transporte</i>	0,00	2,10	0,24	23,5
<i>Potabilización (ETAP + EDAM)</i>	0,11	5,41	0,57	56,0
<i>Red de distribución</i>	0,12	0,22	0,21	20,5

*Fuente: Sala L., 2.007*

El coste energético que requiere el tratamiento de agua depende en primer lugar de las características del agua de partida, y en menor importancia de la calidad que se requiere a la salida de la planta de tratamiento, antes de distribuirla. El tratamiento del agua requerido puede tener un coste energético relativamente bajo si se trata de un agua captada en una zona con poca contaminación ambiental, pero en otros casos como por ejemplo la desalación de agua de mar, el coste energético será mucho más elevado. Como se puede comprobar el 56% de la energía por unidad de volumen se gasta en el proceso de potabilización de agua, correspondiendo el consumo máximo al consumo producido por las plantas desaladoras (tabla 2). En este punto se define como primer cuello de botella del ciclo este proceso.

Las condiciones de calidad a la salida de la planta van a depender del tipo de uso final, ya que el agua para la agricultura no debe tener la misma calidad que el agua destinada al consumo humano en zonas urbanas. De esta forma estos datos son válidos para los

sectores domésticos e industrial, pero para el sector agrario es diferente. Se estima un consumo medio tanto para la captación como para la distribución de 0,21 kWh/m<sup>3</sup> y 0,12 kWh/m<sup>3</sup>, respectivamente (Corominas, 2.009). En el caso de la generación de energía eléctrica, se estima 0,20 kWh/m<sup>3</sup> (Hardy y Garrido, 2.010) para la captación. A partir de valores de consumo de agua, los cuales se van a extraer del INE, 2.013 se completa la tabla 4.

El mayor consumo corresponde a la dedicada al abastecimiento para la actividad agrícola, en torno al 45% de la energía consumida en todo el abastecimiento, que además maneja casi un 50% del volumen de agua utilizado. Se trata del segundo cuello de botella que encontramos en el proceso.

**Tabla 4. Consumo energético estimado en España en la fase de abastecimiento**

<b>Tipo</b>	<b>Agua (Hm<sup>3</sup>)</b>	<b>Agua (%)</b>	<b>Captac. (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Potabiliz. (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Distribuc (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Energía (GWh)</b>	<b>Energía (%)</b>
<i>Urbano potable</i>	2.913	9,8	0,24	0,57	0,21	2.971	27,1
<i>Urb. no potable</i>	298	1,0	0,24	-	0,21	134	1,2
<i>Pérdidas</i>	1.113	3,7	0,24	0,57	-	902	8,2
<i>Agrícola</i>	14.535	48,9	0,21	-	0,12	4.797	43,7
<i>Energía</i>	10.843	36,5	0,20	-	-	2.169	19,8
<i>Total</i>	29.702					10.974	

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE, 2.013*

Además, se comprueba el grave problema que suponen las “Pérdidas” de la red de distribución, que tal y como se comprueba suponen un nada despreciable 8,2% de la energía consumida en la fase de abastecimiento. De los 1.113 Hm<sup>3</sup>, 678 Hm<sup>3</sup> (61%) corresponden a pérdidas reales, que son fugas, roturas y averías en la red de distribución, que suponen el mismo porcentaje de las pérdidas de energía que conlleva casi el 5% del total (540 GWh/año) que literalmente van a ningún sitio. Los 435 Hm<sup>3</sup> restantes (39%), o el 3,2% del total (360 GWh/año), corresponden a las no menos importantes circunstancias derivadas de las pérdidas aparentes, que se traducen en errores de medidas, fraudes y consumos estimados. Aquí se establece el tercer cuello de botella del estudio: Pérdidas en la red.

Con los datos de la tabla 4, multiplicado el consumo de agua / unidad de volumen por el

volumen de agua total en cada tipo contabilizado de consumo es posible estimar el consumo total en las diferentes etapas de la fase de abastecimiento.

Se reflejan en la tabla 5.

La etapa de captación se lleva el mayor porcentaje de consumo, pero no se considera desproporcionado puesto que es necesario captar todo el volumen de agua que se va a utilizar tanto para la actividad agrícola como para la producción de energía eléctrica. Este dato debe valorarse en conjunto con las necesidades y consecuencias energéticas resultantes de las actividades mencionadas, por lo que se considera un valor difícilmente optimizable por su enorme complejidad.



**Tabla 5. Consumo energético en la fase de abastecimiento por etapas**

<b>Tipo</b>	<b>Captación (GWh)</b>	<b>Potabilización (GWh)</b>	<b>Distribución (GWh)</b>
<i>Urbano</i>	1.039	2.295	675
<i>Agrícola</i>	3.052	-	1.744
<i>Energía</i>	2.169	-	-
<i>Total</i>	6.260 (57%)	2.295 (21%)	2.419 (22%)

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE, 2013*

Por su parte el agua destinada al consumo urbano se sitúa en torno a un 10% mientras que consume en torno a un 30% de la energía total (tabla 4), correspondiendo en su mayoría al consumo demandado por la etapa de potabilización, y este valor es tan alto por el aporte de la operación de desalación. Esta apreciación es una constatación más del primer cuello de botella identificado.

### **3.2. Fase de utilización**

Una vez el agua termina su recorrido a través de las redes de distribución, se entra en la fase de Utilización, que comienza en las acometidas de las casas, industrias, recintos comerciales, tomas para la agricultura, etc. donde se dispone a ser utilizada para cumplir con su función de cubrir la demanda de alguna necesidad. Una vez cubierta, el agua pasa a la red de saneamiento.

Como se ha visto en la tabla 4, España utiliza un volumen de agua en torno a 28.589 Hm<sup>3</sup>

(el total restando las pérdidas en la distribución), de los que un 49% se dedica a la agricultura, un 36% a la producción de energía eléctrica y el 15% al consumo urbano. A continuación se va a estimar el consumo en cada uno de los tres casos de utilización de agua. De mayor a menor en cantidad de consumo.

#### **3.2.1. Uso en Agricultura**

Supone el 49% del uso del agua del país. Gracias a la Encuesta sobre el uso del agua del sector agrario del año 2.013 disponemos de datos para disgregar el valor total de agua destinada al sector en volúmenes de agua por técnicas de riego (tabla 6).

Como base de cálculo se ha estimado el caso más desfavorable, que es el escenario en que el volumen total de agua utiliza como fuente de energía la electricidad.

**Tabla 6.** Consumo energético estimado en España en la fase de Utilización de agua para la agricultura en un año

<i>Sector Agrario</i>	<i>Agua (Hm<sup>3</sup>)</i>	<i>Energía (kWh/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Energía (GWh)</i>
<i>Aspersión</i>	3.572	0,24	900
<i>Goteo</i>	5.383	0,18	970
<i>Gravedad</i>	5.400	0,00	0
<i>Total</i>	14.535	0,42	1.870

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE, 2.013*

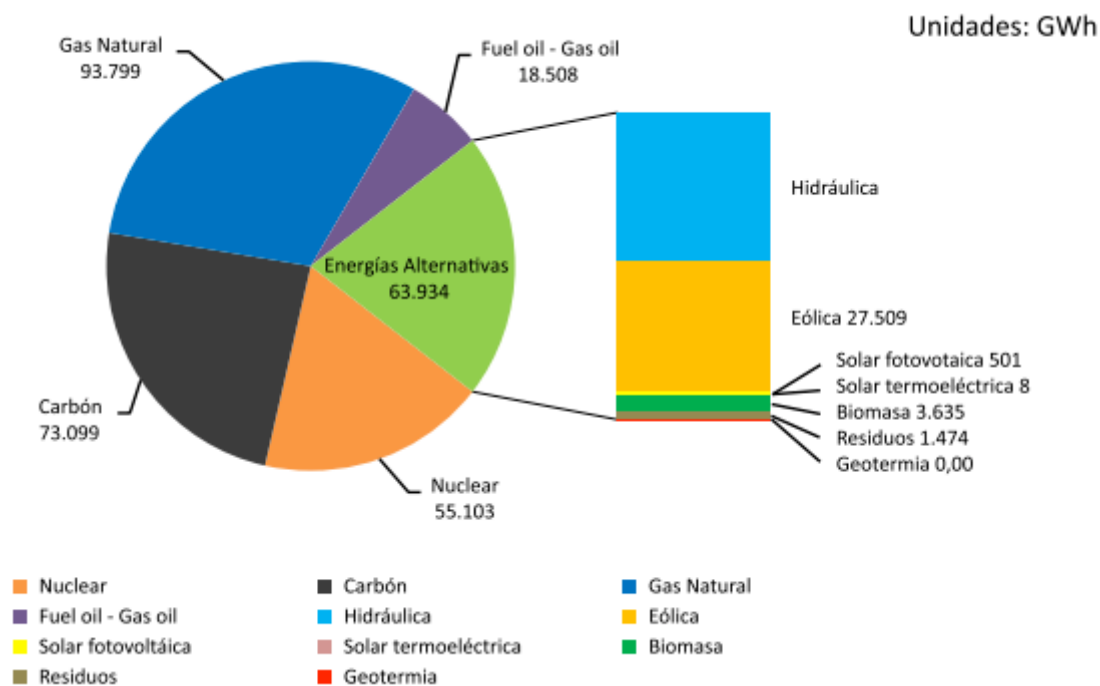
Además, se ha estimado que la intensidad energética para riego por aspersión y goteo será 0,24 kWh/m<sup>3</sup> y 0,18 kWh/m<sup>3</sup> respectivamente, lo cual equivale a una elevación de 88 y 66 m para una bomba con rendimiento 100%. Si se aplicase un rendimiento de las bombas de un 60%, esos valores se reducirían a 50 y 40 m respectivamente, que es la altura usual a la que se proyectan los hidrantes o bocas de riego en los Proyectos de distribución de agua. (Corominas, 2.009).

### **3.2.2. Uso en Producción de Energía Eléctrica**

Supone el 36% del uso del agua del país. El sector eléctrico está siendo objeto de atención creciente en los estudios de estimación de consumo de agua. La cuestión es saber si la disponibilidad de agua para los sectores doméstico, comercial, agrario y de la industria será compatible con una demanda creciente en energía, y por tanto esta cuestión debe tratarse dentro del binomio agua energía

como agua para la energía, por lo que la consideración de este punto queda fuera del presente estudio.

Aun así, y a modo de introducción para un posible estudio futuro que continúe el presente estudio, se considera importante resaltar que el sector de la energía está en constante evolución desde el comienzo del uso comercial de las energías alternativas o renovables, y en este sentido, es necesario preguntarse si el consumo de agua por kilovatio generado puede reducirse a medida que el mix energético evoluciona para reducir sus emisiones de GEI. El Gráfico 1 muestra la producción bruta de electricidad según el tipo de tecnología para el año 2.007 que alcanzó un total anual de 291.054 GWh., teniendo en cuenta que se ha determinado que el coste energético del abastecimiento del agua necesario para la producción de energía eléctrica ha sido de 2.169 GWh., el beneficio neto es incomparable.



**Gráfico 1.** Producción bruta de electricidad según el tipo de tecnología  
Fuente: EuroStat

Salta a la vista que son las centrales de gas las que tienen la producción bruta más elevada de producción de energía con un 30% seguidas por las de carbón 24% y nuclear 18,0%. Las energías renovables representan en su conjunto un 22%, siendo las tecnologías para la EH las que mejores resultados obtienen, resaltando la importancia de este recurso en el país y demostrando que el margen de mejora que pueden tener las relaciones entre agua y energía aplicadas a esta tecnología se está agotando.

Sería necesario hacer un estudio detallado para cuantificar el consumo energético real derivado de la producción de electricidad, teniendo en cuenta que obviamente en el proceso se genera mucha más energía de la que se consume, por lo que esta parte del

consumo se propone como una futura implementación del presente estudio, ya que lo interesante es considerar las opciones de optimizar la eficiencia energética de cada proceso. En esta ocasión no se va a considerar cuantificable.

### 3.2.3. Uso Urbano

Supone el 15% del uso del agua del país. El consumo eléctrico del agua en el ambiente doméstico está ligado al consumo derivado de los sistemas de ACS, donde el agua tiene que ser calentada desde una temperatura ambiente hasta la temperatura de servicio. La temperatura de acumulación de los sistemas de ACS es en general de 60°C (UNE 100030:2017, CTE capítulo HS4/2.1.3./4), y

**Tabla 7.** Consumo energético estimado en España en la fase de Utilización de agua para los sistemas de ACS en un año

<i>Destino</i>	<i>Agua total (Hm<sup>3</sup>)</i>	<i>Agua caliente (Hm<sup>3</sup>)</i>	<i>Agua fría (Hm<sup>3</sup>)</i>	<i>Energía (GWh)</i>
<i>Doméstico</i>	2.218	887	1.331	45.950
<i>Sector económico</i>	695	278	417	14.400
<i>Total</i>	2.913	1.165	1.748	60.350

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE, 2.013*

la temperatura media de España, tomando datos entre 1.971 y 2.000 es 14,6°C. Es posible calcular de manera teórica la energía necesaria para calentar una unidad de volumen de agua (m<sup>3</sup>) a partir del primer principio de la termodinámica:

$$E \text{ (kWh)} = m \text{ (kg)} \times C_p \text{ (kW/kg } ^\circ\text{C)} \times \Delta T \text{ (} ^\circ\text{C)}$$

Siendo:

*m (kg): Masa de agua contenida en 1 m<sup>3</sup> de líquido (densidad).*

*La densidad de agua es 983,13 kg/m<sup>3</sup>*

*(a 60°C y 1 atm)*

*C<sub>p</sub>: Calor específico del agua = 4,187 kJ/kg °C (a 60°C y 1 atm) x 1/3600 h/sC<sub>p</sub> = 1,16x10<sup>-3</sup> kWh/kg °C*

*ΔT: Incremento de temperatura =*

$$60 - 14,6 = 45,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sustituyendo, se obtiene:

$$E = 983,13 \times 1,16 \times 10^{-3} \times 45,4 = 51,8 \text{ kWh}$$

Sin tener en cuenta los rendimientos de los equipos y las pérdidas de calor producidas en los mismo, la energía necesaria para calentar 1 m<sup>3</sup> de agua es 51,8 kWh. A simple vista es fácil afirmar que el consumo derivado de los sistemas de ACS supone el coste energético más determinante en el ciclo integral de vida del agua urbana.

De los 2.913 Hm<sup>3</sup>, se destinan a los hogares 2.218 Hm<sup>3</sup> (76%) y a los sectores comerciales los restantes 695 Hm<sup>3</sup> (24%). Para el estudio se va a considerar que la temperatura de servicio va a ser 60°C para todos los usuarios y que, aproximadamente, de toda la cantidad de agua utilizada en los hogares, el 40% es utilizada para agua caliente (a través de los sistemas de ACS) y el 60% para agua fría. De esta manera se estima el consumo energético destinado al uso de agua doméstica. Los resultados se presentan en la tabla 7.

### 3.3. Fase de saneamiento

El saneamiento consiste en la recogida de las aguas tras su consumo (momento en el que adoptan la condición de residuales) a través de las redes de saneamiento (alcantarillado) hasta las plantas de tratamiento de aguas residuales, donde se alteran las características bioquímicas de tal manera que, tras completar el proceso, sea posible o bien reutilizarlas o bien ser devueltas al medio ambiente en condiciones medioambientales adecuadas.

En los últimos años, en España se han hecho esfuerzos continuos para proteger y controlar los recursos hídricos y los vertidos de residuos con el fin de promover la conservación, la protección y la mejora de la calidad del recurso natural que constituyen las aguas (Tratado de la Unión Europea, Art. 130-R). Para cumplir con la Directiva 91/271/CEE sobre tratamiento de aguas residuales urbanas, se llevó a cabo el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración 1.995-2.005 (PNSD), cuyo objetivo era adecuar los sistemas de depuración de todos los núcleos urbanos de más de 2.000 habitantes equivalentes. El PNSD permitió situar un 77% de los núcleos en conformidad con la Directiva (91% contabilizando las infraestructuras en construcción en 2.010). Con el fin de seguir en el desarrollo de las infraestructuras de saneamiento y depuración, se implementó el PNSD 2.007-2.015, en el que aportan medidas para la consecución de los objetivos no alcanzados en el plan

anterior, así como soluciones para nuevas necesidades planteadas en la Directiva Marco del Agua y por el Programa AGUA (MARM 2.007). Actualmente, el 95% de la población está conectada a la red de depuración en España, y se estima que el 88% del agua total que llega a las redes de saneamiento es tratada en las estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR).

En estas EDAR, se llevan a cabo diferentes procesos que permiten alcanzar los estándares de calidad exigidos por la legislación vigente orientados a mejorar parámetros microbiológicos, físico-químicos y específicos para usos concretos. El tratamiento de aguas se divide en un tratamiento primario (elimina materiales sólidos y flotantes) y un tratamiento secundario (elimina materia orgánica, nutrientes y sólidos inorgánicos disueltos en forma coloidal y/o en suspensión). Adicionalmente, en algunas ocasiones es posible encontrar un tratamiento terciario, que tiene por objetivo eliminar la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos anteriores, devolviendo el agua con una calidad determinada para, o bien ser reutilizada (no apta para el consumo humano), o bien ser vertida al entorno con los parámetros adecuados. Otras veces, las EDAR se conectan con otras plantas en las que se regeneran las aguas residuales (ERAR) mediante un tratamiento terciario destinadas al mismo cometido que los que realizan en las EDAR.

En España, para el año 2.013, el volumen de aguas residuales tratadas en estas plantas fue 13,7 Hm<sup>3</sup>/día (INE), lo que supone 5.000 Hm<sup>3</sup> al año. De este volumen, solo a un 10% es destinado a la reutilización (cuello de botella), tratándose de 1,4 Hm<sup>3</sup>/día (INE), lo que supone 530 Hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales el 83% está dedicado a la agricultura. Hay otro porcentaje significativo de esta agua que va destinado a riego de jardines. Este 10% está mejorando poco a poco, siendo uno de los objetivos fundamentales del PNSD 2.007-2.015, en el que se incluye la necesidad de incorporar aguas reutilizadas en la medida de lo posible para determinados fines. Para impulsar el desarrollo de este uso, se proyectó el RD 1620/2007, que regula los niveles mínimos de calidad según la función a la que se destinan y establece los fines para los que está permitido utilizar este tipo de agua.

Como ya se indicó anteriormente, el 88% de las aguas recogidas por alcantarillado se tratan en centrales de tratamiento de aguas residuales, por lo que se estima que se recogen 5.680 Hm<sup>3</sup>. El coste energético asociado a esta etapa es muy bajo, ya que en muchos casos se realiza por gravedad.

Para este caso de estudio se va a utilizar el valor de 0,05 kWh/m<sup>3</sup> (Hardy y Garrido, 2.010), por tanto:

$$5.680 \text{ Hm}^3 \times 0,05 \text{ kWh/m}^3 = 285 \text{ GWh}$$

**en red de saneamiento**

El volumen total tratado supone un consumo de energía entre 0,49 y 0,72kWh/m<sup>3</sup> (CEC 2.005), las diferencias son significativas y se deben a la cantidad y calidad de materia orgánica a degradar, de la cantidad de nutrientes a eliminar y del tamaño de la planta (en función de los habitantes equivalentes a los que esté dedicado). Para el caso de España el valor promedio adoptado para el conjunto de todas las operaciones de depuración es 0,66 kWh/m<sup>3</sup>, de manera que el consumo eléctrico para el total de las operaciones de depuración es:

$$5.680 \text{ Hm}^3 \times 0,66 \text{ kWh/m}^3 = 3.749 \text{ GWh}$$

De todo este consumo, se estima que el consumo destinado a la reutilización es 0,59 kWh/m<sup>3</sup> (Hardy y Garrido, 2.010), por lo que a este valor hay que restarle la porción de energía destinada a esta fase para poder analizarla por separado. De esta forma:

$$531 \text{ Hm}^3 \times 0,59 \text{ kWh/m}^3 = 314 \text{ GWh}$$

**en reutilización**

lo que la energía necesaria para la depuración es:

$$3.749 \text{ GWh} - 285 \text{ GWh} - 314 \text{ GWh} =$$

**3.150 GWh en depuración**

**Tabla 8.** Consumo energético estimado en planta de tratamiento de aguas residuales tipo (0,19 Hm<sup>3</sup>/día) en España.

Tratamiento	Etapas	Consumo kWh/día	Consumo tratamiento %	Consumo total %
Primario	Bombeo aguas residuales	6.030	31,8	6,9
	Cribado	6	0,0	0,0
	Desarenación aireada	600	3,2	0,7
	Clarificación primaria	776	4,1	0,9
	Lecho bacteriano (con recirculación)	11.551	60,9	13,2
		18.963	100,0	21,7
Secundario	Aeración (aire difuso)	26.600	60,3	30,5
	Bombeo de retorno de lodos	1.627	3,7	1,9
	Clarificación secundaria	776	1,8	0,9
	Espesamiento por gravedad	75	0,2	0,1
	Flotación de aire disuelto	7.008	15,9	8,0
	Biodiscos + Digestión anaerobia	6.500	14,7	7,4
	Prensa de lodos	1.385	3,1	1,6
	Cloración	133	0,0	0,2
		44.104	100,0	50,5
Terciario	Aditivos químicos	2.187	9,0	2,5
	Bombeo material orgánico filtrante	3.440	14,2	3,9
	Filtración por OI	1.679	6,9	1,9
	Nitrificación biológica	16.936	69,9	19,4
		24.242	100,0	27,8

Fuente: IDAE + WEF

De todo este consumo en depuración, se puede hacer una aproximación de la proporción que se corresponde con cada etapa del tratamiento extrapolando el consumo de una planta tipo de 0,19 Hm<sup>3</sup>/día. tal y como puede verse en la tabla 8.

Con estos porcentajes, es posible estimar las necesidades energéticas de las plantas de

tratamiento de aguas residuales en España (tabla 9) por etapas, estableciendo una relación entre las etapas que consumen mayor cantidad de energía, para considerarlas por separado y comprobar si son determinantes en el proceso global.

**Tabla 9.** Consumo energético estimado de las etapas de mayor consumo en las centrales de tratamiento de aguas residuales en España.

Tratamiento	Etapa	Consumo	Consumo
		total %	total GWh
Primario	Bombeo aguas residuales	6,9	217,6
	Cribado	0,0	0,2
	Desarenación aireada	0,7	21,6
	Clarificación primaria	0,9	28,0
	Lecho bacteriano (con recirculación)	13,2	416,7
		21,7	684,2
Secundario	Aeración (aire difuso)	30,5	959,7
	Bombeo de retorno de lodos	1,9	58,7
	Clarificación secundaria	0,9	28,0
	Espesamiento por gravedad	0,1	2,7
	Flotación de aire disuelto	8,0	252,8
	Biodiscos + Digestión anaerobia	7,4	234,5
	Prensa de lodos	1,6	50,0
	Cloración	0,2	4,8
		50,5	1591,2
Terciario	Aditivos químicos	2,5	78,9
	Bombeo material orgánico filtrante	3,9	124,1
	Filtración	1,9	60,6
	Nitrificación biológica	19,4	611,0
		27,8	874,6
TOTAL			3.150

*Fuente: Elaboración propia*

Se concluye que los procesos de depuración con mayor gasto energético son:

1. **Aireación (30,5% - 960 GWh) (EDAR)**
2. **Nitrificación biológica(19,4%-610 GWh) (EDAR / ERAR)**
3. **Lecho bacteriano (13,2% - 415 GWh) (EDAR)**

Como se puede comprobar, estos procesos suponen una demanda energética superior a las etapas de la red de saneamiento y a las de reutilización. Por lo que es posible determinar que se trata de procesos que sometidos a una optimización contribuirían notablemente en la mejora de la eficiencia energética del proceso.



Esto no quiere decir que el resto de los procesos que intervienen en las plantas de depuración de aguas residuales deban condenarse a la obsolescencia, todo lo contrario, la mejor aportación siempre sería la que mejorase la operación en su conjunto, pero en vista de los resultados de este análisis, sería conveniente priorizar el estudio de las mejoras de los procesos que más energía demandan.

Por último, se produce la etapa de retorno. Las aguas que no se reutilizan son vertidas al colector urbano, donde, con las condiciones aptas para su vertido resultantes de las centrales, son retornadas a su medio natural. El consumo energético de esta última etapa del ciclo integral del agua es mínimo puesto que en la mayoría de los casos y siempre que sea posible se llevan a cabo por gravedad. El rango de consumo oscila entre 0,00 y 0,10 kWh/m<sup>3</sup> (CEC 2005) y no se conocen datos de un consumo promedio por su bajo valor, por lo que se va a considerar despreciable, o al menos, no determinante para el consumo total de energía del ciclo.

#### 4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el apartado de metodología en cuanto al consumo de energía del ciclo integral del agua por etapas se presentan en la tabla 10.

A modo de resumen, se muestran a continuación los resultados obtenidos representados gráficamente en diagramas de 360° para visualizar la proporcionalidad de cada etapa en los diferentes procesos analizados:

Fase de abastecimiento (Gráfico 2)

Fase de utilización (Gráfico 3)

Fase de saneamiento (Gráfico 4)

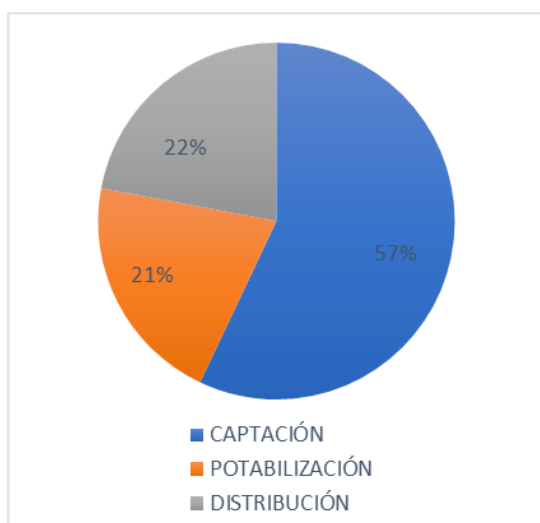
Ciclo total del agua por fases (Gráfico 5)

Ciclo total del agua por etapas (Gráfico 6)

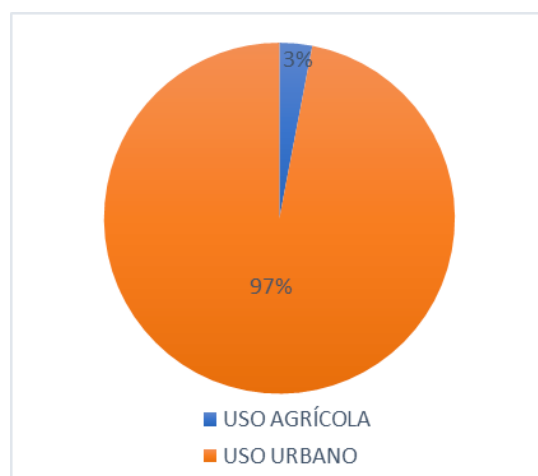
**Tabla 10.** Resumen de consumo energético anual estimado de cada etapa del ciclo de agua en España.

CICLO DEL AGUA		GWh	% (fase)	% (total)	
ABASTECIMIENTO	CAPTACIÓN	Urbano	1.039	9,5	1,4
		Agrícola	3.052	27,7	4,0
		Energía	2.169	19,8	2,8
		TOTAL	6.260	57,0	8,2
	POTABILIZACIÓN	TOTAL	2.295	20,9	3,0
	DISTRIBUCIÓN	Urbano	675	6,2	0,9
		Agrícola	1.744	15,8	2,3
		TOTAL	2.419	22,0	3,1
	<b>TOTAL ABASTECIMIENTO</b>		<b>10.974</b>		<b>14,3</b>
	UTILIZACIÓN	USO AGRÍCOLA	TOTAL	1.870	3,0
USO URBANO		Doméstico	49.950	73,9	59,7
		Económico	14.400	23,1	18,7
		TOTAL	60.350	97,0	78,4
<b>TOTAL UTILIZACIÓN</b>		<b>62.220</b>		<b>80,8</b>	
SANEAMIENTO	ALCANTARILLADO	TOTAL	285	7,6	0,4
	DEPURACIÓN	TOTAL	3.150	84,0	4,1
	REUTILIZACIÓN	TOTAL	314	8,4	0,4
<b>TOTAL SANEAMIENTO</b>		<b>3.749</b>		<b>4,9</b>	
<b>TOTAL CICLO DEL AGUA</b>		<b>76.943</b>			

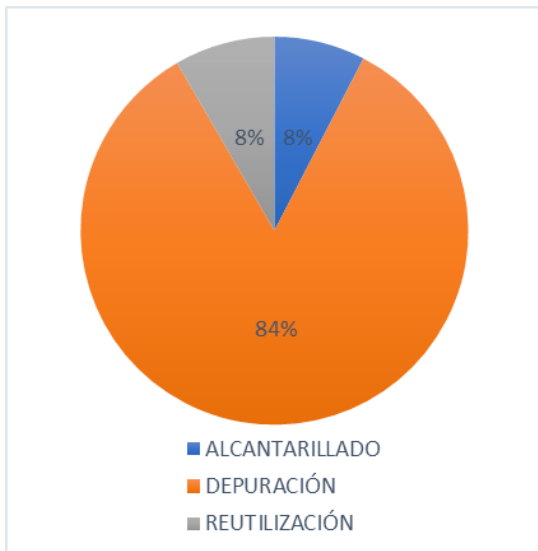
Fuente: Elaboración propia



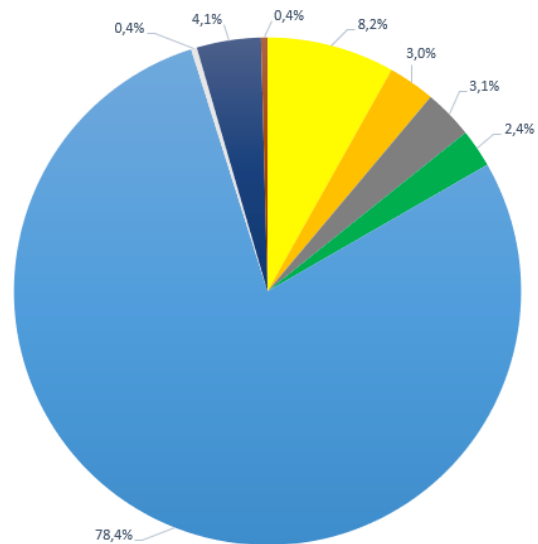
**Gráfico 2.** Porcentaje de consumo energético en la fase de Abastecimiento



**Gráfico 3.** Porcentaje de consumo energético en la fase de Utilización

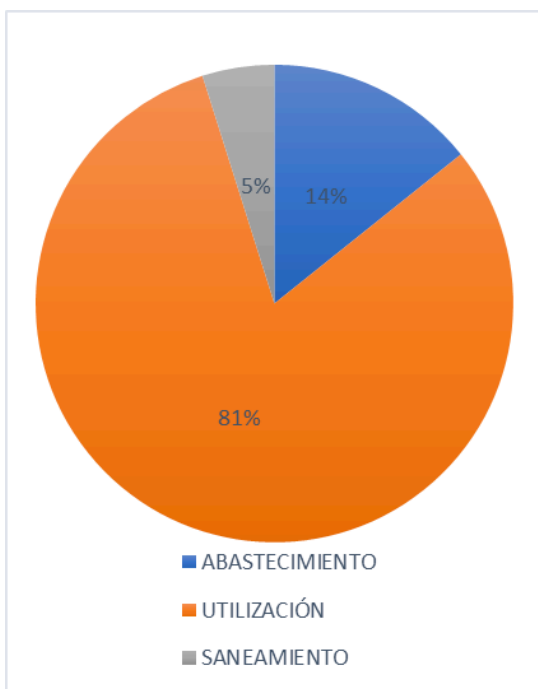


**Gráfico 4.** Porcentaje de consumo energético en la fase de Saneamiento



- CAPTACIÓN
- POTABILIZACIÓN
- DISTRIBUCIÓN
- USO AGRÍCOLA
- USO URBANO
- ALCANTARILLADO
- DEPURACIÓN
- REUTILIZACIÓN

**Gráfico 6.** Porcentaje de consumo energético del ciclo del agua por etapas



**Gráfico 5.** Porcentaje de consumo energético del ciclo del agua por fases

Ha medida que avanzó el análisis se fueron extrayendo **factores determinantes** en el ciclo del agua en términos de consumo energético que se han denominado “cuellos de botella” del proceso, los cuales pueden relacionarse a simple a vista en los gráficos de los resultados obtenidos. Algunos de estos factores están interrelacionados, pero conviene analizarlos por separado.

En orden de aparición en el estudio:

1. Desalación de agua de mar.
2. Sector agrícola.
3. Pérdidas en la red.
4. Sistemas de ACS.
5. Depuración.
6. Reutilización.

En el apartado siguiente (Discusión), se van a analizar los resultados obtenidos y a comentar estos factores determinantes, así como la actualidad acerca de las mejoras en su participación en el proceso del ciclo del agua.

## 5. DISCUSIÓN

El objetivo principal de este estudio es identificar las etapas menos eficientes de todas las que forman parte del proceso del ciclo del agua urbana. Los resultados no dejan lugar a dudas: la fase de Utilización demanda 62.220 GWh/año, lo cual representa el 80,8% de las necesidades totales para todo el ciclo (tabla 10).

De todo este consumo, 60.350 GWh (97% de la fase de utilización y 78.4% del ciclo total) están demandados por el consumo urbano, estimando que la demanda para las actividades domésticas se sitúa en 49.950 GWh (73,9% de la fase de utilización y 59,7% del ciclo total) y que la demanda dedicada a las actividades económicas (comerciales, industriales, recreativas, etc) se

sitúan en 14.400 GWh (23,1% de la fase de utilización y 18,7% del ciclo total).

Es muy notable el hecho de que la mayor demanda energética en nuestro país (y esto puede extrapolarse a la totalidad de los países desarrollados) es la derivada de las actividades diarias y cotidianas que realizamos cada uno en nuestra casa en nuestro día a día, y además, se trata de un valor aplastantemente superior al de la siguiente fase de consumo energético en su totalidad (fase de abastecimiento, que genera aproximadamente 10.974 GWh, un 14,3% del total).

Es evidente que, desde el punto de vista de la eficiencia energética, hay un enorme margen de mejora en el uso del agua doméstica en duchas, lavavajillas, lavadoras y demás electrodomésticos. Reducir el consumo energético de cualquiera de los electrodomésticos entre un 20 y un 30% es un objetivo totalmente factible contando con la tecnología de que dispone cualquiera de los aparatos que pueden adquirirse en la actualidad, suponiendo un beneficio económico tangible para el bolsillo de cualquier ciudadano bajo prácticamente cualquier circunstancia. Aun así, podría mejorarse la tecnología actual y sin duda se hará en un futuro próximo, pero no tiene mucho sentido priorizar este camino si en el nivel que estamos hoy en día no se le saca el mayor rendimiento a lo que tenemos.

También se ha introducido (obligatoriamente en el código de la edificación de nuevas viviendas a partir del año 2.006) el aporte solar mediante la tecnología solar térmica a las calderas productoras de ACS para disminuir el consumo energético de la red eléctrica, y sin embargo, esto no está consiguiendo el objetivo del cambio de la mentalidad hacia la sostenibilidad. Cambia la fuente de energía, pero no tanto el consumo. De cualquier manera, se ha determinado que los sistemas de ACS suponen un cuello de botella, y es sin duda el de mayor importancia por la cantidad de energía que consumen con respecto al resto de operaciones del proceso global, por lo que se analizarán más detenidamente más adelante (se analizarán en orden de aparición).

El problema es social, nuestra visión cívica no está adaptada a un sentimiento ambiental, ni de unidad, ni de solidaridad, más bien al contrario, estamos asentados en una sociedad capitalista y competitiva en la que cada día se crean necesidades nuevas de consumo de bienes materiales que no necesitamos, en la que el agua no es respetada, ya sea por su bajo precio, ya sea por la visión recaudadora cuando se la quiere proteger, o porque sólo causa sensibilización cuando se atraviesa una situación grave de sequía... sea como sea, no se tiene en cuenta. La solución para atajar el problema pasa por crear una conciencia social orientada a la sostenibilidad, solución que es muy fácil de poner en palabras, pero de lo más complejo en instaurar con

acciones, y en el que tiene un papel crucial la Administración de este país.

Para ello ya se han iniciado muchas campañas publicitarias y se seguirán haciendo, así como programas de concienciación ciudadana e incluso impuestos o deducciones de los mismos por comportamientos orientados en este sentido. Es sumamente difícil y en mi humilde opinión nunca tendrá éxito sin una reforma sin precedentes del sistema educativo, que debe establecer unos cimientos que garanticen la inmersión de las mujeres y hombres del mañana en este camino.

Otras medidas clave en un cambio de concienciación podrían ser la sustitución de combustibles fósiles por tecnologías limpias como el hidrógeno o incluso introduciendo el etanol como combustible, lo cual cambiaría la percepción del agua como materia prima para combustible; o incluso garantizando deducciones de impuestos para los que consigan ahorrar agua y energía en una cantidad totalmente admisible (el 20 o 30% que se comentó anteriormente) en los tiempos que corren.

## **6. FACTORES DETERMINANTES DEL CICLO URBANO DEL AGUA**

Aunque sin duda no son los únicos factores determinantes en el consumo energético de todo el ciclo del agua, a lo largo de la exposición metodológica se han identificado

seis factores determinantes con un peso notable en el resultado final, para los que se ha demostrado que conseguir una mejora de eficiencia energética sería más que notable. Se estudiarían con prioridad con respecto a otros factores no mencionados en el estudio. Todos ellos van a ser comentados brevemente a continuación buscando la proposición de soluciones realistas y sostenibles para mejorar la eficiencia del proceso.

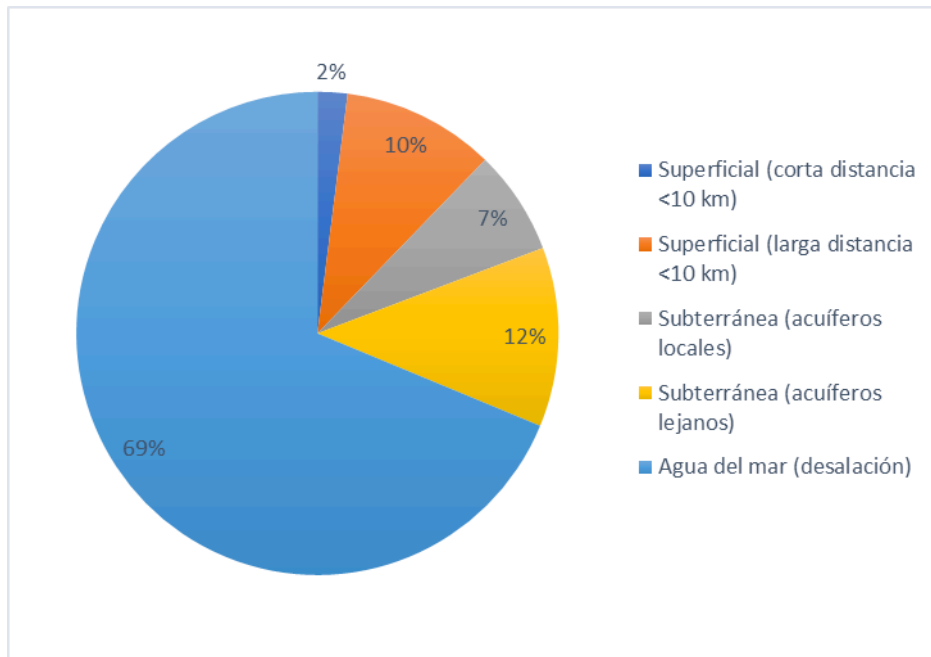
### **6.1. Desalación de agua de mar**

Actualmente, en España se dedican aproximadamente 2.295 GWh al año en la etapa de potabilización, lo cual representa el 20,9% del consumo energético empleado en la fase de abastecimiento y tan sólo el 3,0% de la energía total destinada al ciclo urbano (tabla 10).

Según su procedencia, el mayor porcentaje de consumo energético en esta etapa se debe a la desalación de agua de mar, que oscila entre un 81,5% y un 56,0% del consumo que origina potabilizar un m<sup>3</sup> de agua, tal y como se observa en la tabla 2 de este estudio. Tomando valores promedio de consumo en tanto por ciento, es posible observar como la potabilización de agua de mar mediante una planta desaladora necesita casi el 69% de la energía consumida (Gráfico 7) para el total de la potabilización, lo que se puede cuantificar en 1.575 GWh, o lo que es mismo, el 14% de toda la fase de abastecimiento, o el 2% del ciclo total.

Estos valores son muy representativos del estado de la tecnología de potabilización en función de su procedencia puesto que paradójicamente existe en España aproximadamente una planta EDAM por cada cuarenta plantas ETAP (FCC Aqualia) en funcionamiento, siendo la cantidad de agua salada más del 97% del total de agua que se encuentra en la naturaleza, por lo que constituye un reto absolutamente indispensable el alcanzar una tecnología rentable y eficiente para conseguir desalinizar el agua del mar.

Actualmente el consumo promedio de una ETAP está en torno a 0,4 kWh/m<sup>3</sup> (FCC aqualia) mientras que el de una EDAM se estima en 4,5 kWh/m<sup>3</sup> (Sala), más de 10 veces superior. Si no existiesen limitaciones en la producción de energía eléctrica se acabaría el problema de la escasez de agua potable, sin embargo, hoy en día este valor está muy lejos de ser competitivo a pesar de contar con la ventaja estratégica de contar una fuente de abastecimiento de un volumen significativamente mayor y utilizando un agua de baja calidad. Aunque el proceso se encuentra inmerso en una revisión constante para aumentar su eficiencia energética, lo cierto es que aún le queda mucho camino por recorrer. De las diferentes tecnologías empleadas en desalación las más desarrolladas son Osmosis Inversa (RO) (entre 2,4 y 4,5 kWh/m<sup>3</sup>) y Destilación por Múltiple Efecto (MSF) (entre 3,5 y 4,0 kWh/m<sup>3</sup>) (Fuentes y Ramírez, 2003), y se elegirá una u otra en función de:



**Gráfico 7.** Porcentaje de consumo energético por  $m^3$  en potabilización según la fuente.

1. Parámetros locales: Coste de energía y tipo de fuente de energía disponible.
2. Parámetros del agua a tratar: Salinidad y Calidad del agua requerida.

La limitación competitiva del proceso reside en el coste intrínseco de la separación de las sales disueltas y del agua pura, por lo que el consumo energético varía en función de la salinidad del agua del mar que se utilice en la planta, de manera que las plantas que utilizan aguas salobres interiores (concentraciones entre 3.000 – 20.000 ppm) tienen un consumo energético aproximado entre 0,72 - 2,6 kWh/ $m^3$  (CEC, Hardy y Garrido) muy inferior a las plantas que utilizan agua salada del mar de superficie o de profundidad (20.000 – 50.000 ppm), que pueden llegar a consumir 5,0 kWh/ $m^3$  (CEC, Hardy y Garrido, Sala).

Teóricamente, para disolver 38 kg de sal en un  $m^3$  de agua (contenido medio del agua del mar), se desprende una cantidad de calor de aproximadamente 670 kcal, lo que equivale a 0,78 kWh. Si el proceso fuese reversible, sería posible gastar la misma energía para realizar el proceso inverso, sin embargo no lo es, y además hay que añadirle el consumo derivado de todos los procesos técnicos necesarios dentro de la propia planta (bombeo, tratamiento, lavado de las instalaciones, pérdidas de carga, etc). Los avances en la tecnología y en los procesos que reducen los costes y mejoran la eficiencia de los pretratamientos, la mejora de flujos, las mejoras de los materiales de las membranas y sus obstrucciones, las mayores tasas de reposición y la reducción de los costes de fabricación han conseguido valores experimentales de entre 1,6 y 2,0 kWh/ $m^3$

(Esteban y García-Sánchez) tanto para RO como para MSF. Son valores esperanzadores (más de un 50% de ahorro energético en ambas tecnologías) y además son alcanzables, pero podrían no ser suficientes a largo plazo y además a corto plazo implican una modernización generalizada de las plantas existentes, por ello en paralelo se sigue investigando en nuevas tecnologías siempre con la premisa de que en todo caso nunca se podrá llegar por debajo del valor que dicta la termodinámica ( $0,78 \text{ kWh/m}^3$ ).

En este sentido se está implementando la Deionización Capacitiva (CDI), muy próxima a alcanzar este valor mínimo de consumo, aún está en fase de pruebas en planta piloto, por lo que aún no es una tecnología consolidada, pero ha registrado valores de consumo de  $0,6 \text{ kWh/m}^3$ , lo cual resulta esperanzador. Consiste en un proceso electroquímico de absorción de iones en una doble capa formada en dos electrodos a causa de una diferencia de potencial que hace que los iones disueltos en el agua se desplacen hacia el electrodo de signo contrario. Funciona como un condensador de capacidad. La energía necesaria para llevar a cabo el proceso es la diferencia entre la energía necesaria durante la carga del condensador de capacidad (fase de deionización) y la energía recuperada durante la descarga del condensador de capacidad (fase de regeneración). La ventaja de esta nueva tecnología es poder recuperar la energía liberada del proceso de deionización del agua, sacando provecho del

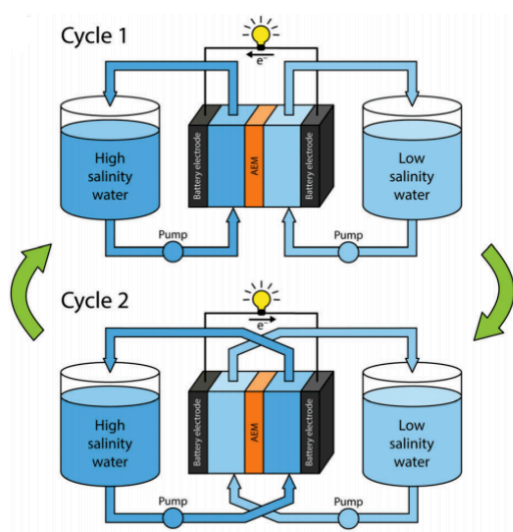
almacenamiento de la energía en el condensador, para lo cual debe primero descargarse, por lo que se disponen dos condensadores en paralelo de forma que, al descargarse el primero, el otro entra en funcionamiento utilizando la energía liberada para el proceso de desalación. Además del consumo, presenta la ventaja sobre las otras dos tecnologías de ser un proceso a baja presión en la que no es necesario utilizar membranas, que tanto reducen el rendimiento del proceso.

Actualmente se está probando esta tecnología aplicada a utilizar dos corrientes con distinta concentración salina (Penn State, Universidad de Pennsylvania). Se trata de aprovechar la diferencia de concentración entre el agua de los ríos y la del mar mediante plantas de energía situadas en la desembocadura de los ríos utilizando esta innovadora tecnología, resultando una celda de flujo electroquímico que produce una cantidad de energía sin precedentes y sin pérdidas de eficiencia, alternando en cada ciclo el tipo de agua que atraviesa cada canal. El esquema del funcionamiento puede observarse en la Figura 2.

Las primeras pruebas estiman la producción de  $12,6 \text{ W/m}^2$  de membrana, lo cual tiene el potencial de generar nada más y nada menos que el 40% de toda la demanda mundial de energía. La limitación de esta tecnología podría estar en la reacción de otros compuestos químicos disueltos en entornos



concretos, ya que aún es muy experimental y aun no se ha probado en entornos reales.



**Figura 2.** Esquema de funcionamiento de aplicación de CDI entre desembocadura de un río y el mar.

*Fuente: Royal Society of Chemistry*

A corto plazo, la eficiencia energética se está desarrollando mediante la combinación de las plantas desaladoras con tecnologías de fuentes renovables para cubrir la demanda energética, ya sea de forma indirecta con suministro desde la red o directa conforme la tecnología se va desarrollando. La desalación necesita una fuente continua de suministro de energía y la energía solar fotovoltaica, una vez alcanzados costes de producción competitivos, se enfrenta al desafío de la disponibilidad mediante el desarrollo de sistemas de almacenamiento, donde la no emisión de GEI será una ventaja adicional que podría dar el empujón necesario para alcanzar una solución definitiva en este campo.

## 6.2. Agricultura

El consumo de agua dedicada a la agricultura supone el 8,7% del consumo total de energía demanda por el ciclo total del agua urbana, correspondiendo el mayor aporte a la captación (4,0%), y muy parejo para la distribución (2,3%) y el uso final (2,4%), tal y como se recoge en la tabla 10, donde además se comprueba que el peso del sector agrícola en el abastecimiento de agua supone el 43,7% del consumo total que se emplea en esta fase. Esto se debe al gran volumen de agua que necesita, el 48,9% del total de agua utilizado en la fase de abastecimiento (Tabla 4).

Por lo tanto, el volumen de agua empleado, así como la energía demandada representan un porcentaje a tener en cuenta en el estudio, más si cabe si añadimos el desafío al que se enfrenta el sector agrícola en los próximos años, en el que el objetivo será producir más alimentos con menos recursos atendiendo al creciente aumento de la población y a los limitados recursos energéticos y medioambientales disponibles. Es imperativo encontrar soluciones eficientes puesto que las sequías y el cambio climático son una realidad creciente.

Se debe trabajar en conjunto para conseguir respuestas sostenibles y eficaces para la optimización del sector. Por un lado, es necesario disminuir la cantidad de agua necesaria para producir cada unidad de consumo (huella hídrica) y por otro, será

necesario disminuir la cantidad de GEI emitidos al producir cada unidad de consumo (huella de carbono).

En este sentido, el mayor consumo se ha observado en la fase de abastecimiento, concretamente en la fase de captación. Sería muy útil la utilización de bombas que utilizaran tecnologías limpias para la captación de agua, como puede ser por ejemplo mediante energía solar fotovoltaica, que presentaría los mismos desafíos presentados para la desalación; o incluso podría utilizarse una bomba que como fuente de energía utilizase la energía cinética que le proporcionase el agua de los ríos a su paso. De hecho, esta podría fabricarse y comercializarse como método de bajo coste para que fuese accesible a todo el mundo, y es un proyecto viable puesto que ya hay empresas como Aqysta que ya están apostando por ello con su Barsha Pump (Figura 3), aunque debe quedar claro que el uso de este tipo de equipos supondría un aporte de gran ayuda a la eficiencia energética, pero nunca constituirían una alternativa definitiva a los métodos convencionales.



**Figura 3.** Barsha pump, de aqysta

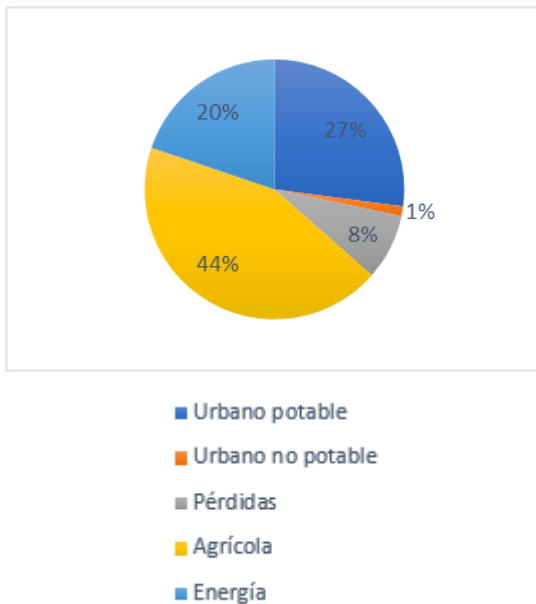
*Fuente: iagua*

También orientado a la disminución en la fase de abastecimiento, habría que considerar el ahorro que supondría sustituir la captación de agua del entorno por emplear agua regenerada para riego. La reutilización presentaría un considerable ahorro de agua y energía, en la actualidad, un 10% del agua tratada es regenerada, por lo aún se tiene un enorme margen de mejora en esta actividad, siempre regulada en España, como ya se ha explicado anteriormente en la fase de metodología, por el RD 1620/2007, en el que se especifican las características y parámetros que debe poseer el agua regenerada, así como las condiciones y dispositivos que deben emplearse en función del tipo de riego al que vayan a destinarse, lo cual puede suponer una inversión inicial para todos los que comiencen a utilizar esta fuente.

En cuanto a la utilización final del agua en el sector, es fundamental destinar los esfuerzos a la optimización de la agricultura “de precisión”, donde la toma de decisiones se fundamenta en mediciones de variables concretas a través de las tecnologías de la información y de la comunicación (TICs), utilizando de forma más eficiente los recursos productivos de agua, energía y fertilizantes en las explotaciones mediante la gestión integral del riego para el diseño de una programación óptima estableciendo una sectorización de las instalaciones de riego mediante elementos de control y automatización.

### 6.3. Pérdidas en la red

Las pérdidas de energía en la red de abastecimiento suponen en torno al 8% de la energía empleada en la esta fase (tabla 4). Esto supone casi la cuarta parte del total de la energía empleada para el destino urbano (8% de pérdidas VS 28% de Urbano Potable) tal y como se observa en el gráfico 8.



**Gráfico 8.** Porcentaje de consumo energético en abastecimiento según destino.

Si se considerase un sistema de abastecimiento ideal sin pérdidas, toda esta cantidad de energía perdida podría ser utilizada para la distribución del agua potable, disminuyendo de esta manera la huella hídrica del ciclo del agua puesto que se obtendría una mayor cantidad de producto utilizando la misma energía por unidad de volumen de entrada. Esto quiere decir que minimizando las pérdidas de la red de distribución se podría aumentar la eficiencia

energética de esta fase hasta nada despreciable 8%.

El camino más eficaz para atajar este fenómeno se divide en dos acciones complementarias:

- El control, para mitigar las pérdidas aparentes (40% de las pérdidas totales), mayormente ocasionados por errores en las medidas, los consumos estimados y los fraudes;
- La inspección de la red, para mitigar las pérdidas reales (60% de las pérdidas totales), que son las fugas de la red; y también para corregir las pérdidas aparentes identificadas por el control.

El control debe basarse en el conocimiento de la red en cuanto a su disposición cartográfica, así como a la distribución de todos los elementos accesorios y de los puntos conflictivos susceptibles de perder agua. A partir de aquí se trata de medir todo lo medible en la red para observar el funcionamiento y prever posibles efectos a causas justificadas, como pueden ser las fugas. Para esto, hoy en día se dispone de los Sistemas de Teledetección, que constituyen la aplicación de las TICs mediante la monitorización de la red a través de plataformas en las que se obtiene la información en tiempo real de los diferentes elementos de control integrados en la red, tales como controladores de nivel, presión, temperatura, caudal, etc así como otros elementos que podrían influir en el

comportamiento de las canalizaciones y embalses o presas tales como la lluvia, las previsiones meteorológicas e incluso una biblioteca de históricos en la red. Se trata de implementar sistemas de gestión integrada que además de programar el óptimo funcionamiento de la red encuentren los puntos conflictivos mediante las distintas modificaciones de los parámetros medibles. Una vez detectadas las anomalías se pasa a la fase de inspección de las zonas comprometidas.

Durante la inspección se accede a la zona marcada y se procede a la detección del punto de fuga mediante modernas técnicas de ultrasonidos y se repara. A veces dichas zonas comprometidas presentan un difícil acceso, para lo que se está desarrollando en la actualidad sistemas de inspección utilizando un dron (Figura 4), que presenta las ventajas de la accesibilidad, el recorte del tiempo de espera hasta la detección de la fuga y de su reparación, lo que también provoca la reducción de costes y el aumento de eficiencia energética, más aún considerando que con su utilización no es necesaria la interrupción del servicio.



**Figura 4.** Tecnología Dron para la inspección de redes

*Fuente: iagua*

Existen diferentes técnicas de teledetección aplicadas a este campo y todas ellas van actualizándose de una manera vertiginosa, éste es sin duda un sector en auge y en el que se está volcando el desarrollo de la tecnología en estos momentos, por lo que, afortunadamente es posible vislumbrar que la excesiva cantidad de energía perdida en el ciclo podría tener los días contados incluso a corto plazo. Si esto ocurriese, estaríamos en disposición de aumentar la eficiencia energética en la fase de abastecimiento al menos ese 8,2% que se mencionó al principio del planteamiento de esta cuestión.

#### **6.4. Sistemas de acs**

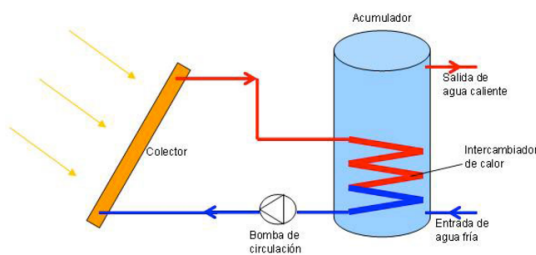
La fase de utilización del agua entre uso urbano y agrícola representa el 81% del consumo del ciclo total (Gráfico 5), del que el 78,4% representa el consumo derivado por la actividad urbana (Gráfico 7). Sin duda es el cuello de botella por excelencia de todo el proceso y puede que el más difícil de corregir, es la etapa decisiva del ciclo, por lo que es de suma importancia optimizar las operaciones implicadas en esta fase, que son muchas y muy diferentes.

De entre ellas, después de la mentalización de la ciudadanía, destaca el consumo bruto derivado del uso de los sistemas de ACS. Para disminuir este alto consumo, existe un abanico extensísimo de posibilidades, de entre las cuales se van a plantear algunas de las que a priori podrían suponer una mayor mejora cuantitativa a corto plazo, aunque

lamentablemente en la actualidad se traducen en un ahorro muy bajo en el contexto global. Aunque sí pueden contribuir de una manera intangible a promocionar la conciencia social necesaria para germinar nuevas tecnologías e ideas que se traduzcan en un ahorro más a tener en cuenta.

DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LOS EQUIPOS ACS:

1. **Energía solar** (Figura 5) como contribución energética adicional. Es el sistema más extendido para la eficiencia energética desde 2.007, año en el que se introdujo como obligatorio para viviendas de nueva construcción a través del nuevo Código Técnico de la Edificación (CTE). Sería una gran noticia si se empezasen a generalizar los sistemas en los que la energía solar fuese la fuente principal de aporte energético y se consiguiese garantizar el suministro total.



**Figura 5.** Circuito de energía solar como aporte en sistemas de ACS.

Fuente: [www.solargal.com](http://www.solargal.com)

2. Sistemas de **bomba de calor** en caso de que la energía solar no pueda ser eficiente. Utilizar una enfriadora

condensada por agua, de manera que el calor que se genera para producir frío pueda usarse para ceder calor al agua para sistemas de ACS.

3. **Intercambiadores de calor agua-agua** aprovechando el calor de unas aguas para transmitirlos a otras, utilizando el calor procedente de las aguas que ya han sido previamente calentadas. Se estima que utilizando este sistema en horas puntas puede aprovecharse más del 65% del agua consumida, lo cual puede ser de gran utilidad en complejos hoteleros o en bloques residenciales.
4. Utilizar **anillos de recirculación** para precalentar la caldera y así llegar al óptimo de temperatura en menos tiempo administrando menos energía.
5. Utilizar **estabilizadores de presión** para optimizar el consumo de los grupos de bombeo, mejorar el mantenimiento y ahorrar en agua y energía.

DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL CONSUMIDOR:

1. Concienciación acerca de la gravedad del problema: **La que energía más limpia es la que no se consume.** Para ello es necesario promover campañas concienciación ciudadana.
2. Promover y facilitar la adquisición de **electrodomésticos** de bajo consumo (A, A<sup>+</sup>, A<sup>++</sup>), que suponen un elevado ahorro a corto a plazo.

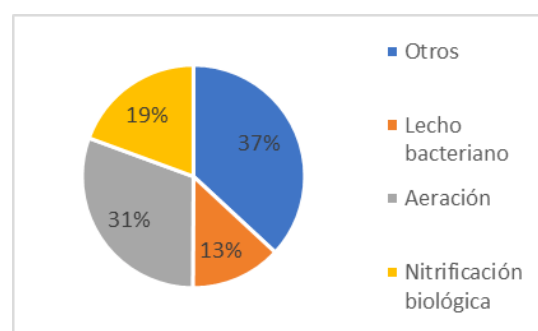
3. Instalación de **equipos termostáticos** para la adecuación del consumo y la demanda real.
4. Instalación de **temporizadores** para minimizar tiempos innecesarios de funcionamiento.
5. Instalación de **medidas correctoras** del consumo: aireadores, alcachofas ecológicas, reductores volumétricos, grifería óptima, etc.

### 6.5. Depuración

El proceso de depuración de aguas residuales consume el 84% de la energía que demanda la fase de saneamiento (Gráfico 4), aunque respecto al ciclo global representa tan sólo alrededor del 4% de la energía necesaria, ya que la fase de saneamiento es la que menor cantidad de energía demanda del ciclo (5%, Gráfico 5).

El proceso de aireación de lodos activos es el más influyente en términos de energía consumida de todos los que se dan lugar en la depuración. Es posible ahorrar un porcentaje energético considerable mediante la aplicación de un control automatizado sobre la concentración de oxígeno disuelto en función de la concentración orgánica de las aguas para optimizar el caudal del aire de entrada. Sin embargo, el proceso de depuración es un proceso complejo en el que intervienen una gran cantidad de actores. Un pequeño desajuste afecta a toda la cadena, de manera que, aunque en la fase de

metodología se indican los procesos más significativos en cuanto a consumo (aireación, nitrificación biológica y lecho bacteriano), el conjunto de los demás procesos representa un 37% del peso del consumo en la operación (Gráfico 9), lo cual indica que, en este caso, la mejor manera de optimizar la eficiencia energética de una planta de depuración es incidiendo en sus procesos bajo una visión de análisis global.



**Gráfico 9.** Porcentaje de consumo energético de los procesos críticos en una planta tipo de depuración de aguas residuales en España

En este sentido, algunas acciones productivas a tomar sobre el proceso dirigidas al proceso deben estar orientadas a:

1. Optimizar bombeos y funcionamiento de motores mediante automatización para acondicionar un caudal variable en función del agua a tratar.
2. Minimizar pérdidas utilizando sistemas de control e instrumentación inteligente.
3. Optimizar entradas y salidas de aguas residuales.

Otro camino de ahorro mucho más eficiente es transformar el agua residual en una fuente

de energía cambiando la visión tradicional del proceso de depuración y convirtiendo completamente estas plantas en autogestionadas con energía que ellas mismas generan. En este camino hay abiertas varias alternativas, de las cuales la más prometedora parece estar en la senda de la valorización de materia orgánica mediante tratamiento de biorreactor anaerobio de membranas AnMBR y posterior valorización de nutrientes mediante su tratamiento con microalgas mediante fotobiorreactor de membranas MPBR (CALAGUA), en la que se pretende convertir los residuos en recursos.

Otros nuevos conceptos podrían surgir de la separación en origen, de la aplicación de sistemas de vacío o la implementación de biopilas de combustible, sin embargo, la tendencia actual es a depuradoras autosuficientes mediante la gasificación de lodos de depuradora. Esta técnica consiste en la conversión termoquímica del lodo en presencia de un agente gasificante, generalmente aire, oxígeno o vapor de agua, de manera que se destruyen los agentes patógenos transformando el residuo en gas limpio y combustible con múltiples aplicaciones para aprovecharse energéticamente o como materias primas en procesos de síntesis, además de obtener alquitranes y un residuo de bajo volumen.

La filosofía es la misma, la tendencia es hacia la autosuficiencia de los procesos de depuración.

## 6.6. Reutilización

En España se reutiliza un 10% de las aguas residuales. Puede parecer un porcentaje bajo y sin embargo el país se encuentra a la cabeza mundial de este proceso (número 9 del ranking mundial en términos porcentuales, se estima que tan solo el 4% de toda el agua consumida en el mundo es reutilizada.) para fines primordialmente agrícolas. Si se observa la cantidad de energía empleada en agricultura en la fase de abastecimiento, 43,5% de energía consumida para esta fase y 6,3% en el ciclo total (Tabla 10) es de esperar un aumento en la eficiencia energética de una magnitud similar si se consiguiese disminuir estas cantidades gracias a la sustitución de la captación de agua del medio natural por la reutilización de aguas regeneradas para la agricultura.

En la actualidad, las dificultades tecnológicas para regenerar un agua de calidad han quedado superadas mediante la producción de biogás a partir de la digestión de los lodos de depuración, tecnología que requiere una inversión inicial que no todas las administraciones pueden asumir en detrimento de “otras prioridades”. La realidad es que la limitación es administrativa y social, dentro del modelo económico occidental de “extraer, fabricar, consumir, desechar”. Por ello, si se busca aumentar la sostenibilidad del ciclo del agua y reducir el estrés hídrico es imprescindible trabajar con estos dos actores para definir los parámetros de seguridad suficientes, al mismo tiempo

que razonables, que permitan aprovechar mejor este recurso.

En este sentido, España cuenta con el RD 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

Concebido para intervenir en determinados aspectos de la reutilización de aguas que no han sido contemplados en las especificaciones técnicas y que podrían traducirse en riesgos para la salud de los ciudadanos, este RD establece el régimen jurídico para la reutilización de aguas depuradas. En él se describen detalladamente los requisitos necesarios para llevar a cabo la actividad de utilización de aguas regeneradas, los procedimientos para obtener la concesión exigida por la ley así como las disposiciones relativas a los usos admitidos y exigencias de calidad precisas en cada caso. Por un lado se establecen las condiciones básicas para la reutilización de aguas depuradas en España estableciendo unos mínimos obligatorios exigibles en términos de calidad del agua que se enumeran en el Anexo I, en el que se separan claramente los usos admitidos para estas aguas de los usos prohibidos, que son los destinados a consumo humano, industria alimentaria, instalaciones hospitalarias o similares, cultivo de moluscos filtradores, uso recreativo en parques y piscinas, en industria para torres de refrigeración y condensadores en los que la evaporación es susceptible de Legionella, fuentes públicas o interiores, y/o riesgos sanitarios o ambientales determinados

por las autoridades competentes. Bajo esta clasificación, se establecen las responsabilidades de los contratos de cesión de derechos en la utilización de aguas regeneradas, así como los procedimientos para la reutilización de aguas en función de si serán administraciones públicas, privadas o mixtas las encargadas de su explotación.

Como consecuencia, este RD se hace imprescindible para la homogeneización tanto de las directrices de usos de las aguas regeneradas como de los mínimos exigibles de la calidad de las mismas como de los procedimientos necesarios para su utilización. Al remar todas las instituciones en la misma dirección se aumentan notablemente las posibilidades de mejora continua de la utilización de este recurso a través de un crecimiento transversal basado en la transmisión de conocimientos que serán válidos tanto para unos como para otros casos; se trata de poner en común el conocimiento al servicio de la sociedad para promocionar, desarrollar y optimizar esta etapa del ciclo del agua que tan importante y crucial puede llegar a resultar en el futuro de este sector en pro de la eficiencia energética y del ahorro de agua.

## **7. CONCLUSIONES**

La energía está presente en todas las fases del ciclo del agua influyendo directamente sobre cada m<sup>3</sup> de agua manipulada formando un binomio indivisible y crucial para nuestra



sociedad, y como tal, se deben tomar acciones enfocadas tanto a la mejora de la eficiencia energética como al ahorro de agua de una manera integral, es decir, de principio a fin y en conjunto, para mejorar el rendimiento del ciclo del agua.

De todas las posibles acciones a llevar a cabo, destaca el papel protagonista que tiene el factor humano sobre el tecnológico en el consumo de energía del ciclo. La fase de utilización de agua para el consumo doméstico representa el 60% del consumo total, es la etapa menos eficiente con mucha diferencia y es de vital importancia que se tomen medidas al respecto: Es imprescindible, por un lado, crear conciencia social desde la educación, para crear unos cimientos de valores sobre los que construir una realidad más acorde con la actualidad en cuanto a la significancia del agua; y por otra, crear conciencia política, a partir de los organismos reguladores de los que disponemos para cambiar las prioridades respecto al agua dotándola de una posición de mayor valor tanto social como económico.

De las acciones a llevar a cabo desde el punto de vista tecnológico, destaca, sobre la fase de abastecimiento, el resultado de la inversión en tecnología en desalación a largo plazo, con la que es posible disminuir un 85% el consumo de energía de esta operación, pasando de los 4,5 kWh/m<sup>3</sup> utilizando RO a los poco más de 0,6 kWh/m<sup>3</sup> de la CDI. A corto plazo el uso de energías renovables

como fuente de energía disminuye además la huella de carbono.

También destaca el uso de agua reutilizada para la agricultura, que podría llegar a reducir el 4% del consumo total de energía, que es el destinado a la captación de agua para el uso agrario. Otra opción podría ser utilizar fuentes de energía limpias tales como las renovables o aprovechar la propia energía de los ríos transformándola en energía cinética para bombear agua.

Destacar también en la fase de abastecimiento la importancia de la inspección y el control mediante nuevas tecnologías TICs en la red de distribución, que pueden llegar disminuir el consumo de energía hasta un 8% del ciclo total si se llegase a eliminar por completo las pérdidas en la red.

Sobre la fase de utilización, además de lo ya expresado sobre el sector doméstico, es importante recalcar en uso urbano e industrial, la existencia de múltiples posibilidades para aumentar la eficiencia energética de los sistemas de ACS, tanto sobre su desempeño como sobre los usuarios que las dominan, cuya instalación en las casas promueve esa conciencia social tan fundamental. Sobre el sector agrícola, el uso de las tecnologías TICs optimiza recursos y reactivos, así como procesos de programación óptima en la red.

Sobre la fase de depuración, cabe destacar la necesidad de aumentar la eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales en su conjunto bajo la premisa de revisión integral manteniendo siempre en el punto de vista procesos clave como pueden ser la aireación, y por supuesto la reutilización, para aumentar ese 10% que en la actualidad se lleva a cabo para elevarlo continuamente y sin descanso hacia una mejora sustancial de acuerdo a las labores de organización que en este caso sí están siendo promovidas acertadamente por el Administración.

En definitiva, es necesario optimizar los procesos presentes e investigar nuevas líneas de desarrollo para implementar la eficiencia energética en el ciclo del agua frente a las numerosas adversidades a las que se enfrenta la sociedad y el planeta entero, para lo cual es imprescindible acompañar el conocimiento científico con una voluntad clara de cambio por parte de los seres humanos en forma de cambio de mentalidad, para cambiar el valor de los recursos involucrados en el binomio energía y agua entendiendo el problema de manera conjunta. El calentamiento global y el crecimiento demográfico son gigantes que discurren por una senda sin retorno, a la que es imperativo que se una el conjunto de la sociedad a través de los políticos, ingenieros, investigadores y sobre todo lo que todos somos, los usuarios, para reconocer el problema como tal, aceptar el desafío y adoptar las decisiones y las responsabilidades que a todos nos corresponden.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- AENOR (2017). UNE-EN 100030:2017. Prevención y control de la proliferación y diseminación de Legionella en instalaciones. AENOR, Madrid. España.
- Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento (AEAS) (2002), Suministro de agua potable y saneamiento en España (2002) VIII Encuesta nacional de abastecimiento de saneamiento y depuración, Madrid. España.
- Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento (AEAS) (2010), ¿Qué es la gestión del agua urbana?, Madrid. España.
- BOE (2008). RD 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Boletín Oficial del Estado núm. 294, de 8 de diciembre de 2007. España
- Cabrera E., Cobacho R., Espert V. & García-Serra J. (2008), Agua y Energía: una relación que conviene comprender, Instituto Tecnológico del Agua, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Cabrera, E., Pardo, M. A., Cabrera, E. Jr., & Corbacho, R. (2008). Agua y energía en España. Un reto complejo y fascinante. Mimeo. España.
- California Energy Commission (CEC) (2005), California's Water-Energy Relationship, Final Staff Report,

- CEC700-2005-011-SF, State of California, noviembre de 2005. EEUU.
- Cobacho R. (2000) La gestión de la demanda en el contexto de una nueva política integral del agua. Su aplicación al suministro urbano. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Corominas, Massip J. (2009), Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad, Comunicaciones de los invitados especiales, Jornadas de Ingeniería del Agua, Madrid. España.
- CTE (2013). Código Técnico de la Edificación. España.
- Fuentes M., Ramírez A. (2003). Desalinización de agua: Una alternativa para resolver la demanda de agua potable en el sur de la República de México. Agua latinoamericana. Septiembre / Octubre 2003. México.
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2012), Guía sobre Hidroeficiencia Energética, Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid. España.
- GWRC. Water and Energy Report of the GWRC Research Strategy Workshop. (2008). Global Water Research Coalition. Londres.
- Hardy L., Garrido A. (2010). Análisis y evaluación de las relaciones entre el agua y la energía en España, Fundación Botín, Papeles de Agua Virtual, N°6, Madrid. España.
- Instituto Nacional de Estadística (2013), Encuesta sobre el Suministro y Saneamiento del Agua. Año 2013. Octubre 2015. España.
- Instituto Nacional de Estadística (2013), Encuesta sobre el Suministro y Saneamiento del Agua. Año 2013. Octubre 2015. España.
- Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2013), Estudio de prospectiva: Consumo energético en el sector del agua. Tecnologías del agua. España.
- Kim T., Logan B. E., Gorski, C. A, (2017). High power densities created from salinity differences by combining electrode and Donnan potentials in a concentration flow cell. EEUU.
- Murgui M., Cabrera E., Pardo M. A., Cabrera E Jr, (2011), Estimación del consumo de energía ligado al uso del agua en la ciudad de Valencia. ITA, U Politécnica de Valencia. España.
- Peñuela G., Morató J., (2015) Manual de Tecnologías sostenibles en tratamiento de aguas. ALFA TECSPAR. Europa y América Latina.
- Pérez J., (2014), Gestión energética en el ciclo integral del Agua. FCC Aqualia. España.
- Sala L. (2007), Balances energéticos del ciclo de agua y experiencias de reutilización planificada en municipios de la Costa Brava. Valencia. España.

**UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**  
**Y**  
**UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS**



**MASTER OFICIAL EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**PROYECTO DE FIN DE MASTER**

**Geostatística aplicada al análisis de la contaminación  
hidrogeológica por nitratos en las lagunas de Villafáfila  
(Zamora).**

**AUTOR:**  
**Azahara Cidón Trigo**

**DIRECTOR:**  
**Idelfonso Armenteros Armenteros**  
**Antonio Martínez Graña**

Alcalá de Henares, 12 de Septiembre de 2017

## ÍNDICE

RESUMEN.....	49
1. INTRODUCCIÓN.....	49
1.1. MARCO GEOGRÁFICO .....	50
1.2. MEDIO HUMANO .....	51
1.3. PROBLEMÁTICA .....	51
1.4. OBJETIVOS.....	53
2. CONTEXTO DEL MEDIO	
FÍSICO .....	54
2.1. MARCO GEOLÓGICO .....	54
2.2. GEOMORFOLOGÍA .....	56
2.3. HIDROLOGÍA E	
HIDROLOGÍA.....	58
3. METODOLOGÍA.....	60
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..	70
5. CONCLUSIONES.....	81
6. REFERENCIAS .....	83
6.1. WEBS CONSULTADAS .....	86
7. ANEXOS.....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Izquierda - Ortofoto de las Lagunas de Villafáfila. Derecha - Trazado sobre el Mapa Topográfico Nacional MTN-25 de la cuenca hidrológica de estudio y de los términos municipales que constituyen la Reserva Natural de las Lagunas de Villafáfila.....	50
<b>Figura 2.</b> Diagrama de Flujo en función del municipio al que pertenece la muestra tomada en las aguas subterráneas de la cuenca de las Lagunas de Villafáfila y los años de obtención de dicha muestra, para el contenido de NO-3. ....	53
<b>Figura 3.</b> Geológico Nacional (MAGNA, IGME) de España a escala 1:50.000 de las hojas 308 (Villafáfila) y 340 (Manganeses de la Lampreana) georreferenciadas a partir de Google Earth. ....	56
<b>Figura 4.</b> Topografía (MDT05-LIDAR) que constituye la cuenca de las Lagunas de Villafáfila.....	57
<b>Figura 5.</b> Topografía (MDT05-LIDAR), cauces y punto de desagüe que constituye la cuenca de las Lagunas de Villafáfila. ....	57
<b>Figura 6.</b> Climograma de la estación meteorológica de Villafáfila. Web: <a href="http://es.climate-data.org/location/279601/">http://es.climate-data.org/location/279601/</a> .....	58
<b>Figura 7.</b> Unidades Hidrogeológicas de Catilla y León y la región del	

Esla-Valderaduey a la pertenecen las Lagunas de Villafáfila.....	59
<b>Figura 8.</b> Diagramas de Pipper de las muestras tomadas agua subterránea de la cuenca de las Lagunas de Villafáfila, proporcionadas por la Confederación Hidrográfica. A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014.....	87
<b>Figura 9.</b> Diagramas de Stiff de las muestras tomadas agua subterránea de la cuenca de las Lagunas de Villafáfila, proporcionadas por la Confederación Hidrográfica. A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014.....	87
<b>Figura 10.</b> Base de datos del contenido en nitratos en las aguas subterráneas de la cuenca de las Lagunas de Villafáfila A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014....	88
<b>Figura 11.</b> Fórmula de la Elipse de Desviación Estándar; Donde xi y yi son las coordenadas para los puntos i, XY representa el centro medio para los puntos y n es igual al número total de puntos.....	63
<b>Figura 12.</b> Ventana de valoración del modelo inverso de la distancia (IDW). A. Ventana de predicción. B. Ventana de error. C. Ventana de predicción después del proceso de optimización.....	65

<b>Figura 13.</b> A la izquierda se recoge el diagrama de la estadística del valor medio; y a la derecha el de la distancia máxima. A. Para la primavera del 2007. B. Para la primavera del 2009. C. Para la primavera del 2012. D. Para la primavera del 2014.....	88
<b>Figura 14.</b> Sumario de índices de error del Krigeado Ordinario: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014.....	69
<b>Figura 15.</b> Sumario de índices de error del Krigeado Simple: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014.....	69
<b>Figura 16.</b> Ortofoto (PNOA_MA_OF_ETRS89_HU30) de Cuenca de las Lagunas de Villafáfila en función de los puntos de muestreo del contenido en NO-3 en las diferentes estaciones y años de toma.....	71
<b>Figura 17.</b> Mapa de densidad de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en NO-3 mediante el Método Kernel Density para: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014.....	71
<b>Figura 18.</b> Spatial autocorrelation (Morans I): de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en NO-3 para: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009	

C. Primavera 2012 D. Primavera 2014.....	72
--	----

**Figura 19.** Histograma de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en NO-3 para: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014. .... 72

**Figura 20.** Gráfico QQ de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en NO-3 para: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014. .... 73

**Figura 21.** Análisis de Tendencias XY de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en NO-3 para: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014. .... 73

**Figura 22 A.** Diagram Vornio de tipo tipo el valor medio (Type: Mean) de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en NO-3 para: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014..... 74

**Figura 22 B.** Diagram Vornio de tipo tipo desviación estándar (Type: StDev), de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en NO-3 para: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014..... 74

**Figura 23.** Gráficos de Semivariograma/Covarianza de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en NO-3 para: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014..... 75

**Figura 24.** Mapa determinístico de distribución del contenido en NO-3 en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación ponderada por el inverso de la distancia (IDW) para: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014. .... 75

**Figura 25.** Mapa determinístico de distribución del contenido en NO-3 en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación polinómica global para POWER=1 A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014..... 77

**Figura 26.** Mapa determinístico de distribución del contenido en NO-3 en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación polinómica global para POWER=2 A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014..... 77

**Figura 27.** Mapa determinístico de distribución del contenido en NO-3 en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación polinómica local para

POWER=2: A. Primavera 2007 B.  
Primavera 2009 C. Primavera 2012  
D. Primavera 2014. .... 77

**Figura 28.** Mapa determinístico de distribución del contenido en NO-3 en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación basado en funciones radiales para: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014. .... 76

**Figura 29.** Mapa geoestadístico de distribución del contenido en NO-3 en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014. .... 78

**Figura 30.** Mapa geoestadístico de distribución del contenido en NO-3 en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Simple: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014. .... 78

**Figura 31.** Mapa de error del contenido en NO-3 en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014. .... 79

**Figura 32.** Mapa de cuantil 90% del contenido en NO-3 en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante

el Método de interpolación Krigeado Ordinario: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014. .... 79

**Figura 33.** Mapa de probabilidad 50mg/L del contenido en NO-3 en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014. .... 79

**Figura 34.** Mapa geoestadístico de distribución del contenido en NO-3 en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario para la primavera 2007 con Mapa de error del contenido en NO-3, Mapa de cuantil del 90% del contenido en NO-3 y Mapa de probabilidad de 50mg/L del contenido en NO-3 de la cuenca de estudio. .... 89

**Figura 35.** Mapa geoestadístico de distribución del contenido en NO-3 en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario para la primavera del 2009 con Mapa de error del contenido en NO-3, Mapa de cuantil del 90% del contenido en NO-3 y Mapa de probabilidad de 50mg/L del contenido en NO-3 de la cuenca de estudio. .... 89

**Figura 36.** Mapa geoestadístico de distribución del contenido en NO-3



en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario para la primavera del 2012 con Mapa de error del contenido en NO-3, Mapa de cuantil del 90% del contenido en NO-3 y Mapa de probabilidad de 50mg/L del contenido en NO-3 de la cuenca de estudio. .... 90

**Figura 37.** Mapa geoestadístico de distribución del contenido en NO-3 en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario para la primavera del 2014 con Mapa de error del contenido en NO-3, Mapa de cuantil del 90% del contenido en NO-3 y Mapa de probabilidad de 50mg/L del contenido en NO-3 de la cuenca de estudio. .... 90

## RESUMEN

La Reserva Natural de las Lagunas de Villafáfila constituye la principal zona húmeda esteparia de Castilla y León y se encuentra en la cuenca semiendorreica del arroyo Salado, el proyecto de decreto por el cual se designan las zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes de origen agrícola y ganadero recoge este humedal como zona vulnerable a la contaminación de las aguas por nitratos. En este sentido los suelos agrícolas del entorno de las lagunas están contaminados por el uso intensivo de fertilizantes, hecho que induce un enriquecimiento en nitratos del acuífero que alimenta las lagunas hasta el punto de alcanzar concentraciones superiores a las permitidas.

En el análisis de la distribución de la contaminación por nitratos se han aplicado seis métodos geoestadísticos: la ponderación inversa de la distancia (IDW), la función de base radial (RBF), la interpolación del polinomio global (GPI), la interpolación del polinomio local (LPI), el método kriging Ordinario (KO) y el método kriging Simple (KS). El método se valida con las concentraciones de nitratos en muestras de agua subterránea de la cuenca de las Lagunas de Villafáfila, durante la primavera de los años 2007, 2009, 2012, 2014. Los estadísticos revelaron que el método de interpolación de Kriging Ordinario es el más adecuado para obtener la cartografía de

distribución y tendencias por contaminación de nitratos, siendo apropiado usar este mapa como plan de fertilización; para identificar las áreas con mayores concentraciones de estos iones y emplearse para proponer estrategias de manejo, conservación y ahorro de fertilizantes agrícolas.

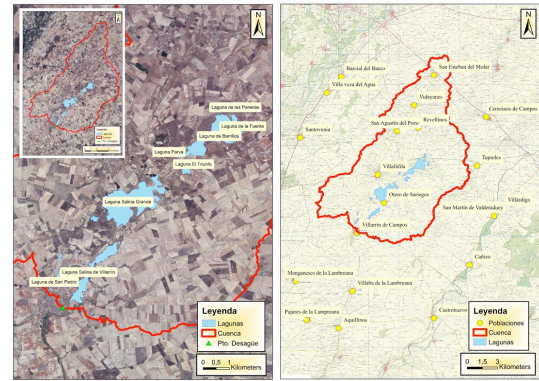
## 1. INTRODUCCIÓN

Las Lagunas de Villafáfila fueron descritas por primera vez por el hidrólogo D. Luis Pardo en su obra *Catálogo de los lagos de España* (Jordá, 1948) donde el autor cita al menos quince lagunas (**Fig. 1**). En 1986, se citan diez lagunas (Ena, 1948) y otros autores como Pallarés (1990; 1992), González y González (1991) citan únicamente tres lagunas: la Laguna de las Salinas, la Laguna Salina Grande y la Laguna Barrillos, a las que se unen otras charcas menores. Esta disminución en número fue debida a la política de desecación de las zonas pantanosas llevada a cabo en España hasta los años 70, haciendo desaparecer la mayoría de las zonas húmedas naturales con el fin de obtener nuevas superficies cultivables; hasta que en 1972, el Instituto de la Conservación de la Naturaleza (ICONA) intervino paralizando las desecaciones. Sin embargo, cuando dicha actuación logro ser efectiva, ya se había producido la colmatación de la Laguna de las Salinas (70 ha) y de gran parte de las lagunas existentes a lo largo del arroyo Salado (Rodríguez y Palacios, 2006).

En el año 1986, la Junta de Castilla y León declaró por la ley 1/1986, Reserva Nacional

de Caza de las Lagunas de Villafáfila con 32.682 hectáreas de extensión, que era la única categoría que en aquellos años permitía el pago de los daños agrícolas causados por la fauna y proporcionaba una cierta protección a esta. En 1996, en virtud de la Ley de Caza de Castilla y León, la reserva se convirtió en Reserva Regional de Caza. En la actualidad, la Junta de Castilla le otorgó la categoría de Reserva Natural al ecosistema de “Las Lagunas de Villafáfila”, en la Ley 8/1991, integrándose en la Red de Espacios Naturales Protegidos de Castilla y León en el Decreto 7/2005, del 13 de Enero.

Internacionalmente la reserva está declarada como "Zona de Especial Protección para las Aves" (ZEPA) por su riqueza ornitológica y como "Lugar de Interés Comunitario" (LIC) ante la Unión Europea por su riqueza botánica, formando parte de la "Red Natura 2000" red que incluye las zonas ecológicamente más valiosas de Europa. Además cuenta con el reconocimiento europeo a través de la inclusión de este espacio en el “Convenio Mundial de Protección de Zonas Húmedas de Importancia Internacional” (Convenio RAMSAR). Desde 1997, se han puesto en marcha varios programas LIFE en la reserva, financiados por la Unión Europea y la Junta de Castilla y León, para la conservación de las avutardas y el cernícalo primillas (Rodríguez y Palacios, 2006).



**Figura 1.** **Izquierda** - Ortofoto de las Lagunas de Villafáfila. **Derecha** - Trazado sobre el Mapa Topográfico Nacional MTN-25 de la cuenca hidrológica de estudio y de los términos municipales que constituyen la Reserva Natural de las lagunas de Villafáfila.

### 1.1. Marco geográfico.

La Reserva Natural de Villafáfila, se encuentra entre las coordenadas de longitud: 5° 30' y 5° 39' y latitudes: 41° 45' y 41° 52', en el cuadrante noreste de la provincia de Zamora, Castilla y León, en España, en plena comarca de Tierra de Campos.

La Reserva está constituida por los **Términos Municipales** de: Cañizo, Cerecinos de Campos, Manganeses de la Lampreana, Revellinos, San Agustín del Pozo, San Martín de Valderaduey, Tapioles, Villafáfila, Villalba de la Lampreana, Villárdiga, Villarrín de Campos,... (**Fig. 1**).

Cartográficamente el área de estudio de las Lagunas de Villafáfila se localiza en los vértices SE, SW, NE y NW de las hojas 308 (Villafáfila), 309 (Villalpando), 340 (Manganeses de la Lampreana) y 341 (San Pedro de Latarce) de la Cartografía MAGNA.

El complejo lagunar de las Lagunas de Villafáfila está situado entre las cuencas de los ríos Esla y Valderaduey, dos afluentes del río Duero. La pendiente del terreno facilita la formación de una red hidrográfica, aunque la orografía es muy suave. Las lagunas ocupan cubetas de inundación del arroyo Salado que temporalmente están drenadas; sin embargo la evaporación durante los meses junio y julio consigue la desaparición del agua de las lagunas, y deja, en algunos años, una fina película de sal que contrasta con el verde-amarillento los cultivos de secano perilagunares.

Las tres lagunas principales engloban más del 80% de la superficie inundada; la Laguna Grande de 192 ha, la Laguna de Barrillos de 118 ha y la Laguna de las Salinas de algo menos de 70 ha en la actualidad, ya que esta última fue desecada en 1972 y recuperada por la Junta de Castilla y León entre 1988-90 (Rodríguez y Palacios, 2006).

## **1.2. Medio humano.**

El estudio del Yacimiento de Santiuste (Otero de Sarriegos) revela la existencia de una interrelación entre el ambiente natural de las Lagunas de Villafáfila y las diferentes ocupaciones humanas durante la prehistoria y las recientes épocas históricas (Jordá, 1993); debido a que durante siglos las lagunas han sido un importante núcleo alrededor del cual se han establecido numerosos asentamientos de diversa índole y cronología.

En *La Carta Arqueológica de Villafáfila* (Rodríguez et al. 1990) se pone de manifiesto

la existencia de treinta y seis yacimientos arqueológicos en el término municipal de Villafáfila. Estos cubren un marco cronológico y cultural, desde el Pleistoceno medio, hasta el Holoceno, con asentamientos correspondientes al Calcolítico, Edad del Bronce, Edad del Hierro, épocas romanas, visigodas y Edad Media.

En la Reconquista la zona fue ocupada y repoblada por Alfonso III (866-910) y la sal se volvió un bien muy preciado, lo que dio lugar a la creación de diversos poblados en torno a las Salinas. Estas fueron únicas fuentes de sal en el Reino de León (Rodríguez y Palacios, 2006).

En la segunda mitad del siglo XX se produce un rápido proceso de despoblamiento, dejando a la zona con una población similar a la de comienzos del siglo XIX. Este despoblamiento fue debido a la masiva emigración a partir de los años de los años 60 a las zonas más industrializadas, principalmente Madrid, País Vasco y Valladolid, coincidiendo con el surgimiento de la mecanización del campo. Este hecho produjo una disminución del trabajo manual en los pueblos de la reserva que fueron incapaces de absorber mano de obra para las nuevas tareas agrícolas y ganaderas (Rodríguez y Palacios, 2006).

## **1.3. Problemática.**

En el código de buenas prácticas agrarias (CBPA) por el que se designan las zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes de origen

agrícola y ganadero, publicado en Valladolid el 14 de febrero de 2017, indica que la deficiente calidad ambiental conlleva deficientes condiciones vitales para los ciudadanos con riesgos para su salud y un deterioro del medio natural relacionado con las actividades de la agricultura y la ganadería.

Se definen como zonas vulnerables, aquellas superficies territoriales cuya escurrimiento o filtración afecte o pueda afectar a la contaminación por nitratos de las aguas. Así mismo las zonas designadas como vulnerables deberán ser examinadas, modificadas o ampliadas por los órganos competentes de las Comunidades Autónomas, en un plazo adecuado y, como mínimo, cada cuatro años.

La contaminación de las masas de agua superficial y subterránea por nitratos procedentes de fuentes agrarias constituye un gran problema cuyo origen se encuentra en la intensificación de la agricultura y de la ganadería; incidiendo a su vez en el desarrollo de factores como: suelo, agua, actividad agrícola, actividad ganadera, topografía, etc.

Como ya sabemos el papel del suelo es fundamental, porque en él se realizan los aportes nitrogenados minerales y orgánicos con el fin de suministrar las unidades fertilizantes que los cultivos necesitan. Estos fertilizantes, mediante una aplicación incorrecta, que deriva principalmente del abono durante periodos lluviosos, dan lugar a problemas de contaminación y desequilibrio en suelos, masas de agua,

cadena alimenticia y en los cultivos sobre los que se desarrollan los suelos; ya que es en el suelo donde tiene lugar el equilibrio entre los fertilizantes recibidos, elaborados y extraídos, pero cuando el equilibrio se rompe, parte de los mismos fertilizantes emigran a otros puntos, arrastrados por procesos de escurrimiento o lixiviación hacia masas de agua superficiales o subterráneas. Son estos desequilibrios los encargados de originar los procesos de modificación de las masas de agua, de salinización y mineralización de los propios suelos; por lo que el objetivo del Código de Buenas Prácticas Agrarias, con respecto a la fertilización agrícola, consiste en una correcta gestión del nitrógeno mediante adecuadas prácticas culturales.

Finalmente, en los programas de actuación de las zonas declaradas como vulnerables a la contaminación con nitratos de fuentes agrarias, se asumen todos los puntos establecidos en el CBPA mediante el Decreto 40/2009, del 25 de junio para el control de los aportes nitrogenados a los suelos agrícolas, así como otros condicionantes relativos a la correcta gestión de las deyecciones ganaderas.

Por lo tanto, como se recoge en el Anexo II de la Directiva 91/676/CEE, de 12 de diciembre, es necesaria la elaboración de un plan de fertilización que debe complementarse con el estudio edafológico de los suelos donde se van a implantar los cultivos con el fin de evaluar las necesidades nutritivas. Para ello debe tenerse, en cuenta el posible comportamiento de los suelos ante la recepción de los fertilizantes, así como la

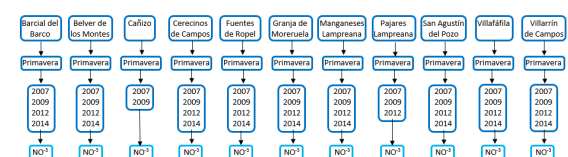
evaluación de estos para que puedan ser extraídos y valorizados por los cultivos a través de su sistema radicular, de forma que se optimice la productividad y calidad de los suelos y se establezcan medidas preventivas frente a la calidad de las aguas y cualquier otro tipo de alteración.

La problemática surge cuando se examinan y amplían el número de zonas vulnerables establecidas por el Decreto 40/2009, del 25 de junio, y se muestra como la zona de estudio, que comprende la cuenca de las Lagunas de Villafáfila, aparece en el artículo 2 designa de nuevas zonas vulnerables en la Comunidad de Castilla y León, dentro del anexo I del Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, transcrito así:

Zona Vulnerable **VILLAFÁFILA ZV-VF** formada por los municipios de: Aquilinos, Barcial del Barco, Bretó, Cañizo, Castrogonzalo, Castronuevo, Cerecinos de Campos, Cerecinos del Cañizal, Cubillos, Fuentes de Ropel, Granja de Moreruela, La Hiniesta, Manganeses de la Lampreana, Monfarracinos, Montamarta, Moreruela de los Infanzones, Pajares de la Lampreana, Piedrahita de Castro, Quintanilla del Molar, Revellinos, Róales, San Agustín del Pozo, San Cebrián de Castro, San Esteban del Molar, San Martín del Valderaduey, San Miguel del Valle, Santovenia, Tapioles, Torres del Cañizal, Valcabado, Valdescorriel, Vega de Villalobos, Vidayanes, Villafáfila, Villalba de la Lampreana, Villalobos, Villanueva de Azoague, Villárdiga, Villarrín de Campos y Villaveza del Agua.

#### 1.4. Objetivos.

En este trabajo se analiza el contenido en  $\text{NO}^{-3}$  en las aguas subterráneas en el entorno de las Lagunas de Villafáfila, a partir de una base de datos en la que se registran los análisis químicos de las aguas subterráneas de la Comunidad Autónoma de Castilla y León, durante diez años: 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015 con un mínimo de dos muestras tomadas por año, en primavera y otoño. De este registro se extrajeron los datos de nitratos en mg/L de los puntos de muestreo del agua subterránea que se hallan en torno a la cuenca de estudio, y sus alrededores, y se eligieron los datos de los puntos más representativos con respecto a la Reserva de las Lagunas de Villafáfila en los años 2007, 2009, 2012 y 2014 para la toma de primavera, ya que resultaban más convenientes (**Fig. 2**). En este estudio se parte de la definición establecida en la normativa de prevención ambiental y protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrarias, así como de la normativa sectorial ganadera que esta norma desarrolla. Se considera que hay contaminación por nitratos cuando hay presencia del ion nitrato de origen agrario en el agua, siendo 50 mg/L la concentración máxima admisible y 25 mg/L el nivel guía.



**Figura 2.** Diagrama de Flujo mostrando cada municipio al que pertenece la muestra tomada en las aguas subterráneas de la cuenca de las Lagunas de Villafáfila y los años de obtención de dicha muestra, para el contenido de  $\text{NO}^{-3}$ .

Con la finalidad de caracterizar el contexto hidrogeológico de la Reserva Natural de las Lagunas de Villafáfila (en la comarca de Tierra de Campos de la provincia de Zamora) y de relacionar el contexto geológico con el contenido de nitratos en las aguas subterráneas, se han realizado cartografías mediante técnicas SIG y se han aplicado herramientas geoestadísticas. El uso de ambas técnicas permitirá conocer con mayor profundidad la distribución espacial de la contaminación por nitratos de las muestras obtenidas, en el periodo estacionario de primavera, dentro del conjunto lagunar, mediante un análisis multitemporal entre los años 2007, 2009, 2012 y 2014. Con ello se pretende analizar la evolución de las tendencias del grado de contaminación a partir de los mapas obtenidos mediante los diferentes modelos de interpolación geoestadísticos utilizados y su posterior validación del mejor método aplicado mediante mapas de error.

El objetivo final es poder corroborar que se trata de una zona vulnerable a la contaminación de nitratos; dado que se trata de una zona ganadera y de cultivos en gran parte intensivos como es propio de la región de “Tierra de Campos” en la que se encuentra la Reserva.

## 2. CONTEXTO DEL MEDIO FÍSICO

### 2.1. Marco geográfico.

Las Lagunas de Villafáfila se encuentran en el borde occidental de la cuenca cenozoica del Duero, dentro de una zona parcialmente endorreica, generada por el mal drenaje, debido a la escasa pendiente y al sustrato cenozoico lutítico en el área del curso del arroyo Salado en que se instalan.

El borde del basamento varisco se encuentra a unos 12 kilómetros al oeste de Villafáfila, existiendo pequeños afloramientos de este zócalo a unos 6 kilómetros de Otero de Saregos, que están constituidos por los metasedimentos de la Zona Centro Ibérica (Julivert et al., 1972) del macizo Hespérico.

En la zona de estudio los materiales del zócalo se encuentran entre 100 y 200 metros por debajo del nivel de las lagunas (Martín y Piles, 1982). El contacto entre el zócalo y los sedimentos cenozoicos es una discordancia angular, que en la zona de estudio presenta saltos originados por fallas de dirección NE-SW.

Gran parte de la Reserva se encuentra en terrenos donde la mayoría de los sedimentos que afloran son del Mioceno Medio-Superior (Vindoboniense) (Martín y Piles, 1982), que en la actualidad se describen al Aragoniense (Mioceno Medio) (**Fig. 3**).

La datación de los materiales más antiguos encontrados al oeste de la zona de estudio, es imprecisa: para algunos autores sería Precámbrico (v.g., Matte, 1968), para otros se situaría en la base Cámbrico-Ordovícico

(v.g., Ferragne, 1972), o bien Cámbrico (v.g., Martínez, 1973). Ante la imposibilidad de tomar un criterio, en la cartografía geológica del Plan Magna se le atribuye una edad Precámbrico-Cámbrico (Martín y Piles, 1982). Estos materiales (**Fig.3A**) son la facies neísica de megacrístales de feldespato y cuarzo de la unidad metamórfica del **Olló de Sapo (PC-CA)**. Sobre estos materiales se dispone la **Formación Puebla ( $O_{12}^1$ )**, con una potencia de 300-400 metros constituida por un conjunto de esquistos y pizarras negras con intercalaciones de cuarcitas (Martínez, 1973). Por encima aparece la **Formación Culebra ( $O_{12}^2$ )**, formada por 80 metros de cuarcitas de color blanco y gris claro, dispuestas en bancos de edad Skidaviense (Martínez, 1973). Esta formación se encuentra intensamente plegada y corresponde a la cuarcita armoricana. Sobre estas cuarcitas aparece la **Formación de San Pedro de las Herrerías ( $O_{2-3}$ )**, compuesta por unos 300 metros de cuarcitas y pizarras negras y asalmonadas que se atribuyen al Ordovícico Medio y Superior.

Los materiales cenozoicos (**Fig. 3B**) de la hoja corresponden a dos unidades en tránsito oblicuo. La **unidad marginal ( $T_{c11-12}^{Bc-Bc1}$ )**, con un espesor de 20 a 30 metros, está constituida por arenas, areniscas, arcillas y conglomerados de color rojizo; sus facies corresponden a depósitos distales de abanicos aluviales con características típicamente fluviales.

La otra unidad (Series Ocre), corresponde a la **facies de la Tierra de Campos**

( **$T_{c11-12}^{Bc-Bc1}$** ) y tiene un espesor máximo de 200 metros. Esta facies está formada por arcillas, limos y arenas de colores ocre y rojizos. En las capas de detriticos gruesos aparece cemento carbonatado y, en las de grano más fino, aparecen costras carbonatadas, y de óxidos de hierro. La unidad representa depósitos de llanuras de inundación asociados a canales sinuosos, y les atribuye una edad que comprende el Mioceno medio, superior y parte del Plioceno (Martín, 1988).

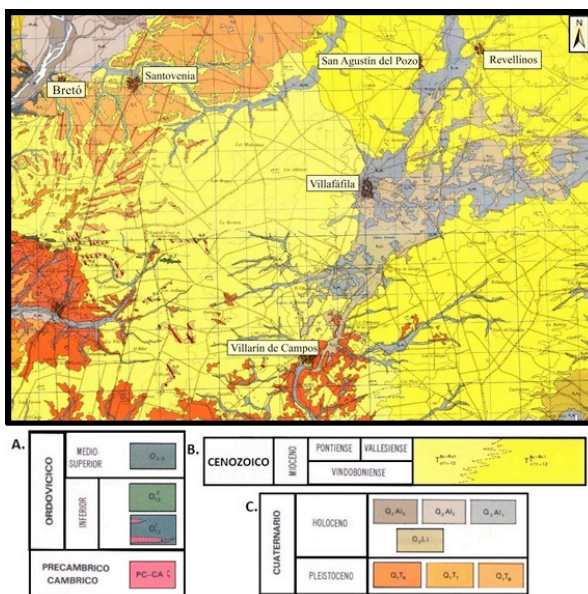
Las lagunas se sitúan sobre el substrato mioceno formado principalmente por facies de limos, arcillas con intercalaciones de margas y arenas (Martín y Barba, 1979; Martín y Piles, 1982).

Los depósitos cuaternarios (**Fig. 3C**) de la zona de estudio corresponden a los depósitos lagunares (facies centrales), que son limos salinos de edades pleistocena y holocena. Además, hay que añadir en las zonas de borde (facies marginales) depósitos fluviales de tipo aluvial (limos y arcillas con cantos dispersos) y los holocenos, generados por la actividad de los arroyos de las Huergas, las Viñas y de las Felipas, que actualmente aportan agua a las lagunas (Martín y Piles, 1982).

Los **depósitos fluviales ( $Q_2Al_1, Q_2Al_2, Q_2Al_3$ )**, mal clasificados son: arenas, arenas limosas, limos y arcillas de colores beige, disconformes sobre el substrato cenozoico. Estos depósitos están ligados a una dinámica fluvial estacional de carácter torrencial o semitorrencial que tiene lugar durante el



desarrollo de los máximos pluviómetros. Aparecen depósitos de canal, de desbordamiento y de llanura de inundación. Los **depósitos lacustres**, son limos arenosos con precipitaciones salinas (**Q<sub>2</sub>Li**), que contienen también arcillas; contienen abundante materia orgánica que les confiere un color oscuro. Durante la estación seca y en las zonas donde las lagunas se desecan, aparecen precipitados de sales. (Martín y Piles, 1982). Estas sales durante la siguiente estación de lluvias se redisuelven y no se preservan en el registro sedimentario de las lagunas (Armenteros, com. pers., 2017). Los depósitos fluviales y lacustres, se encuentran interdigitalizados, observándose cambios de unos a otros tanto lateralmente como en la vertical.



**Figura 3.** Geológico Nacional (MAGNA, IGME) de España a escala 1:50.000 de las hojas 308 (Villafáfila) y 340 (Manganeses de la Lampreana) georreferenciadas a partir de Google Earth.

**A.** Materiales del Domino Olo de Sapo. Formación Olo de sapo (**PC-CA**).

**Formación Puebla (O<sub>12</sub><sup>1</sup>):** Filitas negras y cuarzo arenitas; **Formación Culebra (O<sub>12</sub><sup>2</sup>):** Cuarcitas en bancos; **Formación de San Pedro de las Herrerías (O<sub>2-3</sub>):** Cuarcitas filitas negras asalmonadas. Leyenda del Mapa Geológico Nacional (MAGNA, IGME) de España a escala 1:50.000 de la hoja 308 (Villafáfila).

**B.** Los materiales más antiguos del Cenozoicos, compuestos por la unidad marginal (T<sub>c11-12</sub><sup>Bc-Bc1</sup>): Arcillas arenosas, areniscas y conglomerados; la Facies de la Tierra de Campos (T<sub>c11-12</sub><sup>Bc-Bc1</sup>): Arcillas arenosas, areniscas, conglomerados con niveles carbonatados. Leyenda del Mapa Geológico Nacional (MAGNA, IGME) de España a escala. 1:50.000 de la hoja 308 (Villafáfila).

**C.** Materiales pertenecientes al Cuaternario, formado por Depósitos Fluviales: **Q<sub>2</sub>Al<sub>1</sub>** (Aluvial limo-arcilloso con cantos aislados); **Q<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>** (Conglomerados, arenas y arcillas, Aluvial (lecho actual); **Q<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>** (Conglomerados, arenas y arcillas. Aluvial (llanura de inundación) y Depósitos Lacustres: **Q<sub>2</sub>Li** (Limos salinos). Leyenda del Mapa Geológico Nacional (MAGNA, IGME) de España a escala. 1:50.000 de la hoja 308 (Villafáfila).

## 2.2. Geomorfología.

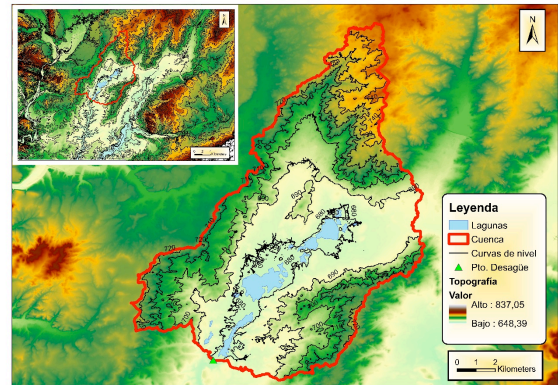
Las lagunas se encuentran en un valle de dirección Nordeste-Sudoeste que se desarrolla en el interfluvio situado entre los ríos Esla al oeste, y el Valderaduey al este. El valle está drenado por el arroyo Salado, en

cuya llanura de inundación se encuentran las lagunas, afluente del río Valderaduey, en el que desembocan las aguas de las lagunas. La cuenca de drenaje de las lagunas tiene su comienzo unos 5 km agua arriba de la Laguna Barrillos a la que llega través de arroyo de las Felipas.

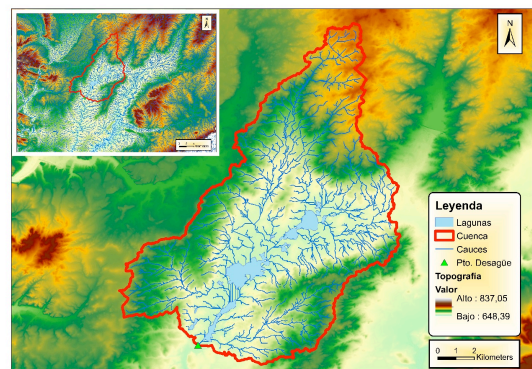
El conjunto de las Lagunas de Villafáfila no es una auténtica cuenca endorreica, ya que el complejo lagunar desagua a través del sector suroeste, por lo que es más acertado calificarla como cuenca semiendorreica. Estudios preliminares apoyan como factores fundamentales del desarrollo lagunar la escasa pendiente y la alta impermeabilidad del substrato (Cidón, 2016). Se encuentra limitada por suaves lomas de substrato cenozoico cuyas alturas no superan los 733 metros.

Las lagunas se desarrollan sobre la facies de Tierra de Campos, (Martín, 1988) presentan unas cumbres planas, ligeramente convexas en los bordes, limitadas por unas laderas de suave pendiente y perfil cóncavo, que conectan con el fondo de la depresión que se desarrolla entre las cotas de 670 y 680 (Fig.4).

Las Lagunas de Villafáfila, forman parte de dos sistemas morfogenéticos: el fluvial y el lacustre y debido a la interconexión entre ambos sistemas se puede hablar de un sistema fluvio-lacustre (Fig.5).



**Figura 4.** Topografía (MDT05-LIDAR) que constituye la cuenca de las Lagunas de Villafáfila.



**Figura 5.** Topografía (MDT05-LIDAR), cauces y punto de desagüe que constituye la cuenca de las Lagunas de Villafáfila.

Los elementos morfológicos fluviales, constituyen la red fluvial. Los principales cursos fluviales son el arroyo Salado, que se inicia con el arroyo de la Huerga al que se une el arroyo de la Viñas, y que tras conectar con las lagunas de la Salina Grande y de las Salinas, abandona la cuenca semiendorreica en dirección sur hasta confluir con el río Valderaduey. Hacia el este el arroyo de las Felipas conecta las lagunas de Paneras y Barrillos, uniéndose esta última con la Salina Grande. Más al sur el arroyo de las Vacas aporta aguas por el este a la laguna de las Salinas, mientras que el agua de las Agujas lo hace por el oeste (Fig. 1).

Los elementos morfológicos lacustres, ocupan el fondo de la depresión y constituyen fundamentalmente las lagunas. Estas se disponen alineadas, interconectadas por los cursos fluviales, y entre ellas cabe destacar las de Paneras, Bamba, Barrillos, el Triunfo, Salina Grande, las Salinas, San Pedro, Villardón, de la Fuente, la Rosa y la de Villarrín. Las primeras presentan morfologías subcircular mientras que las últimas son alargadas y estrechas, que se adaptan a la dirección principal del arroyo Salado en el área de desagüe. (Fig. 1)

La zona de las lagunas es prácticamente horizontal, con una pendiente casi inapreciable (0.003%). Las lagunas ejercen una regulación natural del caudal del arroyo Salado, en épocas de lluvias y durante las estaciones secas retienen la mayoría de las aguas, minimizando el caudal del río.

### 2.3. Hidrología e hidrogeología.

Las Lagunas de Villafáfila son unas lagunas alcalinas salinas, de origen subterráneo, causadas por descargas de acuíferos y su grado de mineralización es muy variable (1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  hasta más de 20000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en aguas hipersalinas).

Con respecto a la climatología se encuentra bajo el dominio de un clima continental, que engloba la mayor parte de la Península Ibérica y que se caracteriza por un clima mediterráneo, en esta región climática la diferencia estacional se agudiza con inviernos fríos y veranos calurosos y secos; esto es debido a los altos relieves montañosos que la

rodean y la aíslan del mar, caracterizando la zona con un clima extremo regional (Duch Martinez et al. 1995).

Las temperaturas medias anuales varían en un  $17.4^{\circ}\text{C}$ ; en el mes más frío del año, enero, se alcanza una temperatura media de  $3.8^{\circ}\text{C}$ ; en el mes más caluroso del año, julio, presentan un promedio de  $21.1^{\circ}\text{C}$ . Las bajas temperaturas nocturnas son un rasgo general en la zona durante todo el año, causando heladas desde otoño hasta bien entrada la primavera.

La precipitación media anual se encuentra en los 400 mm/año (Fig. 6); aunque es importante destacar la irregularidad pluviométrica interanual, con años muy húmedos y otros años de fuertes sequías. Las principales precipitaciones tienen lugar en la primavera y en el otoño, siendo común en esta región la acusada aridez del periodo estival. El invierno es la estación más larga, y se constituye como la estación climatológica primordial, ya que noviembre es el mes del año con mayores precipitaciones alcanzando los 49 mm, al contrario que en el verano, siendo julio es el mes más seco, con 13 mm (Clima, 2017).

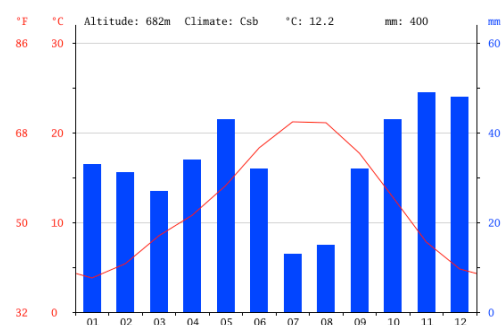
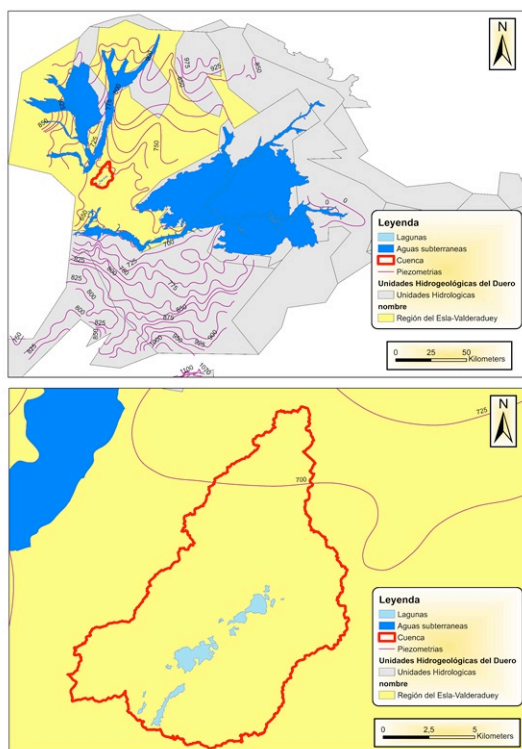


Figura 6. Climograma de la estación meteorológica de Villafáfila.

La reserva se encuentra vertebrada por el arroyo Salado, encontrándose en el centro de ésta el complejo lagunar. La cuenca del arroyo Salado en la reserva es de 16.800 ha y sus otras sub-cuencas vierten en los ríos Esla y Valderaduey (Rodríguez y Palacios, 2006) (**Fig. 5**).

En los pueblos de Villafáfila, Revellinos y Villarrín por debajo de la cota 695 se encuentra agua salada. En la zona se diferencian dos acuíferos principales, uno regional y otro municipal; el acuífero regional profundo no posee descarga natural directa a las lagunas; sin embargo, el acuífero superficial, con un nivel freático cercano a la superficie, se encuentra conectado directamente con las lagunas (Rodríguez y Palacios, 2006).



**Figura 7.** Unidades Hidrogeológicas de Catilla y León y la región del Esla-

Valderaduey a la pertenecen las Lagunas de Villafáfila.

El principal estudio publicado sobre la Hidrología de las Lagunas de Villafáfila se realizó por Fernández y Cabrera (1987). Estos autores señalan que el acuífero situado debajo de las Lagunas de Villafáfila corresponde a una zona de descarga de aguas subterráneas que han efectuado un largo recorrido. Estas aguas, que proceden del exterior de la cuenca de río Salado, son las responsables de la alta salinidad del acuífero y de las lagunas; presentan un alto contenido iónico en cloruros, calcio y magnesio, a lo cual es debido, en parte, a que circula por estratos arenosos y suelos aluviales ricos en estas sustancias. Además el acuífero se nutre de aguas de infiltración local reciente que se mezclan en las zonas de borde con las aguas de circulación regional.

En las lagunas podemos distinguir una zona de encharcamiento permanente, que varía en función de la pluviosidad del año, alrededor de la cual se encuentra una zona de encharcamiento estacional donde se producen precipitaciones de sales así como grietas de desecación en el sedimento lutítico expuesto.

El agua sufre una importante evaporación, reforzada por la escasa profundidad de las lagunas, lo cual lleva a una mayor concentración de sales en el agua; como consecuencia, las sales se van acumulando sobre el suelo, que con el tiempo va adquiriendo un carácter extremadamente salino, como lo demuestran las especies vegetales, algunas endémicas, que crecen

sobre ellos. Estas altas concentraciones iónicas se localizan en el ángulo sureste de las hojas 308 de Villafáfila, que constituye una zona deprimida que se extiende hacia el suroeste de las hojas 340 de Manganés de la Lampreana. La mayor proporción iónica corresponde a los cloruros y sulfatos (Martín y Piles 1982; Cidón, 2016).

Con los datos proporcionados por la Confederación Hidrográfica y mediante el programa DIAGRAMMES<sup>©</sup> se comprobó que la composición de las aguas subterráneas de la cuenca de la Lagunas de Villafáfila es también rica en cloruros y sulfatos, al igual que el agua de las lagunas. Mediante la representación en diagramas de Piper (**Fig. 8 de los Anexos**) y de Stiff (**Fig. 9 de los anexos**) se puede observar que la mayoría de aguas de los diferentes puntos de muestreo se concentran en el vértice derecho del triángulo de cationes y aniones, lo cual indica el carácter clorurado y sódico de las mismas; en el rombo de dichos diagramas los puntos se concentran en el área de sulfatadas-cloruradas-sódicas. En el diagrama de Stiff, por otro lado, se ve como la mayoría de los polígonos presentan un gran contraste entre altas concentraciones en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Cl}^-$  con respecto a la concentración en el resto de elementos, propio de una típica concentración de salmuera. También se puede observar como los puntos más alejados de la cuenca son los que menos contenidos en estos elementos presentan como las muestras tomadas en Barcial del Barco, Cerecinos de Campos, Granja de Moreruela,...

### 3. METODOLOGÍA

Las herramientas y las técnicas utilizadas mediante Sistemas de Información geográfica (SIG) han permitido integrar los datos de campo obtenidos en un soporte cartográfico digital georreferenciado, a partir de la creación de una geodatabase que incluye datos vectoriales y raster; estos archivos raster, aportan información altitudinal, de forma que cada pixel presenta un valor digital que corresponde con la cota del terreno. El software utilizado ha sido el *ArcGis v10.3.1*, mediante los programas *ArcCatalogo* y *Arcmap*. Algunas de las extensiones y scripts utilizados son el *Spatial Analyst* y *3D Analyst*. Esto nos brinda múltiples aplicaciones de trabajo que hemos utilizado para el cálculo de la red de drenaje, las divisorias de aguas, digitalización del terreno,... que nos van a definir la cuenca hidrológica de la Reserva Natural de Villafáfila, detallada a continuación:

1. Análisis del contexto geográfico y geológico de la zona de estudio. Para ello se ha generado una recopilación de ortofotografías aéreas del plan nacional de ortofotografía aérea (PNOA) en formato raster, así como la cartografía correspondiente al Mapa Topográfico Nacional (MTN) en formato raster a escala 1/25.000 (**Fig. 1**).
2. Análisis y tratamiento digital de geodatabase para la digitalización de las lagunas y de algunas características del terreno de la zona de estudio. Para ello se han recopilado ortofotografías aéreas del

plan nacional de ortofotografía aérea PNOA en formato raster y datos Lidar (Laser Imaging Detection and Ranging) en formato *.las*, con una resolución espacial de 5 metros de pixel.

Georreferenciación de las lagunas y los puntos de muestreo con el sistema de coordenadas proyectadas UTM: **ETRS 1989 UTM Zone 30N**.

3. Análisis geoespacial de la red de drenaje y cálculos paramétricos hidrológicos: divisoria de aguas, cuenca hidrológica (trazado, superficie, pendientes, orientaciones...) (**Fig. 4**).

4. Configuración previa de la red de drenaje y de la cuenca hidrográfica (**Fig. 5**).

Cálculo y cartografía de las direcciones de flujo, la cual genera una capa desde cada punto dependiendo de las cotas respectivas.

Cálculo y cartografía de los flujos acumulados, la cual genera una capa en la que asigna a cada punto el número de otros puntos desde los que llega el flujo. Esos puntos son los puntos de mayor acumulación.

Cálculo de los cauces en función de la mayor acumulación de agua.

Generación de la cuenca de drenaje mediante el trazado de la divisoria de agua. Para ello hay que indicar el punto de desagüe de la cuenca.

Por otro lado, se lleva a cabo un estudio que partirá de información puntual de analíticas de nitratos, proporcionada por la Confederación Hidrográfica, recogida en las

aguas subterráneas de los distintos puntos de muestreo de las proximidades de la cuenca de interés de las Lagunas de Villafáfila; la cual ha sido definida anteriormente mediante capas poligonales e información asesorada sobre el relieve de la zona de estudio.

En el análisis del estudio planteado se exige la obtención de mapas de distribución de nitratos de dicha cuenca y también obtendremos mapas de distribución de multitud de métodos estadísticos empleados para el análisis temporal de los nitratos; por lo tanto la metodología de GIS se basará en la obtención de la información estadística temporal del contenido en nitratos en los puntos de muestreo y su posterior análisis de distribución de estas estadísticas por separado.

En primer lugar el estudio del análisis de la vulnerabilidad de la cuenca de las Lagunas de Villafáfila se basa en los datos de nitratos en mg/L de agua subterráneas, de la primavera de cuatro años (2007, 2009, 2012 y 2014), en forma de cuatro tablas Excel con toda la información relativa al contenido en nitratos de cada punto de muestreo, que se exportarán y convertirán en formatos *Shapefile*; para poder trabajar con ellas en forma de capa en el ArcGIS, y se tomarán como datos auxiliares; el área de estudio, la Cuenca Hidrológica de las Laguna de Villafáfila (una capa de información en formato *Shapefile* poligonal que delimita el área de estudio), MDT (Modelo Digital Terrestre) y el empleo de extensiones de carácter especializado como *Editor*, *Geoestadistical Analyst*, *3D Analyst* y *Spatial Analyst*.

Por lo tanto ahora la información que disponemos sobre el contenido de nitratos (mg/L) en el agua subterránea de los diferentes puntos de muestreo, se encuentra en forma de tabla en la que las filas corresponden a cada punto de muestreo. Los cuales aportan su localización, coordenadas UTM de longitud (Eje X) y latitud (Eje Y), municipio donde se encuentran, nombre de la muestra, fecha de obtención de la muestra y año (**Fig. 10 de los Anexos**).

A continuación, se detalla la aplicación de las herramientas geostatísticas al análisis de la distribución del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  en la cuenca de las Lagunas de Villafáfila.

1. Análisis de interpolación, donde se localiza sobre el mapa los puntos de muestreo a los que corresponden los datos de  $\text{NO}^{-3}$ , introduciendo los campos correspondientes al Eje X (de longitud) y Eje Y (de latitud). Una vez georreferenciada toda la información del mapa (*ETRS 1989 UTM Zone 30N*), se puede ver como los puntos de muestreo aparecen en los mapas adecuadamente situados (**Fig. 16**).
2. Construcción de un mapa de densidad, de este modo se podrá determinar aquellas áreas del mapa en las que la concentración de nitrato es mayor y las áreas con menor concentración. Para ello se usarán dos métodos, para comparar y escoger el que proporcione mejores resultados:

El primer mapa de densidad que se generó fue por el *método Kernel Density*, en el cual no se estableció ningún campo en el que basar el análisis de densidad, ya que se trata de un análisis meramente geométrico de distribución de los puntos de muestreo que se ajustan a la superficie curva sobre cada punto, donde el valor de superficie es más alto en la ubicación del punto y disminuye a medida que aumenta la distancia desde el punto (Silverman, 1986) (**Fig. 17**).

En el siguiente mapa de densidad, se utilizó la herramienta de densidad de puntos (*Point Density*), estableciendo los mismos condicionantes que en el caso de análisis de densidad Kernel, para su posterior comparación. Pero este método analiza el solape de buffers entorno a los puntos con un radio igual a la búsqueda, generando un resultado más imperfecto que la función de Kernel (Silverman, 1986).

Análisis del patrón de distribución direccional de los valores de  $\text{NO}^{-3}$  de los puntos de muestreo, que representa sobre el mapa una elipse que marca la desviación estándar en la distribución de dichos puntos. La elipse permite ver si la distribución de las entidades se elonga y si tienen una orientación particular (**Fig. 17**). Al calcular la elipse de desviación estándar mediante dicha fórmula (**Fig. 11**) hace que la tendencia sea aún más clara (Mitchell, 2005).

$$SDE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n}}$$

$$SDE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n}}$$

**Figura 11.** Fórmula de la Elipse de Desviación Estándar; Donde  $x_i$  y  $y_i$  son las coordenadas para los puntos  $i$ ,  $\bar{X}$  y  $\bar{Y}$  representa el centro medio para los puntos y  $n$  es igual al número total de puntos.

Utilización de herramientas de autocorrelación espacial, Spatial autocorrelation (Morans I), a partir de la cual se obtendrá un informe del análisis HTML (**Fig. 18**) y se podrá averiguar si los valores de  $\text{NO}^3$  se distribuyen de forma dispersa, aleatoria o si por el contrario los valores se concentran en ciertas áreas, de manera que habrá zonas definidas como más vulnerables y otras menos vulnerables a la contaminación por  $\text{NO}^3$  (Griffith, 1987; Mitchell, 2005; Getis, y Ord, 1992).

3. Análisis exploratorio del contenido de nitratos en la zona de estudio, permite examinar los datos desde varias perspectivas proporcionando una comprensión más profunda del fenómeno que estamos investigado y nos permitirá tomar mejores decisiones en las operaciones de interpolación posteriores, aporta gran cantidad de información de los datos de partida (estadísticos descriptivos, análisis de normalidad, ...), mediante: Histogramas, Gráficos QQ, Análisis de Tendencias, Mapas

Vornio y Gráficos de Semivariograma/Covarianza.

Comprobación de que los datos, en los que se van basar los métodos de análisis geoestadístico, presenten un modelo de distribución normal, mediante el uso de dos herramientas: el Histograma (**Fig. 19**).

el Grafico QQ (**Fig. 20**).

Realización de un estudio previo de la distribución del contenido en  $\text{NO}^3$  en el área de estudio mediante herramientas de análisis exploratorio, proporcionando una mejor comprensión de los datos con los que estamos trabajando mediante:

La realización de un análisis de tendencia (**Fig.21**), refleja la distribución espacial de los valores en un gráfico, representando los ejes X e Y: las coordenadas de los puntos de muestreo y en el eje Z: los valores de la variable  $\text{NO}^3$ . Girando el grafico se puede enfocar la proyección sobre el plano XZ o YZ de forma ortogonal, y ver como los valores de coordenadas se distribuyen (Mitchell, 2005).

La realización de un diagrama de Voroni, asigna a cada punto como área de influencia la zona que se encuentra más cerca de él que de otro punto cualquiera de la capa. Por ello, en el análisis, se usó como capa de corte la cuenca de las Lagunas de Villafáfila, ya que es el área de drenaje sobre la que se está



trabajando y de este modo permite seleccionar, mediante una capa poligonal, el área de la cual interesa disponer la información (Mitchell, 2005).

Diagrama de Voroni, escogiendo como tipo de variable el valor medio (*Type: Mean*), utiliza el valor obtenido a partir de los puntos del entorno y se supone que en cada área del mapa no se toma el valor del punto correspondiente a la misma, sino que lo calcula como media de los valores de  $\text{NO}^{-3}$  de los puntos más cercanos del entorno (**Fig. 22 A**).

Diagrama de Voroni, escogiendo como tipo de variable la desviación estándar (*Type: StDev*), refleja en cada área del mapa el valor de la desviación estándar de la muestra constituida por los puntos más cercanos al entorno. Dando una cierta orientación sobre las áreas en las que podemos esperar un mayor riesgo de error al realizar las interpolaciones debido a una mayor variabilidad del valor de  $\text{NO}^{-3}$  (**Fig. 22 B**).

La base de los métodos geoestadísticos de interpolación está constituida por los conceptos de semivariograma y covarianza, ya que se supone que  $Z$  ( $s_i$ ) denota el valor que toma la variable analizada, en este caso el contenido de  $\text{NO}^{-3}$  en una localización  $i$ .

El semivariograma para un par  $(i, j)$  se obtendría de la expresión:

$$0,5*(Z(S_i)-Z(S_j))^2$$

que, al ser una suma de valores al cuadrado, tiene siempre valores positivos (**Fig. 23**).

La covarianza (**Fig. 23**) será el producto cruzado de diferencias respecto al valor medio, donde  $Z$  es el valor medio de la muestra:

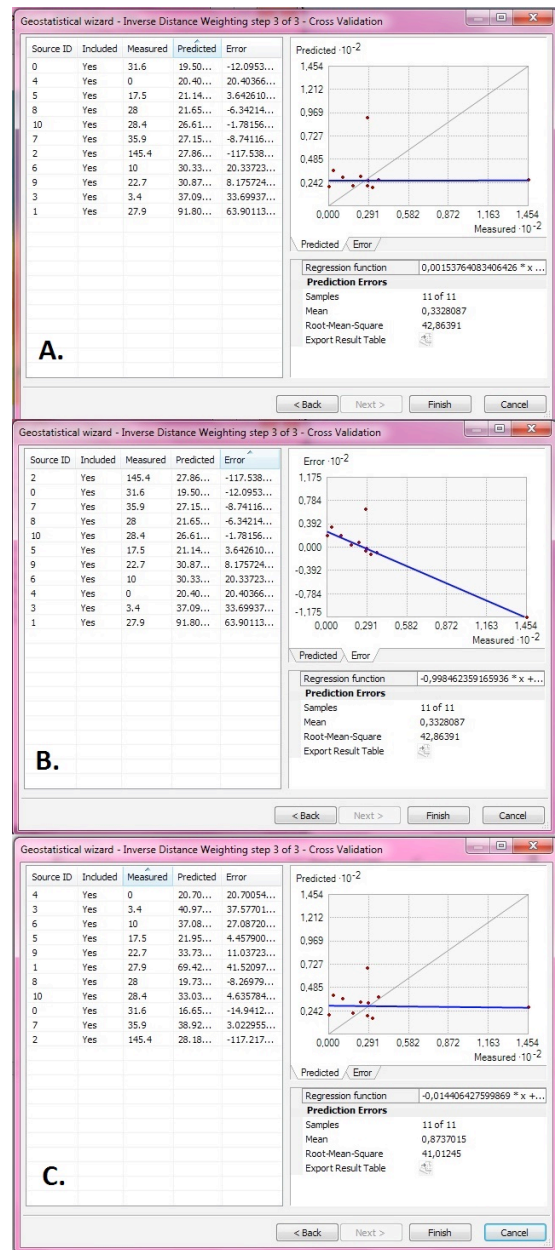
$$(Z(S_i)-Z)(Z(S_j)-Z)^2$$

Puede tener resultados negativos, en el caso de multiplicar valores de  $X$  por encima de la media (+) por valores de  $Y$  por debajo de la misma (-), por lo que los valores positivos son aquellos que presentan una relación directa entre las variables, mientras que en los valores negativos la reacción es inversa; por otro lado, son los valores igual a cero los que no presentan ninguna relación entre las variables (Fortis et al. 2009).

4. Obtención de mapas de distribución del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  mediante métodos determinísticos de interpolación donde se crean superficies a partir de la información puntual inicial, basándose en los siguientes criterios:

La extensión de la similitud en los valores se basa en el método de la interpolación ponderada por medio del inverso de la distancia (IDW) (**Fig. 24**), se trata de un método que permite realizar un análisis mucho más completo y flexible, adecuado a

la situación que se nos plantea (Lu y Wong, 2008; Wu et al. 2005), y asume que los elementos que se encuentran más cerca entre ellos tendrán valores más parecidos que los elementos más alejados (IDW, 2007). De esta manera cada punto donde se ha efectuado una medida tendrá una influencia local que disminuye con la distancia, por lo tanto el valor de  $NO^{-3}$  en cada punto del mapa se obtendrá como media ponderada de los puntos medidos en su entorno, utilizándose como factor de ponderación el inverso de la distancia elevado a una potencia (Watson, 1985). Se incluirá, un total de 5 puntos en cada sector y un mínimo de 2 puntos por sector. En la ventana de valoración del modelo (**Fig. 12 A**) se observa gráficamente la relación entre los valores medidos (Eje de Abscisas) y los valores predichos (Eje de Ordenadas); además hay una recta de regresión estimada para la nube de puntos del gráfico. Cuanto más se aproxime la recta a la diagonal que cruza el gráfico menor será el error de interpolación, ya que la coincidencia total entre valores medidos y predichos se encontraría en la recta  $Y = X$ .



**Figura 12.** Ventana de valoración del modelo inverso de la distancia (IDW). **A.** Ventana de predicción. **B.** Ventana de error. **C.** Ventana de predicción después del proceso de optimización.

En la pestaña *Error* (**Fig. 12 B**) existe otro gráfico con los errores de medición (Eje de Ordenadas) expresados en función de los valores medidos (Eje de Abscisas), donde también encontramos el valor medio de los

errores (*Mean: 0,3328087*) y el valor medio cuadrático (*Root-Mean-Square: 42,86391*).

Es posible mejorar la resolución de este error mediante la modificación de la potencia, ya que se puede optimizar el valor de esta para reducir al máximo el valor del error (*Optimize power value*), el cual modificara la potencia y se ve como el error se reduce de *Root-Mean-Square: 42,86391* a *Root-Mean-Square: 41,01245* (**Fig. 12 C**).

El grado de suavizado de la superficie a generar se divide a su vez en dos grupos de técnicas globales o técnicas locales:

Las técnicas Globales calculan las predicciones utilizando todo el conjunto de datos disponibles:

El método de interpolación polinómica global (GPI) se ajusta a una superficie suavizada, que se define por una función matemática polinómica en base a los valores en los puntos de entrada (GPI, 2017), dicha superficie cambia de forma gradual y captura el patrón de distribución de los datos en una amplia escala, obviando posibles patrones de variación que se produzcan a pequeña escala. Para obtener la función polinómica se utiliza como referencia todos los valores de los puntos que se aportan como dato. Como primer paso escogido el grado de función polinómica y observado cómo se modifica dicha superficie, ya que cuanto mayor grado de polinomio, un mayor nivel de detalle (Davis, 2002). Hemos usado dos grados: *Power: 1* (**Fig. 25**) y *Power: 2* (**Fig. 26**).

Las técnicas Locales realizan las predicciones a partir de puntos medidos dentro de

“vecindarios”, áreas más pequeñas dentro del área de estudio, de mayor superficie.

El método de interpolación polinómica local (LPI) aplica varios polinomios para representar el total de superficie, uno distinto para cada uno de los vecindarios de búsqueda que se utilicen (LPI, 2017). Por lo tanto el valor de cada celda de la superficie de salida lo tomamos de la fórmula polinómica que se obtendrá a partir de los puntos contenidos en el vecindario correspondiente a dicha celda. Las celdas próximas serán calculadas por formulas polinómicas muy similares, cuando el entorno de búsqueda es parecido, o incluso iguales, si el entorno de búsqueda coincide (Davis, 2002). En este método fueron 2 las funciones polinómicas que se utilizaron (*Power: 2*) y se cambió la función Kernel para basar la búsqueda en un modelo de tipo Gaussiano (*Kernel function: Gauss*) (**Fig. 27**).

Las funciones de base radial (RBF) comprenden un amplio grupo de interpoladores exactos y locales, que emplean una ecuación de base dependiente de la distancia entre el punto interpolado y los puntos muestrales vecinos, permitiendo calcular superficies suavizadas a partir de estos puntos (RBF, 2017). En este tipo de métodos la superficie de interpolación debe pasar por cada uno de los puntos de la capa de datos original, cada una de las funciones de base radial tiene una forma diferente y origina una superficie de interpolación propia (Echeverri et al. 2004) (**Fig. 28**).

Los resultados obtenidos son muy similares a los obtenidos en el método IDW. Debido a

que las herramientas de interpolación IDW y RBF son consideradas métodos de interpolación determinísticos porque están basados directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas especificadas que determinan la suavidad de la superficie resultante (Burrough, 1986).

5. Determinar el tamaño (TI) y el número (NI) del intervalo en el estudio geoestadístico, para los cuales tenemos que conocer la distancia máxima entre puntos, así como la distancia media entre puntos cercanos y deberán cumplir dos condiciones:

La mitad de la distancia entre puntos ( $D_{MAX}/2$ ) debe ser aproximadamente igual al producto del número de intervalos **NI** por el tamaño de los mismos.  $D_{MAX}/2 = TI * NI$

La distancia media entre vecinos próximos ( $D_{MED}$ ) multiplicada por dos debe ser menor o igual al tamaño del intervalo. De esta manera se garantiza que tenemos una probabilidad de al menos 95% de encontrarnos con tres puntos de cada intervalo.  $2 * D_{MED} \leq TI$ .

Para obtener la distancia máxima entre cada punto se utilizó una herramienta, la distancia entre puntos, la cual generó una tabla en la que se muestra la distancia entre cada punto de la capa de entrada (Input Features) con respecto a todos los puntos de una capa de elementos cercanos (Near Features). Por lo

tanto, no se obtiene la distancia al punto más cercano, sino las distancias a todos los puntos, en una tabla de salida y, de este modo, ya se pueden calcular los valores del tamaño y el número de intervalos (TI y NI) (**Fig. 13 de los Anexos**):

Para la primavera del 2007 el valor medio  $D_{MED} = \text{Mean}: 7510$  m por lo tanto el tamaño del intervalo será  $2 * D_{MED} \leq TI = TI: 15020$  m. A partir del valor del tamaño del intervalo y la distancia máxima  $D_{MAX} = \text{Maximun}: 37837$  m entre los puntos se calcula el número del intervalo será  $NI = D_{MAX}/2 * TI = NI: 1,259$  m

Para la primavera del 2009 el valor medio  $D_{MED} = \text{Mean}: 7510$  m por lo tanto el tamaño del intervalo será  $2 * D_{MED} \leq TI = TI: 15020$  m. A partir del valor del tamaño del intervalo y la distancia máxima  $D_{MAX} = \text{Maximun}: 37837$  m entre los puntos se calcula el número del intervalo será  $NI = D_{MAX}/2 * TI = NI: 1,259$  m

Para la primavera del 2012 el valor medio  $D_{MED} = \text{Mean}: 8276$  m por lo tanto el tamaño del intervalo será  $2 * D_{MED} \leq TI = TI: 16552$  m. A partir del valor del tamaño del intervalo y la distancia máxima  $D_{MAX} = \text{Maximun}: 37837$  m entre los puntos se calcula el número del intervalo será  $NI = D_{MAX}/2 * TI = NI: 1,142$  m

Para la primavera del 2014 el valor medio  $D_{MED} = \text{Mean}: 8330$  m por lo tanto el tamaño del intervalo será  $2 * D_{MED} \leq TI = TI: 16660$  m. A partir del valor del tamaño del intervalo y la distancia máxima  $D_{MAX} = \text{Maximun}: 37837$  m entre los puntos se calcula el

número del intervalo será  $NI = D_{MAX}/2 * TI =$   
NI: 1,135 m

6. Obtención de mapas de distribución del contenido en  $NO^3$  mediante métodos geoestadísticos de interpolación, entre los que destacan el grupo de los Kriging, ya que no solo ofrecen predicciones y superficies de respuesta, sino también mapas de probabilidades y cuantiles mediante el uso de semivariogramas (Johnston et al. 2001).

El método (*Krigeado*) se basa en modelos matemáticos y estadísticos. En el Krigeado existe cierta probabilidad a las predicciones ya que los valores no son completamente predecibles; por ello no presentan como único objetivo la predicción de valores, sino también la estimación del posible error asociado a esa predicción (Villatoro et al, 2008). Estos métodos de Krigeado se basan en la autorregulación espacial, ya que indica que existe una correlación entre los valores de la variable en una localización con respecto a los valores de la misma en otras localizaciones vecinas; dicha correlación disminuye con la distancia (Royle et al. 1981). Para ello se utilizó el semivariograma una herramienta capaz de expresar esa información de forma resumida a partir de los datos disponibles.

Obtención de mapas de distribución del contenido en  $NO^3$  mediante Krigeado Ordinario (**Fig. 29**), se basa en el modelo:

$$Z(x) = \mu(s) + \xi(s)$$

Donde el valor medio  $\mu$  es una constante desconocida y se estimaba  $\mu$ , y por lo tanto también se estimaba  $\xi(s)$  (Villatoro et al. 2008); por lo que se plantea si es o no realmente razonable asumir una media constante. Sin embargo como método de predicción aporta una flexibilidad enorme.

Para el análisis de la distribución del contenido de  $NO^3$  se elaboró un mapa de predicción (*Prediction Map*), donde se minimizó el error cuadrático, el error estándar medio pero, sobre todo, el error medio cuadrático estandarizado, ya que debe aproximarse lo más posible a la unidad (Oliver, 1990).

Por ello en el sumario de índices de error (**Fig. 14**) se puede ver que en este caso, tanto para la primavera 2007, 2009, 2012 como la primavera 2014, los errores estándar medios son inferiores a los errores medio cuadráticos, por lo tanto se está sobreestimando la viabilidad de las predicciones, y el error medio cuadrático estandarizado es inferior a uno (Oliver, M. A. 1990).

Obtención de mapas de distribución del contenido en  $NO^3$  mediante Krigeado simple (**Fig. 30**), asume el modelo:

$$Z(x) = \mu + \xi(s).$$

Donde  $\mu$  es una constante conocida. El hecho de asumir que conocemos el valor de  $\mu$  exactamente implica que también se conoce con exactitud el valor de  $\xi(s)$  en los puntos de medición (Villatoro et al. 2008); aunque la suposición de conocer exactamente el valor medio de  $\mu$  es poco realista. Donde al igual que en el Krigeado ordinario se minimizó el

error cuadrático, el error estándar medio pero sobre todo el error medio cuadrático estandarizado, ya que debe aproximarse lo más posible a la unidad (Oliver, M. A. 1990). Al igual que en el método Krigeado ordinario en sumario de índices de error (**Fig. 15**) se ve como el error medio cuadrático y el error estándar medio son muy parecidos a los obtenidos con el Krigeado ordinario, por ello, el error medio cuadrático estandarizado (*Roof-Mean-Square-Standardized*) es también muy próximo a 1.

Regression function	0,0136480952170988 *...	Regression function	-0,164333797999338 *...
<b>Prediction Errors</b>		<b>Prediction Errors</b>	
Samples	11 of 11	Samples	11 of 11
Mean	2,14626	Mean	0,6956335
Root-Mean-Square	47,56601	Root-Mean-Square	20,50692
Mean Standardized	0,01094592	Mean Standardized	0,002372558
Root-Mean-Square Stan...	0,8150945	Root-Mean-Square Stan...	0,4088354
Average Standard Error	53,34416	Average Standard Error	53,34416
Regression function	-0,267438081516282 *...	Regression function	-0,192239391813666 *...
<b>Prediction Errors</b>		<b>Prediction Errors</b>	
Samples	10 of 10	Samples	9 of 9
Mean	-2,478457	Mean	0,3913816
Root-Mean-Square	22,47436	Root-Mean-Square	35,74173
Mean Standardized	-0,02087132	Mean Standardized	0,003053409
Root-Mean-Square Stan...	0,4395408	Root-Mean-Square Stan...	0,8798912824491002
Average Standard Error	53,65166	Average Standard Error	54,53052

**Figura 14.** Sumario de índices de error del Krigeado Ordinario: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

Regression function	0,0622225045776137 *...	Regression function	-0,140922380100739 *...
<b>Prediction Errors</b>		<b>Prediction Errors</b>	
Samples	11 of 11	Samples	11 of 11
Mean	4,037959	Mean	-1,413215
Root-Mean-Square	40,7276	Root-Mean-Square	19,50436
Mean Standardized	0,03697755	Mean Standardized	-0,06612584
Root-Mean-Square Stan...	1,103067	Root-Mean-Square Stan...	1,140013
Average Standard Error	38,03738	Average Standard Error	16,70708
Regression function	0,0765551415174304 *...	Regression function	-0,0389654397689327 *...
<b>Prediction Errors</b>		<b>Prediction Errors</b>	
Samples	10 of 10	Samples	9 of 9
Mean	2,120158	Mean	1,429674
Root-Mean-Square	18,44369	Root-Mean-Square	28,25637
Mean Standardized	0,01139602	Mean Standardized	0,008815501
Root-Mean-Square Stan...	0,7071472	Root-Mean-Square Stan...	1,016394
Average Standard Error	33,83831	Average Standard Error	29,11207

**Figura 15.** Sumario de índices de error del Krigeado Simple: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

Una vez realizados todos los mapas se puede observar como el mapa del método IDW y RBF son muy similares al de Kriging ordinario (Burrough y McDonnell 1998).

Han sido diversos los autores que han comparado el interpolador Kriging con el IDW (Gotway et al. 1996, Kravchenko y Bullock 1999, Mueller et al. 2001, Schloeder et al. 2001, Kravchenko 2003, Mueller et al. 2004) y asumen que las predicciones son una combinación lineal de los datos, como lo muestra la ecuación (Gotway et al.1996, Schloeder et al. 2001).

$$\hat{z}(s_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i) \quad i=1, \dots, n$$

Donde  $\hat{z}(s_o)$  es el valor estimado en el punto interpolado  $S_o$ ;  $n$  es el número de observaciones vecinas usadas para la estimación y  $i$  es el peso dado al valor observado  $z(s_i)$  en las cercanías del valor  $S_o$  (Lozano et al. 2004). Este último parámetro hace la diferencia entre Kriging y el IDW.

Finalmente es el método Kriging el cual proporciona un análisis más elaborado y con un fundamento estadístico, por lo que este método es el elegido, pero cuando el distanciamiento es muy grande los semivariogramas no son posibles de obtener, entonces el Kriging deja de ser una opción y comparativamente el IDW se perfila como el mejor.

7. Determinación de fuentes de contaminación indirecta y establecimiento de medidas correctoras.

Verificación y selección final del método geoestadístico mediante la obtención de mapas de error (**Fig. 31**) asociados a cada mapa de predicción generado proporcionan la distribución del error

estándar medido en toda la zona en que se disponen datos de  $\text{NO}^3$  y finalmente se obtuvo un sumario de información relativa a esos errores, delimitada al área de estudio que nos ayudara a elegir el método más adecuado.

- a. Mapas de cuantiles (**Fig. 32**).
- b. Mapas de probabilidad (**Fig. 33**).

#### **4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN**

Mediante la aplicación de herramientas geostatísticas de interpolación espacial de GIS se ha podido generar mapas Ráster de predicción, para todo el área de estudio denominada Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, de una variable denominada: contenidos en  $\text{NO}^3$  a partir de información localizada en los determinados puntos de muestreo (Barcial del Barco, Belver de los Montes, Cañizo, Cerecinos de Campos, Fuentes de Ropel, Granja de Morerueta, Manganeses de la Lampreana, Pajares de la Lampreana, San Agustín del Pozo, Villafáfila y Villarrín de Campos). Dichas herramientas se aplicaron al análisis de la distribución de la contaminación por nitratos y se obtuvieron mapas de predicción a partir de los datos de agua subterránea proporcionados por la Confederación Hidrográfica de la estación de primavera de los años 2007, 2009, 2012 y 2014.

Por lo tanto en este trabajo se estudia la vulnerabilidad de la cuenca ante el contenido

de nitratos en sus aguas subterráneas; ya que, como se ha mencionado, la zona de estudio pertenece a las zonas vulnerables de ser contaminadas de las aguas por nitratos procedentes de fuentes de origen agrícola y ganadero de Castilla y León: 12. Zona vulnerable **VILLAFÁFILA ZV-VF**, definida en el en el anexo I del Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero y, para dicho análisis, se exige la obtención de mapas de distribución de nitratos de dicha cuenca.

A continuación se detallan e interpretan los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología de GIS, que han sido empleados como métodos de interpolación espacial en base a los datos obtenidos de nitratos en los puntos de muestreo de la zona de estudio (la cuenca de las Lagunas de Villafáfila), para la obtención de mapas de distribución de multitud de estadísticos empleados en el análisis temporal de los nitratos.

1. En la figura 16 se representa el análisis de interpolación, donde se localizan los puntos de muestreo a los que corresponden los datos de  $\text{NO}^3$  y georreferenciados mediante el sistema de referencia UTM, y se observa como los puntos de muestreo están distribuidos alrededor de la cuenca de estudio y como cada uno de ellos se encuentra en un municipio de la zona de Tierra de Campos.

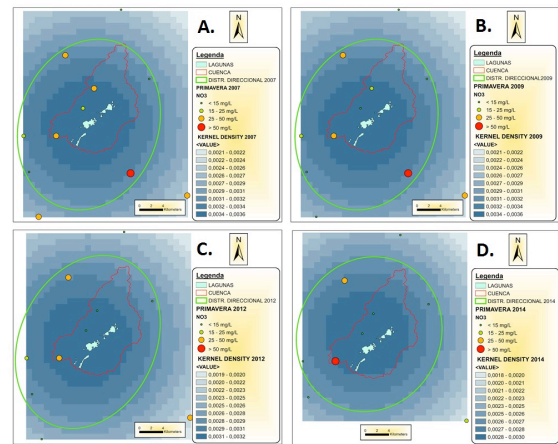


**Figura 16.** Ortofoto (PNOA\_MA\_OF\_ETRS89\_HU30) de Cuenca de las Lagunas de Villafáfila en función de los puntos de muestreo del contenido en  $\text{NO}^3$  en las diferentes estaciones y años de toma.

2. En el mapa de densidad por el método *Kernel Density* (Fig. 17) y tras la observación de los mapas generados por los dos métodos se eligió el método Kernel, debido a que la herramienta *Point Density* genera un resultado más imperfecto que la función Kernel; también se representa el patrón de distribución direccional de los puntos de muestreo, que refleja como una la elipse marca la desviación estándar en la distribución de dichos puntos.

Gracias a la simbología del contenido en  $\text{NO}^3$  basada en las características del color y el tamaño de los elementos puntuales, se ha conseguido destacar las diferencias de concentración entre los puntos de muestreo,

de este modo se obtiene una visualización más clara sobre el mapa de los distintos niveles de  $\text{NO}^3$ ; también se puede apreciar como la localización de la cuenca de estudio es bastante favorable, ya que coincide en gran medida con la elipse. Al quedar la mayor parte del área de la cuenca dentro de los límites de la desviación estándar de la distribución de los puntos de muestreo, se supone por tanto, que de este modo se van a eliminar los defectos de borde.

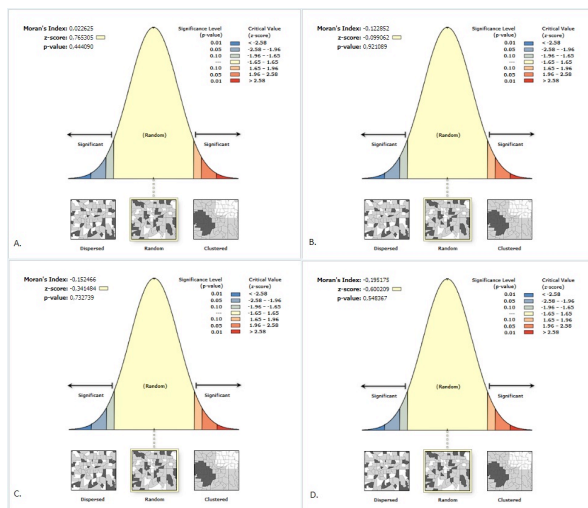


**Figura 17.** Mapa de densidad de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en  $\text{NO}^3$  mediante el Método Kernel Density para: A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014.

Mediante la herramienta de autocorrelación espacial, Spatial autocorrelation (Morans I), se obtuvo un informe del análisis HTML (Fig.18) en el cual la probabilidad dice que este resultado es de una situación aleatoria menor al 1%. Aunque como ya se observaba en el resultado del mapa de densidad del método Kernel (Fig. 17) los puntos de muestreo en algunos casos siguen una



tendencia progresiva clara, ya que los altos valores de  $\text{NO}^3$  se concentran en el punto de desagüe de la cuenca, incrementando su valor a medida que transcurren los años. Por el contrario, no siempre los bajos valores de  $\text{NO}^3$  se encuentran fuera del área de la cuenca de estudio, por lo que de este modo nos indica una tendencia aleatoria clara.



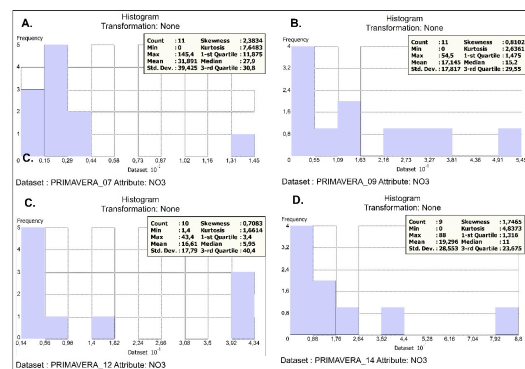
**Figura 18.** Spatial autocorrelation (Morans I): de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en  $\text{NO}^3$  para: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

3. El análisis exploratorio es la fase previa a los procesos de interpolación:

Los métodos de análisis geoestadístico requieren que los datos en los que van a basar presenten un modelo de distribución normal. Este criterio se comprobó mediante estas dos herramientas:

En el análisis mediante el Histograma (**Fig. 19**) de los datos de  $\text{NO}^3$  se obtuvo una primera impresión de cómo se distribuyen sus valores. Los Histogramas generados

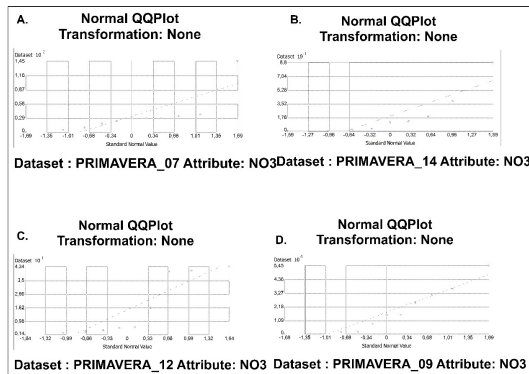
parecen que se ajustan a la distribución normal, ya que para corroborar este criterio basta con comparar los estadísticos de la media y la mediana, debido a que en distribuciones normales adquieren valores parecidos y se puede observar como todos los histogramas generados presentan una similitud entre ambos estadísticos bastante aceptable. Por otro lado se observa como los valores más altos del rango de  $\text{NO}^3$  se encuentran situados al oeste y los valores más bajos se distribuyen homogéneamente sobre el eje, por lo que se deduce que hay un fuerte gradiente de oeste a este.



**Figura 19.** Histograma de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en  $\text{NO}^3$  para: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

En el análisis mediante Gráfico QQ (**Fig. 20**) se representan los cuantiles de distribución de la variable (eje de ordenadas) respecto a los cuantiles de la distribución normal, pero se puede ver como la variable no coincide con la distribución de prueba, los puntos no se concentrarán en torno a una línea recta, es decir, los puntos no se ajustan bien al entorno

de la línea recta; aun así, se puede afirmar que los datos se distribuyen normalmente, debido, como se puede observar en los datos, se alejan de esta línea más en unos años que en otros, pero es cierto que cerca del centro no se alejan demasiado. Por lo tanto, su distribución es aceptada como normal.

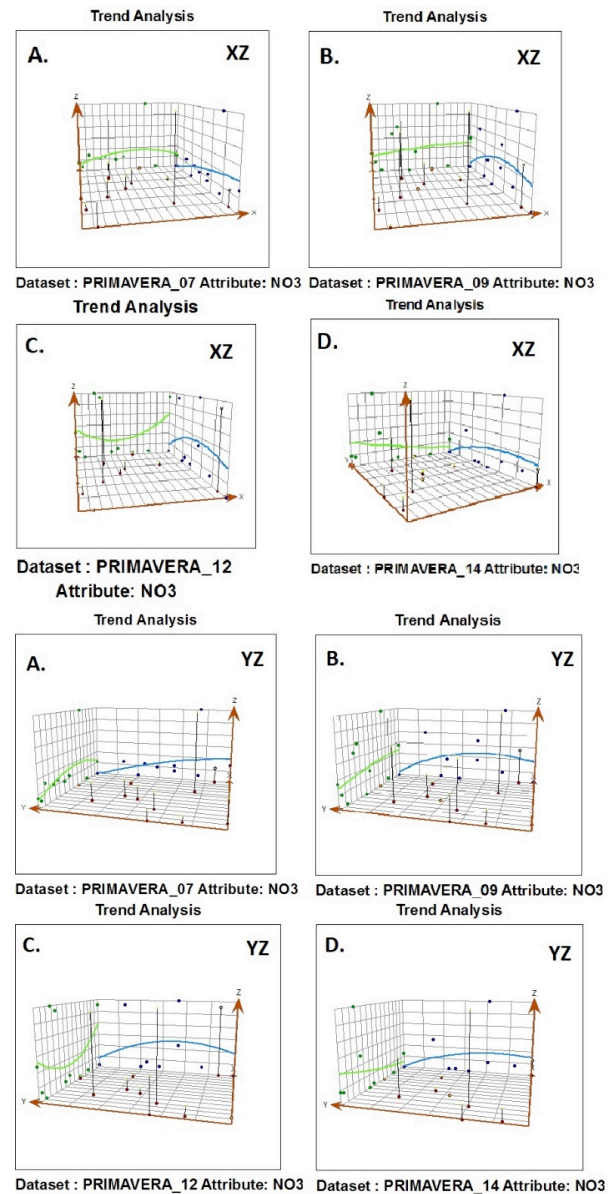


**Figura 20.** Gráfico QQ de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  para: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

Con el análisis exploratorio se proporcionó una mejor comprensión de los datos con los que estamos trabajando.

En el análisis de tendencia (*Trend Analysis*) (Fig. 21) se ve como los valores de coordenadas se distribuyen en una línea recta. La representación de los puntos y su línea de tendencia en el plano XZ del gráfico muestra la tendencia a una disminución Este a Oeste en todos los años excepto para la primavera 2014 en la que se observa una tendencia a aumentar. Por otro lado, al girar el gráfico para visualizar la proyección de los puntos sobre el plano YZ y su línea de tendencia correspondiente, podemos observar que

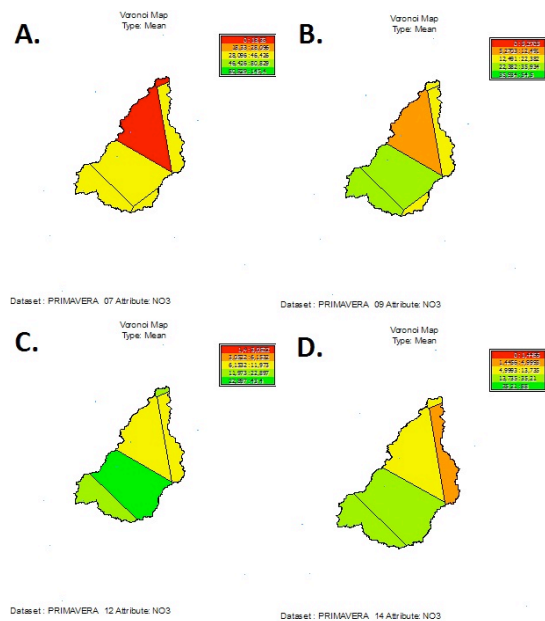
existe una tendencia a aumentar hacia el Sur ya que aparentemente los valores más altos se encuentran en el extremo sur y los más bajos en el extremo norte.



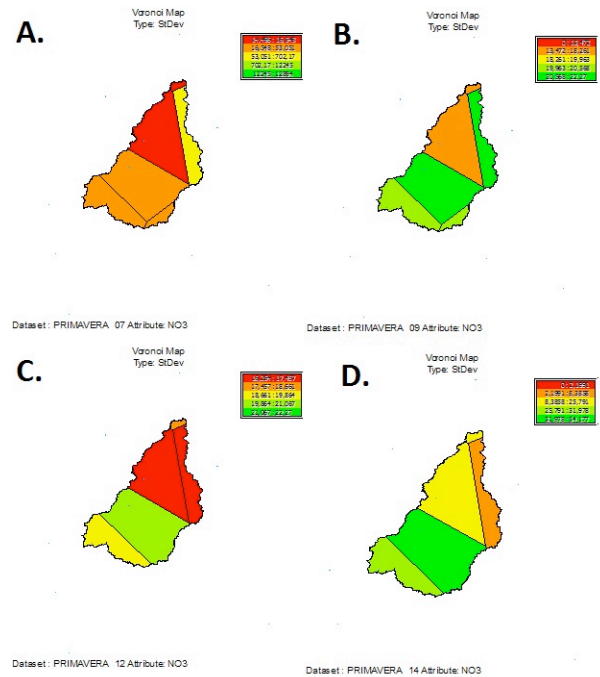
**Figura 21.** Análisis de Tendencias XY de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  para: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

En el diagrama de Voroni se puede observar como existe una máxima variabilidad de

valores hacia el suroeste y según nos movemos hacia el Norte en la cuenca de estudio la variabilidad es mínima, resaltando de verde las zonas donde el riesgo de error podría ser más alto. En el Diagrama de Voroni (*Type: Mean*) (**Fig. 22 A**) se observa un mapa mucho más suavizado y con una mayor agrupación de valores. Mientras que en el Diagrama de Voroni (*Type: StDev*) (**Fig. 22 B**) se observa cierta orientación sobre las áreas del mapa en las que podemos esperar un mayor riesgo debido a una mayor variabilidad del valor de  $\text{NO}^{-3}$ .



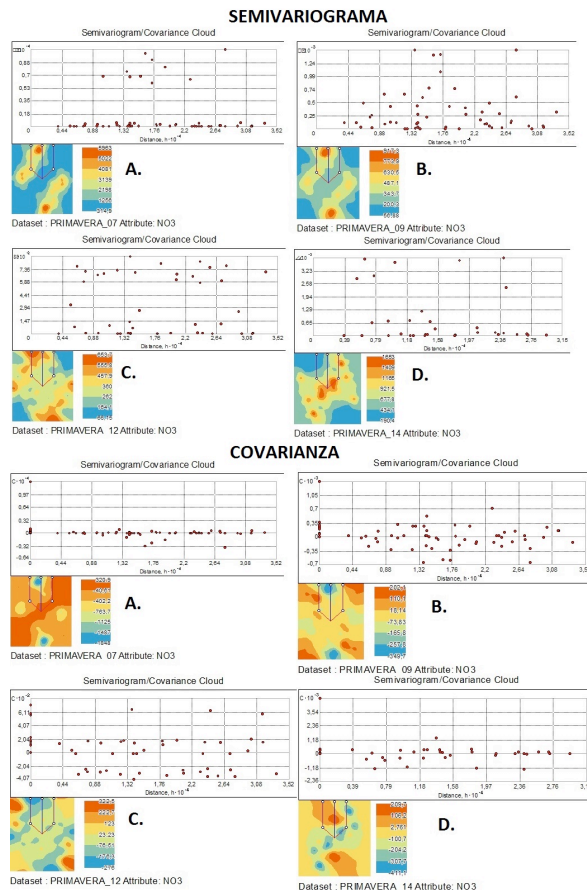
**Figura 22 A.** Diagram Voronio de tipo tipo el valor medio (*Type: Mean*) de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  para: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.



**Figura 22 B.** Diagram Voronio de tipo tipo desviación estándar (*Type: StDev*), de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  para: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

En el análisis del semivariograma y la covarianza se observa cómo las mayores diferencias entre los valores se encuentran entre los extremos Este y Oeste.

En análisis del semivariograma (**Fig. 23**) se observa como la nube de puntos representa los valores para los distintos pares de localizaciones en función de la distancia ( $h$ ) entre dichos pares y como dicha nube cumple que las diferencias entre los puntos de la variable de estudio tienden a aumentar conforme incrementamos la distancia entre dichos puntos.



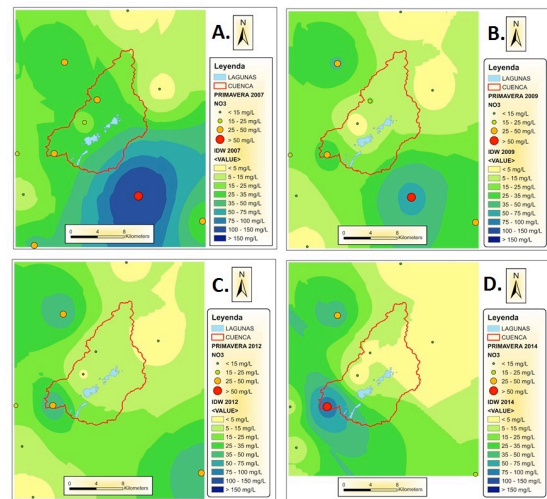
**Figura 23.** Gráficos de Semivariograma/Covarianza de la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila, en función del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  para: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

En el análisis de covarianza (**Fig. 23**) se observa que existen muchos menos valores positivos que negativos, esto quiere decir que nuestros valores presentan una reacción inversa entre las variables, ya que descartamos los valores igual a cero porque estos no presentan ninguna relación entre las variables.

En el diagrama de la parte izquierda aparece representada la superficie, que permite ver las diferencias entre los valores más altos y más bajos del análisis (**Fig. 23**).

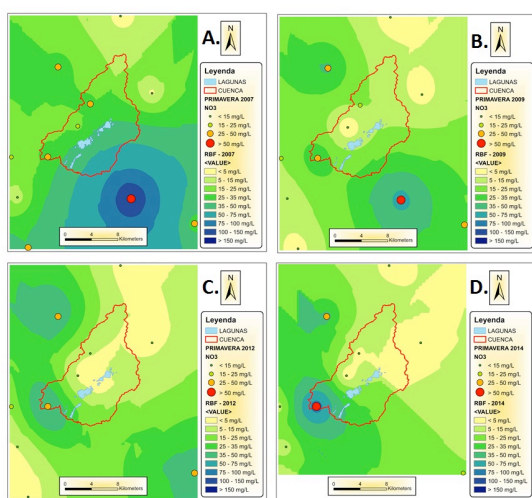
4. Mediante las técnicas de interpolación determinísticas se obtuvieron mapas de distribución del contenido en  $\text{NO}^{-3}$ :

En las capas IDW raster (**Fig. 24**) se observa en detalle la distribución media del contenido de  $\text{NO}^{-3}$  en la zona de estudio, clasificadas con una escala de color amarilla-verde-azul en función de su contenido en nitratos (mg/L) y se ve como estas coinciden con el contenido en  $\text{NO}^{-3}$  de cada punto de muestreo. Ya que los puntos de muestreo donde mayor contenido de nitratos presentan  $>50\text{mg}$  coinciden con el mayor contenido de nitratos del mapa.



**Figura 24.** Mapa determinístico de distribución del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación ponderada por el inverso de la distancia (IDW) para: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

El mapa de funciones de base radial (RBF) (Fig. 2) proporciona unos resultados parecidos al método ponderado por el inverso de la distancia (IDW) (Fig. 24), por ello para establecer una comparación entre ambos se utilizaron los mismos parámetros que se utilizaron para el método IDW y se observa como ambos mapas representan una variación muy poco irregular con una distribución muy poco clara.



**Figura 28.** Mapa determinístico de distribución del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  en la Cuenca de las Lagunas de Villafila mediante el Método de interpolación basado en funciones radiales para: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

En el mapa del método de interpolación polinómica global (GPI):

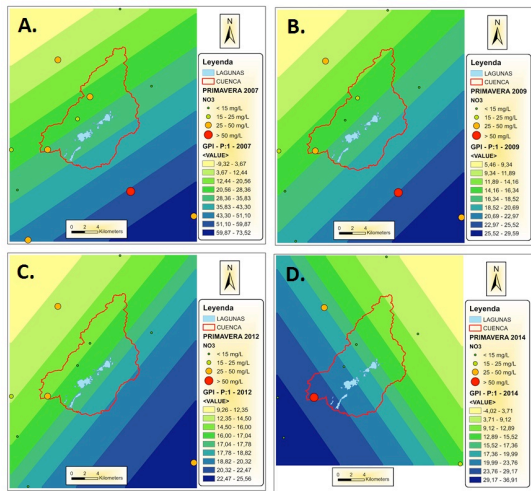
Para *Power: 1* (Fig. 25) vemos como la superficie se ajusta al plano. Este resultado es de gran utilidad para mostrar el patrón de variación general de la variación de  $\text{NO}^{-3}$  al obtenerse en una superficie de interpolación plana; así se observa que la variación general

que se produce en los valores de  $\text{NO}^{-3}$  consiste en un aumento progresivo según avanzamos desde la zona Noroeste del mapa a la zona Sudoeste, a excepción del caso de la Primavera del 2014 (Fig. 25 C) como ya se viene comentando desde el análisis exploratorio.

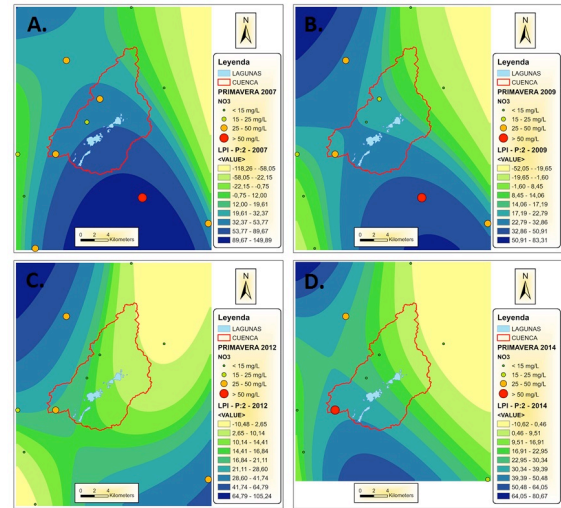
Para *Power: 2* (Fig. 26) presenta un polinomio más complejo, ya que al tener un mayor grado su nivel de detalle será aún mayor con respecto al GPI de grado 1 (Fig. 25), que presenta una superficie plana debido a su bajo grado de interpolación.

El método de interpolación polinómica local (LPI) se utilizaron dos funciones polinómicas (*Power: 2*) (Fig. 27).

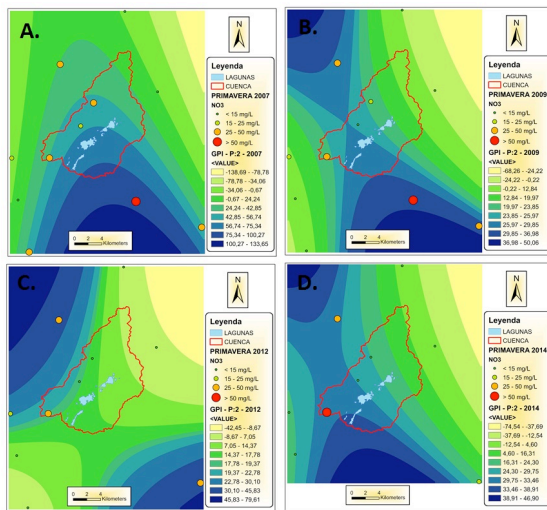
Al comparar los métodos de interpolación polinómica global vemos como los valores medidos no coinciden en muchos casos. En el primer polinomio de primer grado (GPI – P: 1) (Fig. 25) se observa una representación plana de la superficie de  $\text{NO}^{-3}$ , gracias al cual se averiguo el patrón general de la variación del contenido en  $\text{NO}^{-3}$ . Mientras que en el segundo polinomio de segundo grado (GPI – P: 2) (Fig. 26) se observa una tendencia más compleja, ya que se pueden apreciar otros patrones de variación secundarios, como los mayores valores de  $\text{NO}^{-3}$  en la zona noroeste y sur oeste de la cuenca. Pero es la representación polinómica local de segundo grado (LPI – P: 2) (Fig. 27) la que ofrece una visión más completa de la distribución de  $\text{NO}^{-3}$ , aunque puede dar grandes errores en las zonas del borde del mapa.



**Figura 25.** Mapa determinístico de distribución del contenido en  $\text{NO}_3^-$  en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación polinómica global para  $\text{POWER}=1$  **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.



**Figura 27.** Mapa determinístico de distribución del contenido en  $\text{NO}_3^-$  en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación polinómica local para  $\text{POWER}=2$ : **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

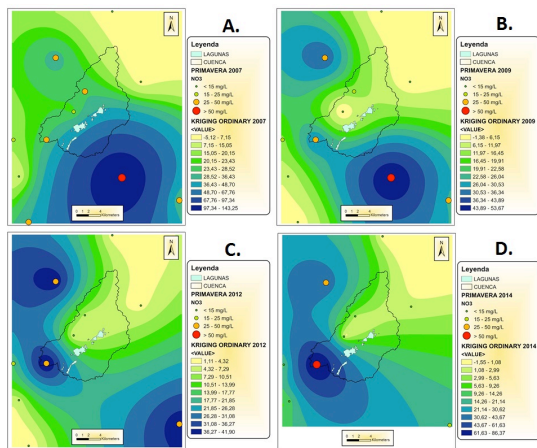


**Figura 26.** Mapa determinístico de distribución del contenido en  $\text{NO}_3^-$  en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación polinómica global para  $\text{POWER}=2$  **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

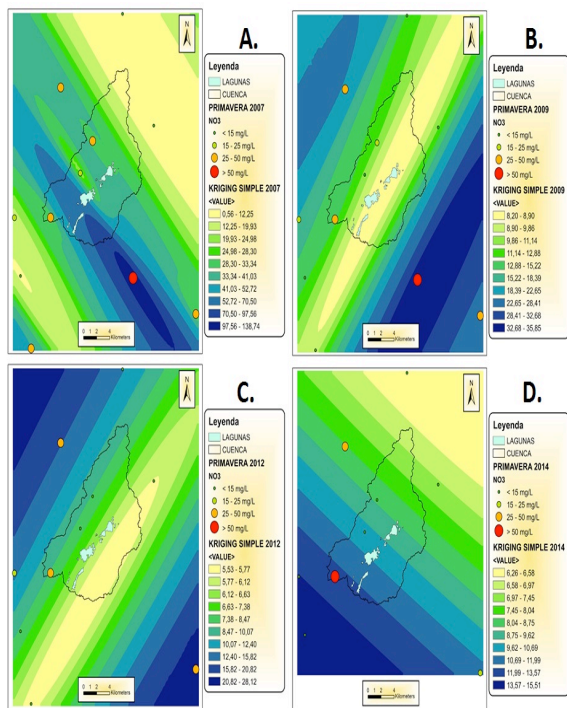
5. Mediante métodos geoestadísticos de interpolación de *Krigado* se obtuvieron mapas de distribución del contenido en  $\text{NO}_3^-$ .

Mapa de distribución del contenido en  $\text{NO}_3^-$  mediante *Krigado* Ordinario (**Fig. 29**).

Mapa de distribución del contenido en  $\text{NO}_3^-$  mediante *Krigado* Simple (**Fig. 30**);



**Figura 29.** Mapa geostatístico de distribución del contenido en  $\text{NO}_3^-$  en la Cuenca de las Lagunas de Villafila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.



**Figura 30.** Mapa geostatístico de distribución del contenido en  $\text{NO}_3^-$  en la Cuenca de las Lagunas de Villafila mediante el Método de interpolación Krigeado Simple: **A.** Primavera 2007 **B.**

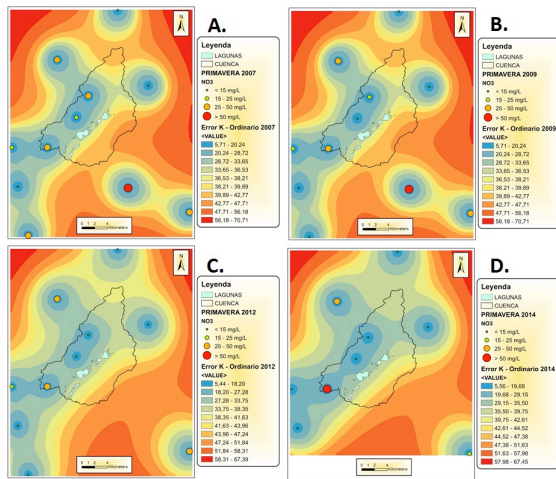
Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

6. Los métodos geostatísticos de interpolación también permiten generar mapas de error, mapas de cuantiles y mapas de probabilidad.

En los mapas de error generados (**Fig. 31**) se consultaron las tablas de sumario de error las estadísticas obtenidas referentes a la cuenca de estudio y se vio que el método que había proporcionado un error más bajo tanto en término medio (*Mean*) como en suma (*Sum*) para la zona de estudio había sido el krigeado ordinario.

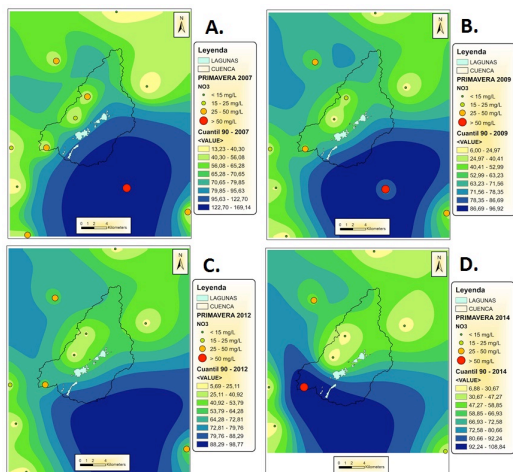
Por lo tanto será seleccionado el método geostatístico Krigeado ordinario como el más adecuado para obtener información adicional mediante otros mapas secundarios (mapas de error, cuantiles y probabilidad) que complementen al mapa de  $\text{NO}_3^-$ .

En estos mapas de error podemos observar claramente como los mayores niveles de error se producen en las zonas de borde, de ahí la importancia de tomar datos siempre en una zona más amplia que el área de interés, ya que nos permitirá eliminar esos defectos de borde.



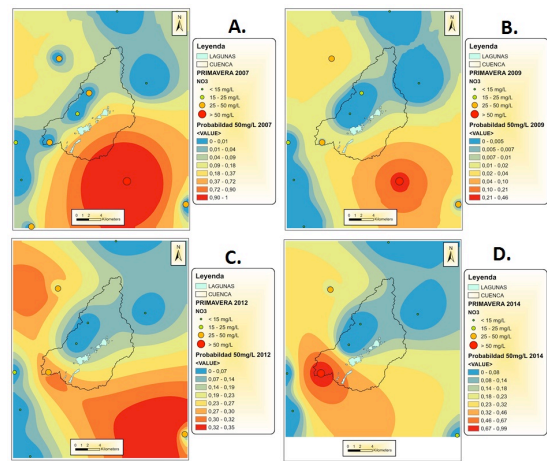
**Figura 31.** Mapa de error del contenido en  $\text{NO}_3^-$  en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

En el mapa de cuantiles (Fig. 32) presenta una apariencia similar al mapa de predicción del contenido en  $\text{NO}_3^-$ , pero en este caso son más extensas las áreas con altos niveles del contenido en  $\text{NO}_3^-$ . Es evidente que al estar mostrando en cada punto los valores de  $\text{NO}_3^-$  máximos que se alcanzan con un 90% de probabilidad, el valor que se muestra en ellos será notablemente superior al del contenido en  $\text{NO}_3^-$  previsto.



**Figura 32.** Mapa de cuantil 90% del contenido en  $\text{NO}_3^-$  en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.

En los mapas de probabilidad (Fig. 33) se realizó la operación inversa a los mapas de cuantiles. Pero en este caso se establece un valor límite determinado para que la variable del análisis obtenga un mapa de probabilidad que supere los 50 mg/L de  $\text{NO}_3^-$ , ya que este valor es el contenido máximo admisible en el agua y podemos observar como los mayores niveles de probabilidad se obtienen en las zonas de mayor contenido en  $\text{NO}_3^-$ , situados en la zona sureste y en algún punto en la zona central del área de estudio.



**Figura 33.** Mapa de probabilidad 50mg/L del contenido en  $\text{NO}_3^-$  en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario: **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.



Finalmente se analizan los resultados obtenidos:

En la primavera del 2007 (**Fig. 34 de los Anexos**), en el mapa de interpolación por Krigado Ordinario, se observa que prácticamente toda la cuenca presenta un alto contenido en nitratos ya que un rango superior al 25 mg/L es considerado como perjudicial para la salud humana (nivel guía), concentrándose el mayor contenido en nitratos (> 50 mg/L) en la zona sureste de la cuenca de estudio y en el punto de desagüe de la cuenca. En la primavera del 2009 (**Fig. 35 de los Anexos**) se observa cómo ha habido una disminución del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  (25-35 mg/L) con respecto al año 2007, siendo afectada únicamente una pequeña parte de la zona sur de la cuenca y del punto de desagüe de esta. En el año 2012 (**Fig. 36 de los Anexos**) la distribución de la concentración es muy similar a la del año 2009, pero en este caso hay un aumento de la concentración (35-50 mg/L) en la zona suroeste, la cual aumenta progresivamente como se observa en el año 2014 (**Fig. 37 de los anexos**) llegando a alcanzar una concentración superior a 50 mg/L.

En el mapa de error (**Fig. 31**) apenas hay variación temporal a lo largo de los años. Se observa un mayor error en la zona noroeste y suroeste de la cuenca de estudio en los cuatro mapas (**Fig. 34, Fig. 35, Fig. 36 y Fig. 37 de los Anexos**).

Por otro lado en los mapas de cuantiles al 90% (**Fig. 32**) si se observan variaciones a lo largo de los 4 años, ya que en la primavera del año 2007 (**Fig. 34 de los Anexos**) se

concentra en la zona sureste, y de punto de desagüe; en la primavera del año 2009 (**Fig. 35 de los Anexos**) se observa un aumento ya que en este año también se extiende por zona norte y dentro de la cuenca. En la primavera del año 2012 (**Fig. 36 de los Anexos**) no presenta mucha variación con respecto al año 2009 pero si se observa que esta se concentración se mueve un poco más hacia la zona suroeste. Es en el año 2014 (**Fig. 37 de los Anexos**) donde se observa que la concentración se ha movido totalmente hacia la zona del punto de desagüe, zona sur de la cuenca.

Finalmente en el mapa de probabilidad del contenido de en nitratos superiores a 50 mg/L (**Fig. 33**) vemos como en el año 2007 (**Fig. 34 de los Anexos**) se concentra en la zona sureste. En el año 2009 (**Fig. 35 de los Anexos**) también se concentra en la zona sureste pero en este caso existe una disminución de la zona afectada. En el año 2012(**Fig. 36 de los Anexos**) se observa como la concentración a se ha movido más hacia el suroeste y aumenta la zona afectada. Es en la primavera del año 2014 (**Fig. 37 de los Anexos**) donde apenas se observa zona afecta, simplemente una pequeña parte de la zona suroeste muy próxima al punto de desagüe.

Por lo tanto, se corrobora que en la zona de estudio existe una interesante concentración de nitratos en el agua subterránea, que presenta una distribución del contenido de nitratos hacia la zona sur (suroeste y sureste), la cual puede deberse a que esta zona se encuentra más dentro del área de la tierra de

campos y que está muy próxima la zona de desagüe de la cuenca, es decir donde se concentran todos los nitratos adquiridos de aguas arriba con mayor tiempo de residencia.

## 5. CONCLUSIONES

En este estudio se utilizaron seis métodos geoestadísticos para realizar interpolaciones: la ponderación inversa de la distancia (IDW), la función de base radial (RBF), la interpolación del polinomio global (GPI), la interpolación del polinomio local (LPI), el método kriging Ordinario (KO) y el método kriging Simple (KS). Las pruebas estadísticas revelaron que el método de interpolación de Kriging Ordinario como el más adecuado, ya que fue el método que proporciono un error más bajo tanto en término medio como en suma para la zona de estudio y tuvo menor variabilidad, mientras que el submétodo del interpolador RBF e IDW también presentaron valores muy similares entre si y al método elegido, debido a que el método kriging es similar al de IDW (Royle et al. 1981).

Como dice el proyecto de decreto por el cual se designan las zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes de origen agrícola y ganadero y que se aprueba en el código de Buenas Prácticas Agrarias, los suelos agrícolas se están contaminando por el uso intensivo de agroquímicos. Este problema es mayor en zonas agrícolas de producción intensiva y se refleja en la concentración de nitritos en aguas subterráneas (Neeteson y

Carton, 2001; Galaviz et al.2010). La región Lagunera de Villafáfila es un área agrícola, ganadera y de avifauna protegida, que no escapa a estos problemas (Fortis et al. 2009); se producen grandes cantidades estiércol de bovino, el cual se aplica de forma directa sin tratamiento previo a los suelos agrícolas (López et al. 2001 y Fortis et al. 2009) y debido al ciclo del Nitrógeno, la mineralización del estiércol genera diferentes compuestos nitrogenados, como nitrato y amonio entre otros. Pero es el nitrato el contaminante inorgánico comúnmente identificado en aguas subterráneas (Kunjikutty et al. 2007) y el que afecta a nuestra área de estudio, siendo designada como zona vulnerable a la contaminación de aguas por nitrato ya que en varias ocasiones supera las concentraciones de 50 mg/L peligrosas para el ser humano (FAO-WHA, 2002). Sin duda el escaso conocimiento de la distribución espacial de nitratos en un suelo dentro de las parcelas cultivadas (Fortis et al. 2010) es uno de los problemas fundamentales, pero como ya se ha visto en este trabajo es posible mediante herramientas de la geoestadística de SIG, elaborar mapas de distribución espacial de nitratos, los cuales se pueden utilizar para identificar áreas con mayores concentraciones de estos iones y emplearse para proponer estrategias de manejo, conservación y ahorro de insumos agrícolas (Fortis et al. 2010).

Por lo tanto gracias al método geoestadístico Kriging Ordinario se generaron mapas de superficies continuas de concentración de

nitratos en las aguas subterráneas de la cuenca de las Lagunas de Villafáfila, para la primavera de los años 2007, 2009, 2012, 2014 (**Fig. 34, Fig. 35, Fig. 36 y Fig. 37 de los Anexos**). Ya que los métodos de interpolación son una aplicación práctica para establecer la distribución espacial de iones, como el nitrato, que pueden contaminar las aguas subterráneas por su mal manejo y los mapas obtenidos a partir de métodos de interpolación pueden utilizarse como herramientas en el manejo de suelos agrícolas como plan de fertilización, para evitar la contaminación de los recursos naturales, ya que pueden ser aplicables a cualquier zona debido a su buena predicción.

## 6. REFERENCIAS

- Burrough P. A. (1986): Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. New York: Oxford University Press.
- Burrough P.A., McDonnell. (1998): Principles of geographical information systems. Oxford University Press. 333 p.
- Cidón Trigo, A. (2016): Estudio sedimentológico y geoquímico de las Lagunas de Villafáfila a partir del análisis de dos tomas estacionales.
- Davis J. C. (2002): Statistical and data analysis in geology. John Wiley. New York. NY, USA.
- Duch Martínez C., Hernández Rodero M. F. y Perianes Jiménez V. (1995): Memoria y Mapa Hidrogeológico, E. 1:500.000 Castilla y León. BELSEL, S.A., Junta de Castilla y León, Conserjería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Dirección General de Urbanismo y Calidad Ambiental.
- Echeverri J. A., Manrique L. B., Moreno F. J. y Bravo A. (2004): Mejoramiento de imágenes usando funciones de base radial. Rev. Ing. Univ. Medellín 15: 21-28.
- Ena V. (1986): "Salinas de Villafáfila". En H. Da Cruz, Guía de las zonas húmedas de la Península Ibérica y Baleares, Miraguano Ediciones.
- FAO/WHO (Food and Agriculture Organization/World Health Organization). (2002): FAO procedural guidelines for the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, Roma.
- Fernández Pérez L. y Cabrera Lagunilla, M. P. (1987): "Estudio Hidrogeológico de las Lagunas de Villafáfila", Geología Ambiental y Ordenación de Territorio, Comunicaciones.
- Ferragne A. (1972): Le Precambrien et le Paleozoique de la Province d'Orense (Nord-Ouest de l'Espagne), Tesis de Doctorado, Univ. de Burdeos.
- Fortis H., Leos J. A., Orona I., García Hernández J. L., Salazar E., Preciado P., Orozco J. A. y Segura M. A. (2010): Validation of four interpolation model for mapping nitrate and ammonium in soil. Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia.
- Fortis H., M., J. A. Leos R., I. Orona C., J. L. García-Hernández., E. Salazar S., P. Preciado R., J. A. Orozco V. y M. A. Segura C. (2009): Uso de estiércol en la Comarca Lagunera. pp. 104-127. In: I. Orona C., E. Salazar S., M. Fortis H., H. I. Trejo E. y C. Vázquez V. (eds.). Agricultura Orgánica, FAZ-UJED. Gómez Palacio, Durango, México.
- Galaviz Villa, I., Landeros-Sánchez C., Castañeda-Chávez M. R., Martínez Dávila J. P., Pérez Vázquez A., Nikolskii-Gavrilov I. y Lango Reynoso F. (2010): Agricultural

- contamination of subterranean water with nitrates and nitrites: An environmental and public health problem. *J. Agric. Sci.* 2: 17-30.
- Getis, Arthur y Ord J. K. (1992): "The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics". *Geographical Analysis* 24, N° 3.
- González L. M. y González J. L. (1991): Guía práctica de viaje. Espacios Naturales Protegidos. Península y Baleares, Editorial Debate.
- Gotwa C.A., Ferguson R.B., Hergert G.W., Peterson T.A. (1996): Comparison of Kriging and Inverse Distance Methods for mapping soil parameters. *Soil Science Society of American Journal* 60:1237-1247.
- Griffith, Daniel. (1987): *Spatial Autocorrelation: A Primer*. Resource Publications in Geography, Association of American Geographers.
- Johnston, K., VerHoef J. M., Kriyoruchko K., y Lucas N. (2001): *Using ArcGis Geostatistical Analyst*. Redlands, CA, USA.
- Jordá Pardo, J. F. (1993). Evolución ambiental de las Lagunas de Villafáfila (Zamora) durante la Prehistoria reciente y épocas históricas. *Anuario 1993 del Instituto de Estudios Zamoranos Florián de Ocampo*, 79-121.
- Julivert M., Fontboté J. M., Ribeiro A. y Conde L. (1972): Mapa Tectónica de la Península Ibérica y Baleares a escala 1:1.000.000. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Kravchenko A. (2003): Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Science Society of American Journal* 67:1564-1571.
- Kravchenko A., Bullock D.G. (1999): A Comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal* 91:393-400.
- Kunjikuttu, S. P., Prasher S. O., Patel R. M., Barrington S. F., y Kim S. H. (2007): Simulation of nitrogen transport in soil under municipal wastewater application using leach. *J. Am. Water Res. Assoc.* 43: 1097-1107.
- López Martínez, J. D., Díaz Estrada A., Martínez Rubin E. y Valdez Cepeda R. D. (2001): Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento de maíz. *Terra* 19: 293-299.
- Lozano Z., Bravo C., Ovalles F., Hernandez R.M., Moreno B., Piñango L., Villanueva J.G. (2004): Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro* 16(1):1-17.
- Lu G.Y., Wong D.W. (2008): An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Comput Geosci-UK* 34(9):1044-1055

- Martín Serrano A. (1988): El relieve de la región occidental zamorana. La evolución geomorfológica de un borde del Macizo Hespérico, Instituto de Estudios Zamoranos “Florián de Ocampo” Diputación de Zamora, 312 pp., 3 mapas.
- Martín Serrano A. y Piles Mateo, E. (1982): Mapa Geológico de España y Memoria, Escala 1:15.000. Villafáfila (308), I.G.M.E., Segunda serie, Primera edición.
- Martín Serrano, A. y Barba Martín, A. (1979): Mapa Geológico de España y Memoria. Escala 1:50.000. N° de Hoja 340 (Manganeses de la Lampreana) (IGME)
- Martínez García E. (1973): Deformación y metamorfismo en la zona de Sanabria provincias de Zamora, León, y Orense, Noroeste de España, *Studia Geología*, V, pp. 7-106, Salamanca.
- Matte P. H. (1968): La structure de la virgation hereynienne de Galice (Espagne). *Geol. Alpine*.
- Mitchell, Andy. La Guía de Esri para el análisis SIG, Volumen 2. Esri Press, 2005.
- Mueller T. G., Pusuluri N. B., Mathias K. K., Cornelius P. y Basnhisel R. I. (2004): Sitespecific soil fertility management: a model for map quality. *Soil Science Society of American Journal* 68:2031-2041.
- Mueller T.G., Pierce F.J., Shabenberger O. y Warnede D. D. (2001): Map quality for site-specific fertility management. *Soil Science Society of American Journal* 65:1547-1558.
- Neeteson, J. J. y Carton O. T. (2001): The environmental impact of nitrogen in field vegetable production. *Acta Hort.* 563: 21–28.
- Oliver, M. A. (1990): "Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems". *International Journal of Geographic Information Systems* 4: 313–332.
- Pallares J.G. (1990): “Guía de la Naturaleza Española”, El País, Madrid.
- Pallares J.G. (1992):”Rutas Verdes. De Villafáfila al Esla”, El País, Madrid.
- Pardo L.G. (1948): Catálogo de los lagos de España, *Biología de las Aguas Continentales*, VI, De Resbus Hidrobiologicis, XXXIII, Ministerio de Agricultura, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, Año XIX, Num. 41, Madrid, 533 pp.
- Pawlowsky G., V. and Olea R. A. (2004): Geostatistical analysis of compositional data. *International Association for Mathematical Geology*. Oxford University Press. Oxford, England.
- Rodríguez Alonso M. y Palacios Alberti J. (2006): Guía de la Fauna de la Reserva Natural “Las Lagunas de Villafáfila”. Junta de Castilla y León, Conserjería de Medio Ambiente.
- Rodríguez Rodríguez E., Larrén Izquierdo H. y García Rozas, R. (1990): "Carta Arqueológica de Villafáfila".

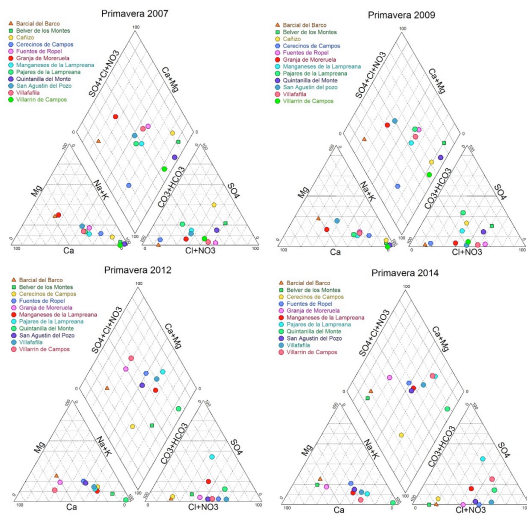
- Anuario 1990, Instituto de Estudios Zamoranos "Florián de Ocampos", pp. 33-76.
- Royle, A. G., Clausen F. L. y Frederiksen P. (1981): "Practical Universal Kriging and Automatic Contouring". *Geoprocessing 1*: 377–394.
- Silverman, B. W. (1986) Estimación de densidad para las estadísticas y el análisis de datos. New York: Chapman and Hall.
- Villatoro M., Henríquez C. y Sancho F. (2008): Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial del pH, Ca, CICE, y P del suelo. *Agronomía Costarricense* 32: 95-105.
- Watson, D. F. y Philip G. M. (1985): "A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation". *Geoprocessing 2*:315–327.
- Wu Q., Xing L.T., Ye C.H. y Liu Y.Z. (2011): The influences of coal mining on the large karst springs in North China. *Environ Earth Sci* 64(6):1513–1523

## 6.1 Webs consultadas

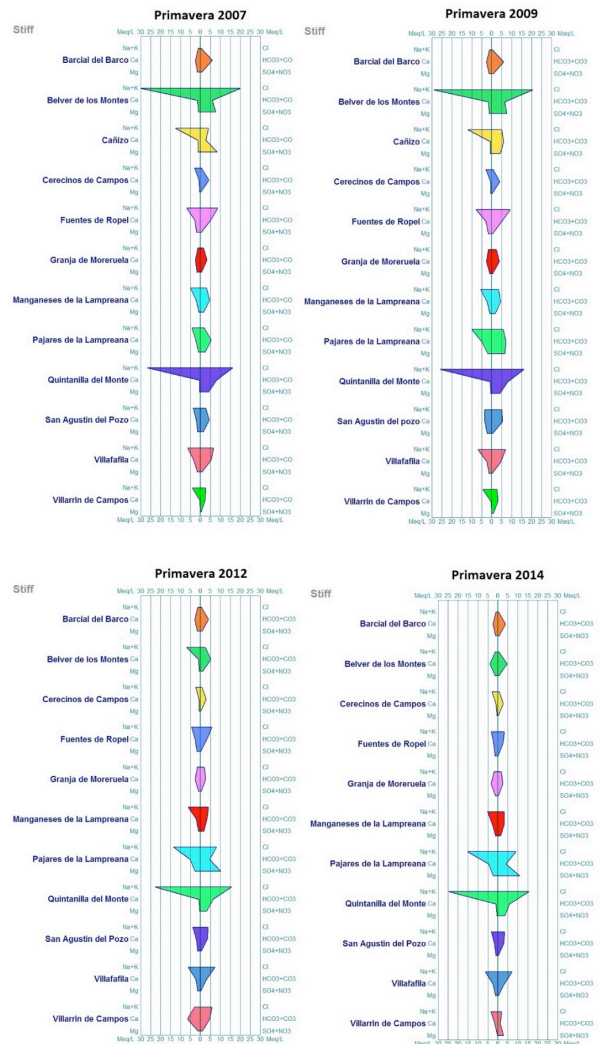
- Clima, Climate-Data.org (en línea). (Fecha de consulta: 29 de junio del 2017). Disponible en: <http://es.climate-data.org/location/279601/>
- GPI, Argis.com (en línea). Fecha de consulta: 28 de agosto del 2017). Disponible en: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/how-global-polynomial-interpolation-works.htm>
- IDW, Argis.com (en línea). Fecha de consulta: 28 de agosto del 2017). Disponible en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/idw.htm>
- LPI, Argis.com (en línea). Fecha de consulta: 28 de agosto del 2017). Disponible en: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/how-local-polynomial-interpolation-works.htm>
- RBF, Argis.com (en línea). Fecha de consulta: 28 de agosto del 2017). Disponible en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/how-radial-basis-functions-work.htm>

## 7. ANEXO

**Figura 8.** Diagramas de Piper de las muestras tomadas agua subterránea de la cuenca de las Lagunas de Villafáfila, proporcionadas por la Confederación Hidrográfica. **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.



**Figura 9.** Diagramas de Stiff de las muestras tomadas agua subterránea de la cuenca de las Lagunas de Villafáfila, proporcionadas por la Confederación Hidrográfica. **A.** Primavera 2007 **B.** Primavera 2009 **C.** Primavera 2012 **D.** Primavera 2014.





**Figura 10.** Base de datos del contenido en nitratos en las aguas subterráneas de la cuenca de las Lagunas de Villafafila A. Primavera 2007 B. Primavera 2009 C. Primavera 2012 D. Primavera 2014.

**A. Primavera 2007.**

NO <sup>3</sup> PRIMAVERA_2007						
Poblacion	Muestra	X	Y	Año	Fecha	NO3
Barcial del Barco	CA0231004	279610	4645917	2007	10/04/2007	31,6
Belver de los Montes	CA0209019	300314	4622126	2007	02/04/2007	27,9
Cañizo	CA0231008	290695	4625898	2007	01/04/2007	145,4
Cercinos de Campos	CA0231006	293866	4641911	2007	02/04/2007	3,4
Fuentes de Ropel	CA0231003	289079	4653648	2007	20/03/2007	0
Granja de Moreuela	CA0231007	272522	4632228	2007	10/04/2007	17,5
Manganeses de la Lampreana	CA0231009	273446	4626113	2007	02/04/2007	10
Palares de la Lampreana	CA0231010	275080	4618495	2007	01/04/2007	35,9
San Agustín del Pozo	CA0231004	284499	4640297	2007	02/04/2007	28
Villafafila	CA0231005	282610	4636922	2007	02/04/2007	22,7
Villarrin de Campos	CA0231006	278055	4632249	2007	01/04/2007	28,4

**B. Primavera 2009.**

NO <sup>3</sup> PRIMAVERA_2009						
Poblacion	Muestra	X	Y	Año	Fecha	NO3
Barcial del Barco	CA0231004	279610	4645917	2009	04/03/2009	36,1
Belver de los Montes	CA0209021	300314	4622126	2009	09/03/2009	25,2
Cañizo	CA0231008	290695	4625898	2009	03/03/2009	54,5
Cercinos de Campos	CA0231006	293866	4641911	2009	30/03/2009	1,7
Fuentes de Ropel	CA0231003	289079	4653648	2009	30/03/2009	0
Granja de Moreuela	CA0231007	272522	4632228	2009	09/03/2009	15,4
Manganeses de la Lampreana	CA0231009	273446	4626113	2009	09/03/2009	8,1
Palares de la Lampreana	CA0231010	275080	4618495	2009	03/03/2009	1,4
San Agustín del Pozo	CA0231004	284499	4640297	2009	04/03/2009	15,2
Villafafila	CA0231005	282610	4636922	2009	04/03/2009	0
Villarrin de Campos	CA0231006	278055	4632249	2009	03/03/2009	31

**C. Primavera 2012.**

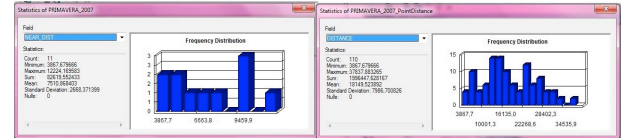
NO <sup>3</sup> PRIMAVERA_2012						
Poblacion	Muestra	X	Y	Año	Fecha	NO3
Barcial del Barco	CA0231004	279610	4645917	2012	15/05/2012	40,8
Belver de los Montes	CA0209023	300314	4622126	2012	09/07/2012	40,4
Cercinos de Campos	CA0231006	293866	4641911	2012	03/07/2012	9,4
Fuentes de Ropel	CA0231003	289079	4653648	2012	19/04/2012	2,8
Granja de Moreuela	CA0231007	272522	4632228	2012	13/06/2012	17,8
Manganeses de la Lampreana	CA0231009	273446	4626113	2012	13/06/2012	5,6
Palares de la Lampreana	CA0231010	275080	4618495	2012	18/04/2012	1,4
San Agustín del Pozo	CA0231004	284499	4640297	2012	03/07/2012	6,3
Villafafila	CA0231005	282610	4636922	2012	21/05/2012	4,2
Villarrin de Campos	CA0231006	278055	4632249	2012	18/07/2012	43,4

**Primavera 2014.**

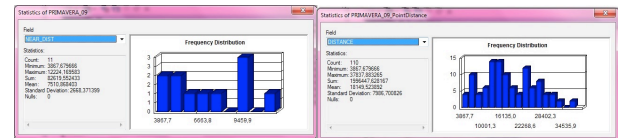
NO <sup>3</sup> PRIMAVERA_2014						
Poblacion	Muestra	X	Y	Año	Fecha	NO3
Barcial del Barco	CA0231009	279610	4645917	2014	04/06/2014	38,6
Belver de los Montes	CA0209025	300314	4622126	2014	12/02/2014	18,7
Cercinos de Campos	CA0231006	293866	4641911	2014	20/02/2014	1,58
Fuentes de Ropel	CA0231008	289079	4653648	2014	19/02/2014	0
Granja de Moreuela	CA0231007	272522	4632228	2014	05/03/2014	12,6
Manganeses de la Lampreana	CA0231009	273446	4626113	2014	05/03/2014	11
San Agustín del Pozo	CA0231004	284499	4640297	2014	04/06/2014	2,66
Villafafila	CA0231005	282610	4636922	2014	04/06/2014	0,524
Villarrin de Campos	CA0231006	278055	4632249	2014	04/06/2014	88

**Figura 13.** A la izquierda se recoge el diagrama de la estadística del valor medio; y a la derecha el de la distancia máxima. A. Para la primavera del 2007. B. Para la primavera del 2009. C. Para la primavera del 2012. D. Para la primavera del 2014.

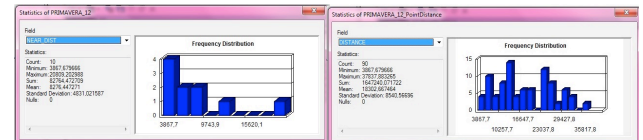
**A. Para la primavera del 2007**



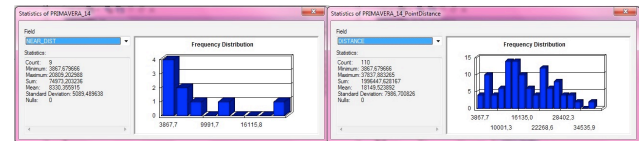
**B. Para la primavera del 2009**



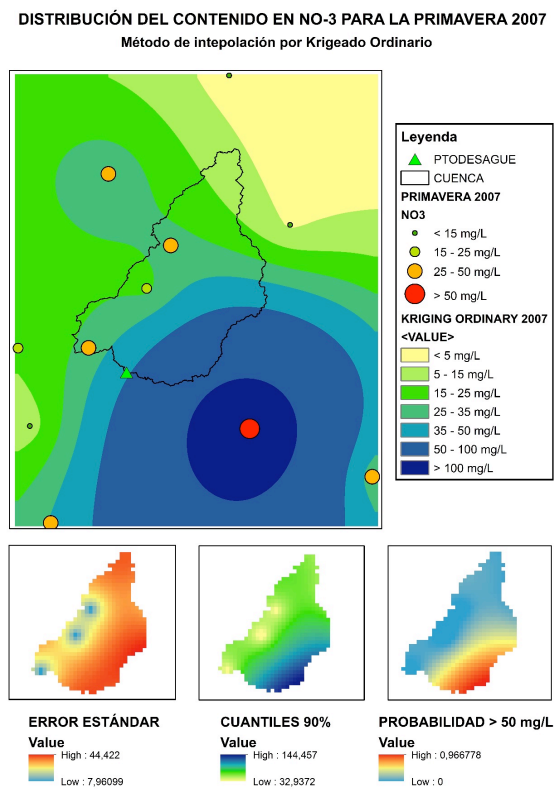
**C. Para la primavera del 2012**



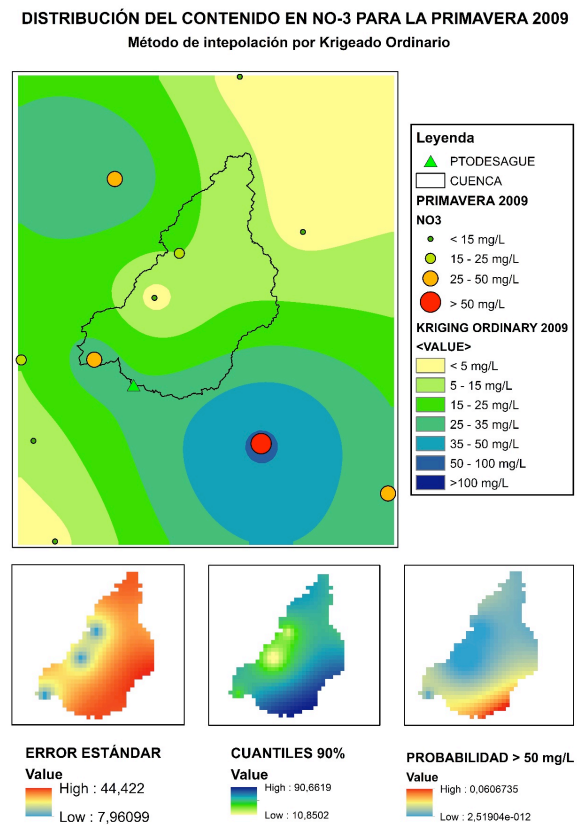
**D. Para la primavera del 2014**



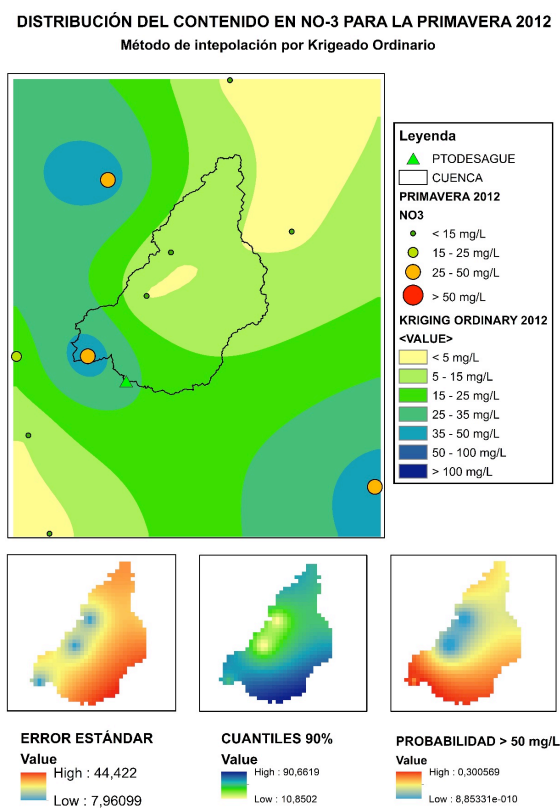
**Figura 34.** Mapa geoestadístico de distribución del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario para la primavera 2007 con Mapa de error del contenido en  $\text{NO}^{-3}$ , Mapa de cuantil del 90% del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  y Mapa de probabilidad de 50mg/L del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  de la cuenca de estudio.



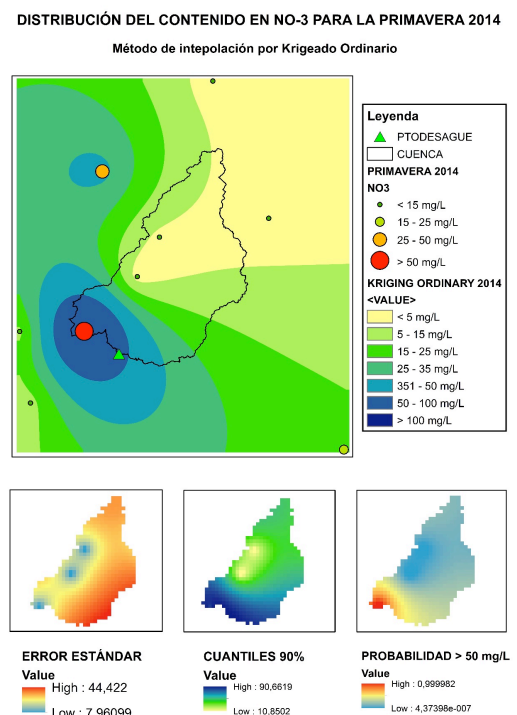
**Figura 35.** Mapa geoestadístico de distribución del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario para la primavera del 2009 con Mapa de error del contenido en  $\text{NO}^{-3}$ , Mapa de cuantil del 90% del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  y Mapa de probabilidad de 50mg/L del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  de la cuenca de estudio.



**Figura 36.** Mapa geoestadístico de distribución del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario para la primavera del 2012 con Mapa de error del contenido en  $\text{NO}^{-3}$ , Mapa de cuantil del 90% del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  y Mapa de probabilidad de 50mg/L del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  de la cuenca de estudio.



**Figura 37.** Mapa geoestadístico de distribución del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  en la Cuenca de las Lagunas de Villafáfila mediante el Método de interpolación Krigeado Ordinario para la primavera del 2014 con Mapa de error del contenido en  $\text{NO}^{-3}$ , Mapa de cuantil del 90% del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  y Mapa de probabilidad de 50mg/L del contenido en  $\text{NO}^{-3}$  de la cuenca de estudio.



**UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**  
**Y**  
**UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS**



**MÁSTER OFICIAL EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**PROYECTO DE FIN DE MÁSTER**

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA ACTIVIDAD  
PORCINA EN LA CALIDAD DEL AGUA  
SUBTERRÁNEA: APLICACIÓN EN LA MAS  
“SIERRA DE LOS CABALLOS - ALGÁMITAS”**

**AUTORA:**  
**Ilduara M<sup>a</sup> Díaz Justo**

**DIRECTOR:**  
**Dr. Alberto Jiménez Madrid**

Alcalá de Henares, 12 de septiembre de 2016

## ÍNDICE

RESUMEN.....	96
1. INTRODUCCIÓN.....	96
1.1. IMPORTANCIA DEL AGUA SUBTERRÁNEA .....	96
1.2. GANADERÍA PORCINA INTENSIVA .....	97
1.3. MARCO NORMATIVO .....	97
1.4. OBJETIVOS .....	98
2. METODOLOGÍA.....	98
2.1. ZONA DE ESTUDIO.....	98
2.1.1. DELIMITACIÓN .....	98
2.1.2. POBLACIÓN .....	100
2.1.3. ACTIVIDAD ECONÓMICA... ..	100
2.1.4. GEOLOGÍA.....	101
2.1.5. HIDROGEOLOGÍA .....	103
2.1.6. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA .....	105
2.1.7. CALIDAD DEL AGUA .....	105
2.1.8. CLIMATOLOGÍA.....	105
2.2. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN.....	105
2.2.1. CARACTERIZACIÓN DE PRESIONES .....	105
2.2.2. VULNERABILIDAD INTRÍNSECA A LA CONTAMINACIÓN .....	107
2.2.3. RIESGO DE CONTAMINACIÓN .....	113
2.3. DELIMITACIÓN DE ZONAS DE ALIMENTACIÓN A CAPTACIONES .....	114
2.3.1. DISTRIBUCIÓN DE CAPTACIONES DESTINADAS AL CONSUMO HUMANO .....	114
2.3.2. ZONAS DE ALIMENTACIÓN A CAPTACIONES .....	114
2.4. PERMÍETROS DE PROTECCIÓN.....	114
2.5. DELIMITACIÓN DE ZONAS DE SALVAGUARDA PARA AGUAS DE CONSUMO HUMANO .....	115
2.6. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....	116
2.6.1. FUENTES DE INFORMACIÓN.....	116
3. RESULTADOS .....	117
3.1. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN.....	117
3.1.1. INDICE IP.....	117
3.1.2. INDICE DRISTPI.....	117
3.1.3. INDICE RI .....	118
3.2. DELIMITACIÓN DE ZONAS DE ALIMENTACIÓN A CAPTACIONES .....	118
3.3. PERÍMETROS DE PROTECCIÓN.....	123
3.4. DELIMITACIÓN DE ZONAS DE SALVAGUARDA.....	123
4. DISCUSIÓN .....	126
5. CONCLUSIONES .....	127
6. RECOMENDACIONES.....	128
7. BIBLIOGRAFÍA .....	129
8. ANEXOS ANEXO 1: METODOLOGÍA DETALLADA DE LA DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE SALVAGUARDA ...	132

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Explotación Censo Agrario 2009 del INE. Fuente: Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía .....	101
<b>Tabla 2.</b> Rangos de la intensidad de presión (índice IP). Fuente: Jiménez Madrid, 2010.. .....	106
<b>Tabla 3.</b> Descripción de presiones ganaderas. Fuente: adaptación de Jiménez Madrid, 2010.....	107
<b>Tabla 4.</b> Clases de riesgo, índice RI. Fuente: Jiménez Madrid, 2011.....	114
<b>Tabla 5.</b> Fuentes de información.....	117

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Delimitación MAS pertenecientes a la DHG. Fuente: PHDHG, 2016.....	99
<b>Figura 2.</b> Delimitación MAS de estudio: 0054302 Sierra de los Caballos – Algámitas. ....	100
<b>Figura 3.</b> Marco geológico de la Suerra de los Caballos – Algámitas. Fuente: IGME, serie MAGNA, hojas: 1005, 1006, 1021, 1022, 1023 y 1037.....	102
<b>Figura 4.</b> Marco hidrogeológico de la Sierra de los Caballos – Algámitas. Fuente IGME, hoja 82 del mapa Hidrogeológico de España .....	104
<b>Figura 5.</b> Metodología del método SRISTPI. Fuente: Jiménez Madrid, 2011.....	109
<b>Figura 6.</b> Puntuaciones asignadas a los parámetros del método APLIS. Fuente: Andreo et al., 2004 .....	111
<b>Figura 7.</b> Valores de los factores I, S y T del método DRASTIC. Fuente: adaptación de Aller et al., 1987 .....	113
<b>Figura 8.</b> Metodología para la delimitación de zonas de salvaguarda. Fuente: Jiménez Madrid, 2011 .....	116
<b>Figura 9.</b> Resultados de la intensidad de las presiones sobre las aguas subterráneas de la Sierra de los Caballos – Algámitas (índice IP) .....	119
<b>Figura 10.</b> Resultados de la vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas de la Sierra de los Caballos – Algámitas (índice DRISTPI) .....	120

<b>Figura 11.</b> Resultados del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas de la Sierra de los Caballos – Algámitas (índice RI) .....	121
<b>Figura 12.</b> Zonas de alimentación a captaciones de las aguas subterráneas de la Sierra de los Caballos – Algámitas. Fuente: PHDHG, 2016.....	122
<b>Figura 13.</b> Parámetros de protección existentes en la Mas Sierra de los Caballos – Algámitas. Fuente: PHDHG, 2016 .....	124
<b>Figura 14.</b> Delimitación de las zonas de salvaguarda de la Sierra de los Caballos - Algámitas .....	125
<b>Figura A1-1.</b> Identificación de presiones sobre la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas .....	132
<b>Figura A1-2.</b> Profundidad del agua en la MAS Suerra de los Caballos - Algámitas ....	133
<b>Figura A1-3.</b> Precipitación media anual (mm) en la MAS Suerra de los Caballos - Algámitas .....	134
<b>Figura A1-4.</b> Recarga del acuífero (mm/año) en la MAS Suerra de los Caballos - Algámitas.....	135
<b>Figura A1-5.</b> Litología de la ZNS de la MAS Suerra de los Caballos - Algámitas ....	136
<b>Figura A1-6.</b> Tipo de suelo sobre la MAS Suerra de los Caballos - Algámitas .....	137
<b>Figura A1-7.</b> Pendiente del terreno (%) sobre la MAS Suerra de los Caballos - Algámitas .....	138
<b>Figura A1-8.</b> Zonas de infiltración preferencial en la MAS Suerra de los Caballos - Algámitas.....	139

## TABLA DE ABREVIATURAS

AEMET:	Agencia Estatal de Meteorología
BOE:	Boletín Oficial del Estado
BOJA:	Boletín Oficial de la Junta de Andalucía
CHG:	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
DMA:	Directiva Marco del Agua
ETP:	Evapotranspiración Potencial
ETRS:	Sistema de Referencia Terrestre Europeo
IGME:	Instituto Geológico y Minero de España
IGN:	Instituto Geográfico Nacional
INE:	Instituto Nacional de Estadística
IP:	Intensidad de Presión
km2:	Kilómetro(s) cuadrado(s)
MAPA:	Ministerio de Medio Ambiente
MARM:	Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino
MAGNA:	Mapa Geológico Nacional
MAS:	Masa de Agua Subterránea
MDT:	Modelo Digital del Terreno
mm:	Milímetro(s)
OMS:	Organización Mundial de la Salud
PHDHG:	Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir
PNOA:	Plan Nacional de Ortofotografía Aérea
REDIAM:	Red de Información Ambiental

RI: Índice de Riesgo

SIG: Sistema de Información  
Geográfica

UNESCO: Organización de las  
Naciones Unidas para la Educación, la  
Ciencia y la Cultura

UTM: Universal Transversal Mercator

ZAC: Zona de Alimentación a  
Captación

ZNS: Zona No Saturada



## RESUMEN

El agua subterránea de la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas es un recurso muypreciado en localidades donde las épocas de sequía son periódicas y, por lo tanto, es necesario gestionarlo de manera eficiente.

Una de las actividades antrópicas en las que se apoya la economía de la zona de estudio es la ganadería porcina intensiva, donde las deyecciones generadas, con una elevada concentración de nitratos, son utilizados habitualmente para abonar el terreno. No obstante, la práctica reiterada de este proceso y sin el tratamiento adecuado del purín conlleva la posible contaminación de los acuíferos.

En el presente trabajo se delimitan zonas de salvaguarda entorno a las captaciones de agua subterránea con el objetivo de asegurar la cantidad y calidad adecuada para el consumo humano. A partir del análisis de la intensidad de presión de la actividad porcina y de la vulnerabilidad intrínseca de la masa de agua calculada mediante el método DRISTPI, se concluye que la mayor parte de la zona analizada tiene un riesgo de contaminación moderado.

La presencia de numerosas granjas en el interior de las zonas de salvaguarda definidas puede dar lugar a que el purín generado en estas explotaciones sea el causante del mal estado químico que existe actualmente en la masa de agua estudiada.

Además, para prevenir futuras contaminaciones de este tipo se proponen medidas de gestión del agua subterránea.

Palabras clave: acuífero, calidad, nitratos, DRISTPI, zonas de salvaguarda.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Importancia del agua subterránea

El agua subterránea es un recurso vital para el suministro económico y seguro de agua potable en el medio urbano y rural, y juega un papel fundamental en el bienestar del ser humano y de muchos ecosistemas acuáticos (Foster, *et al.*, 2003).

El uso de las aguas subterráneas ha aumentado significativamente durante los últimos cincuenta años debido a su presencia generalizada, alta confiabilidad durante épocas de sequía, buena calidad en la mayoría de los casos, y también por los avances en cuanto a conocimiento hidrológico, desarrollo de tecnologías modernas de perforación y bombeo, y a los generalmente modestos costos de desarrollo (UNESCO, 2017).

A su vez, el incremento del uso del agua subterránea conlleva una amenaza de contaminación causada por la urbanización, el desarrollo industrial, las explotaciones mineras y las actividades agrícolas y ganaderas (UNESCO, 2017).

La zona de Andalucía, caracterizada por períodos recurrentes de sequía, dispone de recursos hídricos limitados, lo que obliga al conocimiento preciso de los mismos para llevar a cabo una planificación y gestión hidrológica rigurosas.

## **1.2 Ganadería porcina intensiva**

En la ganadería porcina intensiva, los animales se encuentran estabulados, generalmente bajo condiciones de temperatura, luz y humedad creadas artificialmente, con el objetivo de incrementar la producción en el menor tiempo posible, y la alimentación se basa fundamentalmente en pienso compuesto (Consejería de Medio Ambiente, 2011).

La mezcla de los excrementos de los animales, las aguas de lavado y los restos de piensos producen un estiércol licuado, denominado purín. Un cerdo origina al día entre 4 y 7 litros de purín, lo que se convierte en toneladas al cabo del día en una granja (Consejería de Medio Ambiente, 1997).

Una de las formas más habituales de acumular los residuos son las balsas de almacenamiento. Estas balsas suelen estar formadas por una excavación en el suelo con forma rectangular, situada a menor cota topográfica que los cerdos y recubierta en su base con material impermeable con el objetivo de evitar posibles filtraciones hacia capas litológicas inferiores (MARM, 2010).

La gran desventaja de la producción porcina intensiva es la acumulación de elevadas cantidades de estiércol que provoca problemas medioambientales, afectando a la atmósfera, al suelo y a las aguas superficiales y subterráneas. A pesar de que el purín puede ser empleado como fertilizante natural donde los suelos tienen bajos índices de materia orgánica, el abono reiterado provoca que los nitratos, las principales sales contendidas en los purines, se vayan filtrando y terminen contaminando los acuíferos. Por lo tanto, el purín debe considerarse como una fuente potencial de contaminación nitrogenada de las aguas subterráneas (MAPA, 2006).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) advierte de la peligrosidad que supone que la población consuma agua con un contenido superior a 50 mg/l de nitratos, ya que la ingesta de esta sustancia puede derivar en metahemoglobinemia (llamado síndrome del bebé azul), que disminuye la absorción de oxígeno y provoca limitaciones de su transporte en los tejidos, afectando principalmente a niños pequeños (OMS, 2006).

## **1.3 Marco normativo**

La Directiva Marco del Agua (DMA) (Unión Europea, 2000), tiene como objetivo principal el mantenimiento del buen estado de las aguas superficiales continentales, las aguas subterráneas, las aguas de transición y las aguas costeras para el año 2015. Sin

embargo, se han establecido prórrogas a esta fecha inicial debido a los plazos ajustados para alcanzar los objetivos propuestos.

En concreto, la Directiva de Aguas Subterráneas (Unión Europea, 2006), recoge las medidas específicas para prevenir y controlar la contaminación de las aguas subterráneas.

Además, la Directiva 91/676/CE (Consejo Europeo, 1991) establece la necesidad de reducir la contaminación causada por nitratos de origen agrario, con concentraciones mayores a 50 mg/l, y actuar preventivamente contra nuevas contaminaciones de dicha clase. Esta Directiva se desarrolla en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) en el Decreto 36/2008 (BOJA, 2008), por el que se designan las zonas vulnerables y se establecen medidas contra la contaminación por nitratos de origen agrario.

#### **1.4 Objetivos**

Objetivo principal:

- Analizar si la actividad porcina afecta a la masa de agua subterránea (MAS) Sierra de los Caballos - Algámitas, ya que los desperdicios procedentes de la ganadería intensiva se depositan en balsas de gran volumen, con alto contenido de materia orgánica y nitratos, que pueden alcanzar los acuíferos que se

sitúan bajo ellas y modificar el estado químico del agua subterránea.

Objetivos específicos:

- Delimitar zonas de salvaguarda con la finalidad de proteger la calidad de la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas destinada al consumo humano frente a la contaminación porcina, según los requerimientos de la DMA.
- Evaluar el riesgo de contaminación de la MAS, realizando un inventario de las presiones de ganadería porcina intensiva y estableciendo la vulnerabilidad intrínseca mediante el método DRISTPI (Jiménez Madrid, 2011), además de incorporar las Zonas de Alimentación a Captaciones (ZAC) y los Perímetros de Protección existentes.
- Plantear medidas para prevenir la contaminación del agua subterránea por nitratos procedentes de la ganadería porcina, de manera que no supere el límite de 50 mg/l de dicha sustancia que exige la normativa vigente.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Zona de estudio**

#### **2.1.1 Delimitación**

La MAS Sierra de los Caballos - Algámitas se encuentra entre las provincias de Sevilla y Málaga, en las zonas hidrográficas medio Guadalquivir y bajo Guadalquivir hasta Sevilla; ocupa una extensión de 253,8 km<sup>2</sup>

y el código de identificación de la masa de agua es ES050MSBT000054302 de acuerdo con lo recogido en el Plan

Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (PHDHG, 2016) (Figura 1 y Figura 2).

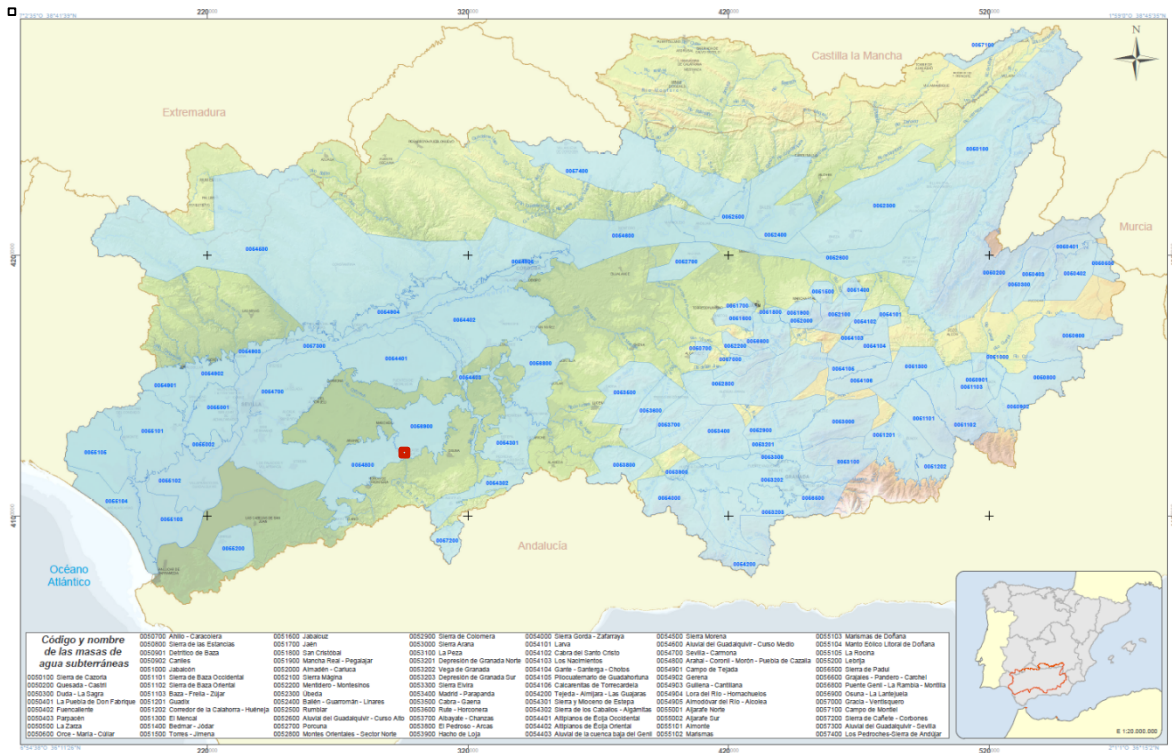


Figura 1. Delimitación MAS pertenecientes a la DHG. Fuente: PHDHG, 2016.



**Figura 2.** Delimitación MAS de estudio: 0054302 Sierra de los Caballos - Algámitas.

La MAS estudiada se sitúa en la cuenca alta del río Guadalhorce en la provincia de Sevilla, abarcando parte de los municipios de Fuente de Piedra, Pruna, Algámitas, Olvera, Villanueva de San Juan, Martín de la Jara, Pedrera, Los Corrales, La Roda de Andalucía, El Saucejo y Estepa; y al nordeste engloba lugares de los concejos pertenecientes a la provincia de Málaga: Campillos, Sierra de Yeguas y Cañete la Real.

Sin embargo, existen municipios que cubren poca extensión de la masa de agua analizada, y otros, como Villanueva de San Juan, Algámitas, El Saucejo, Los Corrales, Martín de la Jara y Sierra de Yeguas, ocupan una superficie significativa en la MAS.

### **2.1.2 Población**

Los municipios que tienen núcleos de población abastecidos a partir de los recursos hídricos de la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas son: Villanueva de San Juan, Algámitas, El Saucejo, Los Corrales, Sierra de Yeguas, Martín de la Jara y La Roda de Andalucía.

La población total de estos núcleos, según el último censo realizado por el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía en el año 2016, es de 21.203 habitantes.

### **2.1.3 Actividad Económica**

La principal actividad económica de estos municipios está relacionada con la

ganadería, la agricultura y los campos de olivos.

En este caso, al tratarse del análisis de la contaminación del agua subterránea debido

a la ganadería porcina intensiva, se describen los datos relativos al número de explotaciones ganaderas porcinas elaborado por el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (Tabla 1).

**Tabla 1.** Explotación Censo Agrario 2009 del INE. Fuente: Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía.

Territorio	Nº Explotaciones	Nº Cabezas
Algámitas	46	7.189
El Saucejo	18	25.831
Los Corrales	8	8.350
Martín de la Jara	2	2.460
Sierra de Yeguas	5	2.471
Villanueva de San Juan	2	224

En la superficie total de los municipios que cubren la MAS analizada existen 81 explotaciones de ganadería porcina y 46.525 cabezas de ganado registradas.

#### 2.1.4 Geología

Según el mapa Geológico de España MAGNA 50 (IGME, 1981-1983), hojas: 1005 - Osuna, 1006 - Benamejé, 1022 - Campillos, 1023 - Antequera, y 1037 - Teba (Figura 3); el encuadre geológico de la zona de estudio se sitúa dentro de las Cordilleras Béticas, las cuales representan el extremo más occidental del conjunto de cadenas alpinas europeas. Se trata de una región inestable afectada en parte del Mesozoico y durante gran parte del Terciario por fenómenos tectónicos mayores, situados entre los grandes cratones europeo y africano, y presentan características propias en cada borde.

Existen tres zonas en el área de estudio, norte, centro y sur, donde afloran margas y dolomías Jurásicas atribuidas al Subbético Medio-septentrional, caracterizado por facies profundas desde el Lías superior, con abundancia de radiolaritas y con vulcanismo submarino.

Además, debido a la compresión que provoca el choque de las placas europeas y africanas, mediante el juego de una miniplaca, la Zona Bética, se originan cizallas de vergencia que hacen cabalgar unos dominios sobre otros.

Sobre los materiales citados anteriormente aparecen arcillas, limos y conglomerados de origen fluvial correspondientes a los períodos Terciario y Cuaternario.

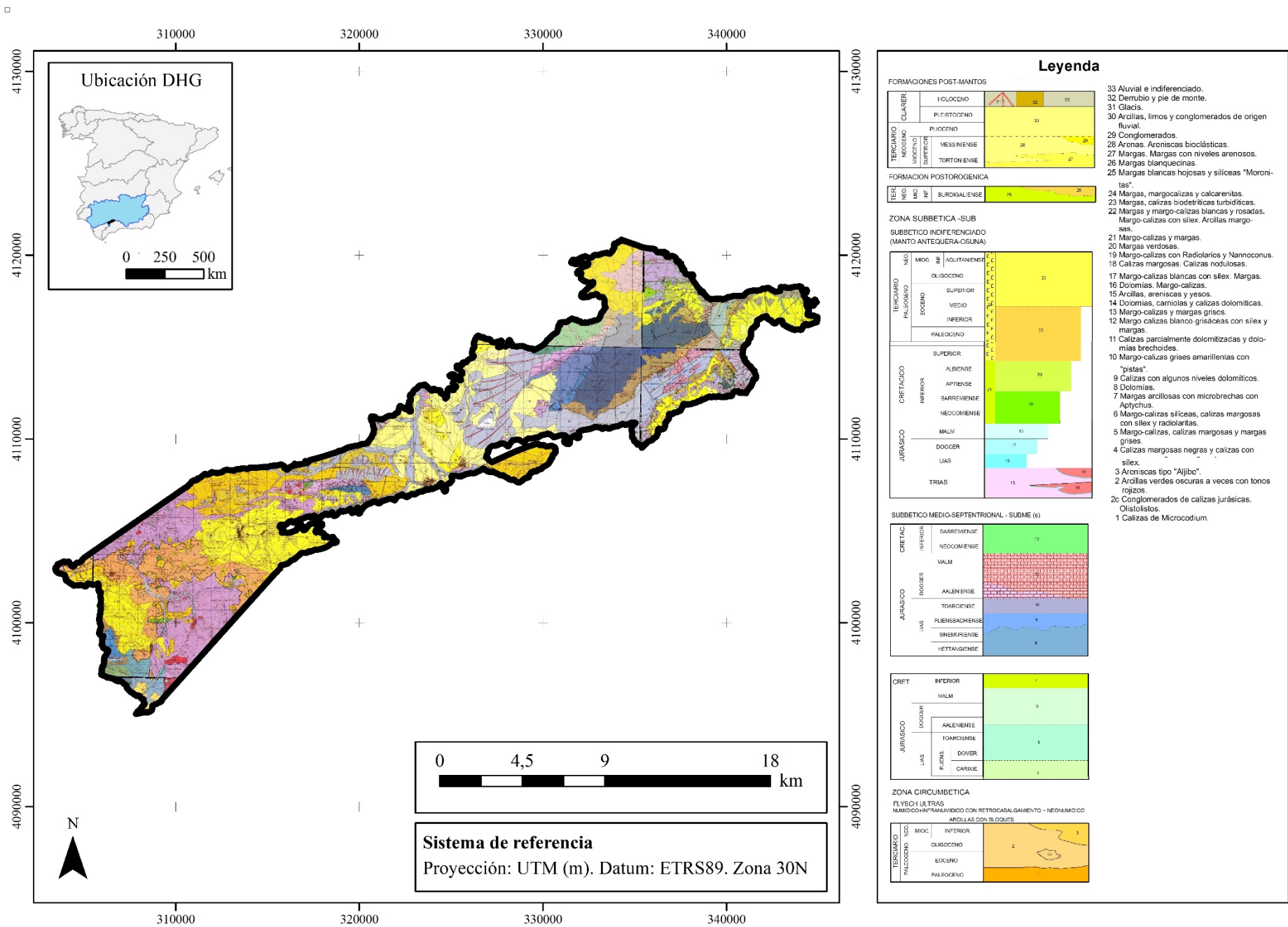


Figura 3. Marco geológico de la Sierra de los Caballos - Algámitas. Fuente: IGME, serie MAGNA, hojas: 1005, 1006, 1022, 1023 y 1037.

### 2.1.1 Hidrogeología

Conforme a la hoja 82 - Morón de la Frontera perteneciente al mapa Hidrogeológico de España representada en la Figura 4 (IGME, 1988), el substrato impermeable de la región sobre el que descansan los materiales permeables que constituyen los acuíferos encontrados en esta unidad pertenece a los periodos del Cretácico y Triás, y está formado por arcillas, margas y yesos.

Según la permeabilidad de las barreras de los acuíferos dentro del ámbito de estudio se encuentran dos sistemas: acuíferos carbonatados con porosidad kárstica y formaciones detríticas con porosidad intergranular.

#### 2.1.1.1 Acuíferos carbonatados

Afloran en tres macizos aislados materiales de la edad Jurásica que constituyen los relieves más destacados de la zona: Sierra de los Caballos, Loma de Almadenes y Sierra del Tablón - El Peñón, son afloramientos de pequeña extensión hallándose poco enraizados y desconectados entre sí. Están formados por calizas y dolomías de potencia variable entre 150 y 300 metros y generalmente se hallan poco karstificados.

El macizo calizo-dolomítico de la Sierra de los Caballos constituye el acuífero por fisuración de mayor tamaño, 15 km<sup>2</sup> de superficie, y la alimentación de la unidad

hidrogeológica de la sierra se realiza por infiltración directa del agua de lluvia.

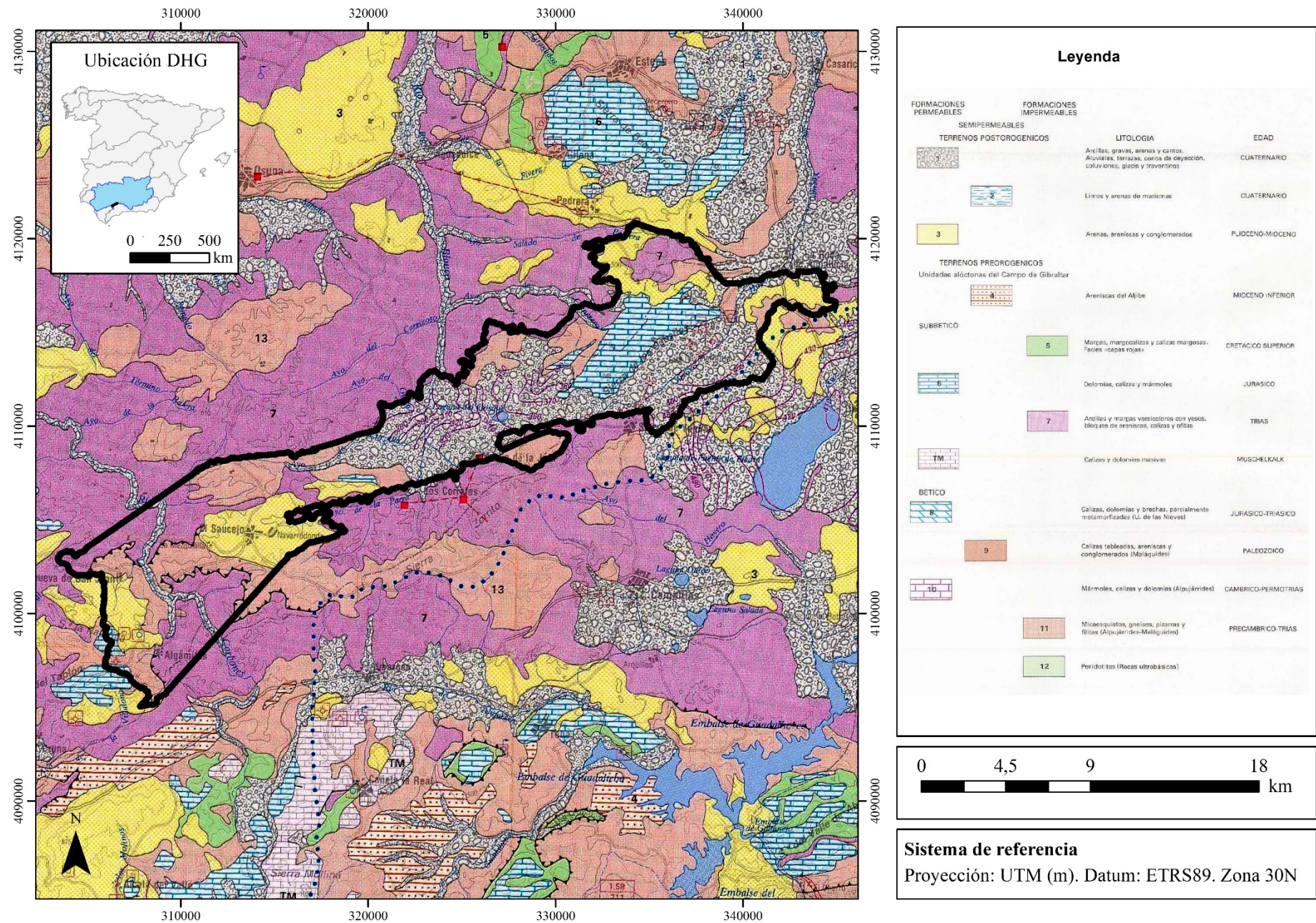
El macizo de la Sierra del Tablón - El Peñón presenta algunas dolinas aisladas, y constituye el acuífero más karstificado de los encontrados en la MAS de estudio.

La Loma de Almadenes es la formación carbonatada de menor tamaño y su desarrollo kárstico es inferior a los otros macizos mencionados anteriormente.

#### 2.1.1.2 Acuíferos detríticos

Los principales acuíferos detríticos están formados por arenas, areniscas y conglomerados correspondientes al Mioceno, la potencia varía entre márgenes muy amplios con valores generalmente inferiores a los 200 m. También se encuentran pequeños acuíferos cuaternarios de origen aluvial constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas.





**Figura 4.** Marco hidrogeológico de la Sierra de los Caballos - Algámitas. Fuente: IGME, hoja 82 del mapa Hidrogeológico de España.

### **2.1.6 Caracterización hidroquímica**

Las poblaciones que se encuentran en la MAS estudiada se abastecen de captaciones de aguas subterráneas asociadas a afloramientos de calizas existentes en la zona (MIMAM, 1999).

Las aguas captadas en Villanueva de San Juan presentan una caracterización propia de aguas subterráneas asociadas a calizas: facies bicarbonatada cálcica, muy duras y mineralización débil.

Las aguas que se explotan para el abastecimiento de Algámitas, Martín de la Jara y Los Corrales son captadas en sondeos asociados también a calizas, aunque presentan una mayor proporción de cloruros y sodio debido a disolución de margas y yesos de edad Triásica, que constituyen el sustrato impermeable de los acuíferos kársticos de la Sierra de los Caballos y de El Peñón de Algámitas.

### **2.1.7 Calidad del agua**

Según los últimos datos registrados en los 2 puntos de control de la calidad del agua, pertenecientes a la Red de Aguas Subterráneas de la DHG, el estado químico de la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas es malo, siendo el nitrato el único parámetro que no cumple las exigencias de la normativa (PHDHG, 2016).

### **2.1.8 Climatología**

Las precipitaciones medias anuales varían entre 460 mm en el extremo oriental y 632 mm en el oeste de la masa de agua; la temperatura media anual es de 16 °C y el valor medio de la evapotranspiración potencial (ETP) es de 855 mm/año (REDIAM, 2014).

## **2.2 Evaluación del riesgo de contaminación**

La evaluación del riesgo de contaminación se realiza para la totalidad de la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas, combinando la caracterización de las presiones y la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de la masa de agua a la contaminación. El producto de ambos criterios genera un índice de riesgo de contaminación que, mediante la interpretación a través de una matriz de doble entrada, da lugar a cinco clases de riesgo.

### **2.2.1 Caracterización de presiones**

De acuerdo con el anexo II de la DMA una presión es aquella actividad antropogénica a la que puede verse expuesta una masa de agua y que puede tener un efecto medioambiental desfavorable en la misma. En relación con las aguas subterráneas, las presiones se clasifican en cinco tipos: fuentes de contaminación difusas, fuentes de contaminación puntuales, extracción de agua, recarga artificial e intrusión marina.

En el caso de estudio, la contaminación procedente de la ganadería porcina intensiva

es una fuente puntual pero el efecto de los nitratos sobre la masa de agua subterránea es de tipo difuso.

Por consiguiente, cada presión debe ser evaluada de manera individual para determinar su capacidad de contaminación (Sánchez, 2010). Para ello, se realiza un inventario detallado que incluya la identificación de la actividad, su localización geográfica y su caracterización, el cual identificará aquellas áreas donde se hallen las actividades que resulten generadoras del posible deterioro en la calidad de las aguas. Toda presión debe ser evaluada para

establecer su capacidad de alterar el estado químico del agua subterránea.

Una vez elaborado el inventario se determina la intensidad de cada presión (índice IP) (Jiménez Madrid, 2011), el cual se fundamenta en la aproximación propuesta por Acción COST 620 (Zwahlen, 2004), que caracteriza la peligrosidad de cada presión identificada en la MAS de estudio.

Las presiones se organizan en cinco clases de intensidad y se les asigna un valor entre 1 y 5, de acuerdo a lo recogido en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Rangos de la intensidad de presión (Índice IP). Fuente: Jiménez Madrid, 2010.

<b>Rango Intensidad Presión (Factor IP)</b>	<b>Valor del Índice IP</b>
0 - 19 (MUY BAJO)	1
20 - 39 (BAJO)	2
40 - 59 (MODERADO)	3
60 - 79 (ALTO)	4
> 80 (MUY ALTO)	5

En la Tabla 3 se muestra el listado de las diferentes presiones ganaderas, junto con sus intensidades asociadas y los umbrales definidos para diferenciar actividades del

mismo tipo, pero con diferente potencial de contaminación junto con la puntuación del índice IP en caso de superación de dicho umbral.

**Tabla 3.** Descripción de presiones ganaderas. Fuente: adaptación de Jiménez Madrid, 2010.

<b>GANADERÍA</b>			
<b>Presión</b>	<b>Intensidad Presión (IP)</b>	<b>Umbral</b>	<b>Superación Umbral</b>
Ganadería porcina intensiva	30	> 500 cabezas ganado	42
Ganadería porcina extensiva	30	> 2.000 m <sup>2</sup> de superficie	42
Establos de ganado caprino	30	> 500 cabezas ganado	42
Establos de ganado ovino	30	> 500 cabezas ganado	42
Establos de ganado bovino	30	> 50 cabezas ganado	42
Establos de ganado equino	30	> 30 cabezas ganado	42
Criaderos de pollos	30	> 2.000 cabezas	42
Criadero de avestruces	30	> 50 cabezas	42
Criadero de pavos	30	> 5.000 cabezas	42
Criadero de perdices	30	> 2.000 cabezas	42
Criadero de abejas	30	> 10 cajas colmenas	42
Criadero de conejos	30	> 2.000 cabezas	42
Estercolero o vertido de purines	45	> 500 m <sup>3</sup> de volumen	63
Balsa de purines	45	> 1.000 m <sup>3</sup> de capacidad	63
Planta de tratamiento de purines	35	> 50.000 m <sup>3</sup> /año de volumen tratado	49
Área de pastoreo intensivo	25	> 5 ha de superficie	35

En el caso de la ganadería porcina intensiva, el valor de la intensidad de presión varía entre 30 y, en el caso de superar las 500 cabezas de ganado, 42; lo que equivale a presiones bajas o moderadas, con un valor de índice IP 2 o 3.

Debido a la ausencia de datos del número de cabezas de ganado que existe en cada explotación, el valor de la intensidad se ha establecido en función del área superficial de cada balsa de purín identificada, de esta manera se relaciona la cantidad de residuo producido en cada granja con la intensidad de presión que ejerce dicha balsa sobre el agua subterránea.

Una vez medida la superficie de todas las balsas localizadas, se asigna a las de menor

tamaño el valor 30, a las de mayor tamaño una intensidad de presión de 42, y valores intermedios al resto de las balsas de purín.

### **2.2.2 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación**

La vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero representa la sensibilidad para verse afectado por la contaminación de origen artificial procedente de las actividades humanas (Foster, 1987).

Según Vrba & Zaporozec (1994) se distinguen dos tipos de vulnerabilidad de las aguas subterráneas:

- La vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea se basa en las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas

del terreno independientemente del tipo de contaminante.

- La vulnerabilidad específica del agua subterránea hace referencia a la capacidad de respuesta del acuífero frente a un contaminante teniendo en cuenta las características químicas y bioquímicas de las sustancias y su interacción con los componentes del medio.

La evaluación de la vulnerabilidad intrínseca constituye una herramienta eficaz para prevenir o corregir las medidas con respecto al uso del terreno y la explotación de los recursos hídricos; para ello existen varias aproximaciones cualitativas que relacionan las características hidrogeológicas de la masa de agua estudiada, aunque la componente subjetiva de la metodología puede influir en el resultado final.

#### 2.2.2.1 Método DRISTPI

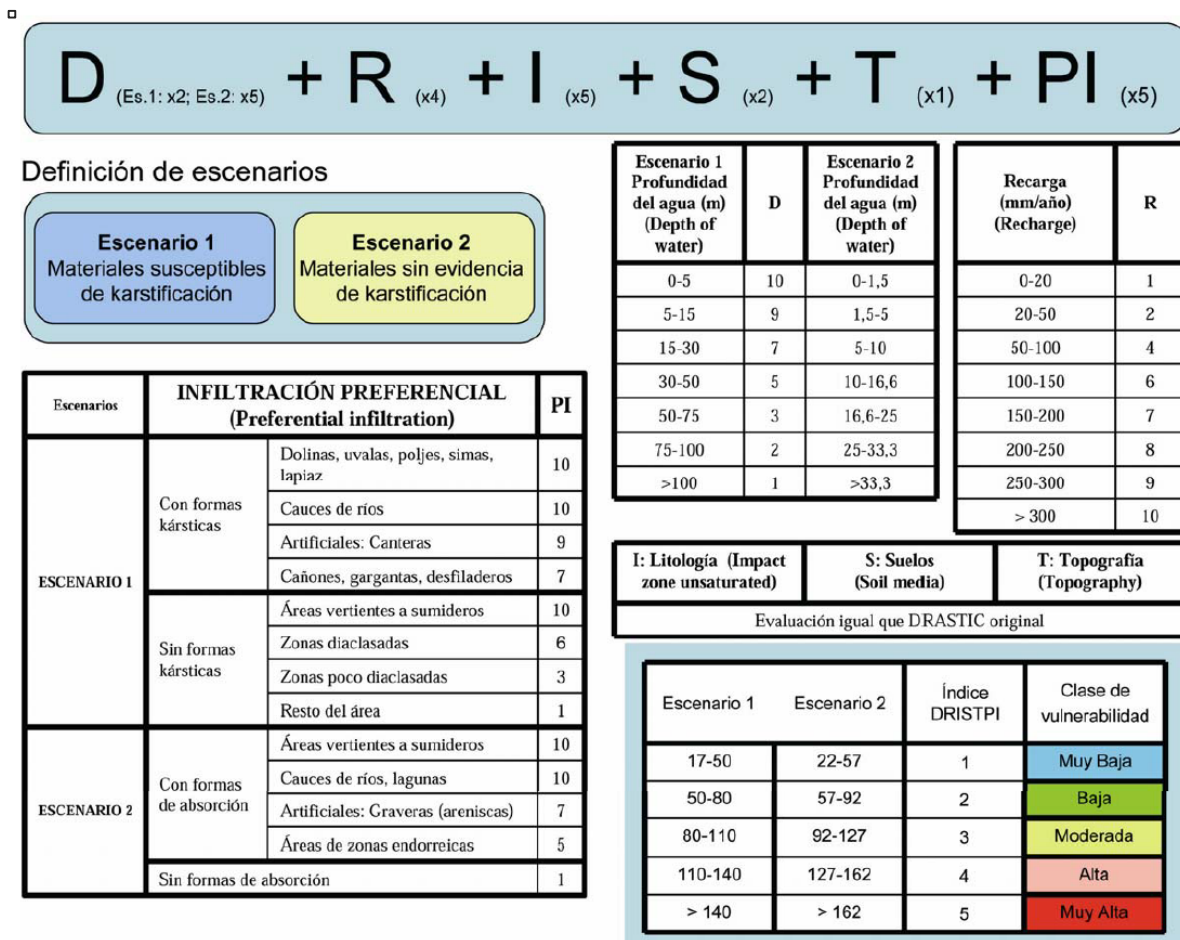
Debido a la presencia de materiales detríticos y carbonatados en la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas se considera que el método DRISTPI (Jiménez Madrid, 2011), caracterizado por su versatilidad de aplicación a todo tipo de medios, es el más adecuado para evaluar la vulnerabilidad intrínseca en la zona de estudio.

El método DRISTPI, basado en la metodología DRASTIC original (Aller, *et al.*, 1987), contempla dos escenarios según la porosidad de los materiales.

- Escenario 1, relativo a materiales susceptibles de karstificación.
- Escenario 2, extendido sobre el resto del área donde no existe evidencia de desarrollo kárstico.

Con respecto al método DRASTIC se suprimen los factores A (litología del acuífero) y C (conductividad hidráulica), los cuales afectan, principalmente, al movimiento del agua en la dimensión horizontal y no en la vertical; de esta manera se prioriza la protección del recurso y no de la fuente y evalúa el tránsito del posible contaminante desde la superficie hasta la zona saturada (Jiménez Madrid, 2011). Además, el método DRISTPI contempla la modificación de rangos y de pesos, así como la incorporación de un nuevo factor de infiltración preferencial (PI) específico para cada escenario.

En la Figura 5 se presentan los valores y los pesos de las variables necesarias para calcular la vulnerabilidad intrínseca mediante el método DRISTPI.



**Figura 5.** Metodología del método DRISTPI. Fuente: Jiménez Madrid, 2011.

Los seis parámetros que intervienen en la caracterización de la vulnerabilidad intrínseca de la masa de agua se describen a continuación.

#### 1) Profundidad del agua (D)

Este parámetro evalúa el espesor de la zona no saturada (ZNS) que atraviesa el agua de infiltración y que puede llevar consigo un contaminante hasta las aguas subterráneas, y se calcula analizando la profundidad a la que se sitúa el nivel piezométrico.

Como se muestra en la Figura 5 la profundidad del agua tiene diferentes rangos

y pesos específicos según se aplique en un escenario u otro. En los acuíferos kársticos las velocidades de tránsito son altas y siguen vías preferenciales de infiltración, por lo tanto, a la hora de proteger el acuífero ante un evento de contaminación el espesor de la ZNS no tiene tanta importancia como en el caso de materiales intergranulares, es por este motivo que el peso de esta variable es menor en materiales carbonatados.

#### 2) Recarga del acuífero (R)

Es la cantidad de agua anual por unidad de superficie que contribuye a la alimentación del acuífero. Esta variable se ha estimado aplicando la metodología APLIS (Andreo, *et*

*al.*, 2004), que permite determinar la tasa media de recarga anual en la zona de estudio en función de la altitud (A), pendiente (P), litología (L), infiltración (I) y suelo (S), en distintos tipos de materiales. Para cada parámetro se establecen una serie de valores (Figura 6) a los que se les asigna un peso de acuerdo con la Ecuación 1.

$$R = (A + P + 3L + 2I + S) / 0,9$$

**Ecuación 1.** Cálculo de la recarga según el método APLIS. Fuente: Andreo, *et al.*, 2004.

<b>Altitud (m)</b>	<b>P</b>
> 2700	10
2400 - 2700	9
2100 - 2400	8
1800 - 2100	7
1500 - 1800	6
1200 - 1500	5
900 - 1200	4
600 - 900	3
300 - 600	2
≤ 300	1

<b>Pendiente (%)</b>	<b>P</b>
≤ 3	10
3 - 8	9
8 - 16	8
16 - 21	7
21 - 31	5
31 - 46	4
46 - 76	3
76 - 100	2
> 100	1

<b>Litología</b>	<b>P</b>
Calizas y dolomías karstificadas	10 - 9
Calizas y dolomías fracturadas algo karstificadas	8 - 7
Calizas y dolomías fisuradas	6 - 5
Arenas y gravas, coluviones	4
Brechas y conglomerados	3
Rocas plutónicas y metamórficas	2
Esquistos, pizarras, limos, arcillas	1

<b>Suelo</b>	<b>P</b>
Litsoles	10
Arenosoles álbicos y Xerosoles cálcicos	9
Regosoles calcáreos y Fluvisoles	8
Regosoles eútricos, dístricos y Solonchaks	7
Cambisoles cálcicos	6
Cambisoles eútricos	5
Histosoles eútricos, Luvisoles órticos y cálcicos	4
Luvisoles crómicos	3
Planosoles	2
Vertisoles crómicos	1

<b>Infiltración-absorción preferencial</b>	<b>P</b>
Abundantes formas de infiltración preferencial	10
Escasas formas de infiltración preferencial	1

**Figura 6.** Puntuaciones asignadas a los parámetros del método APLIS. Fuente: Andreo, *et al.*, 2004.



### 3) Litología de la ZNS (I)

La ZNS influye en los procesos de atenuación en la trayectoria del agua hacia la zona saturada. Este parámetro evalúa el tipo de materiales existentes en dicha zona, correspondiendo los valores más altos a las rocas carbonatadas aflorantes. Los coeficientes de este factor se asignan como en el método DRASTIC y es considerado de manera idéntica en los dos escenarios (Figura 7).

### 4) Naturaleza del suelo (S)

El tipo de suelo que existe sobre la ZNS influye en el desplazamiento vertical del contaminante hacia las aguas subterráneas. Los coeficientes se establecen de igual manera que en el método DRASTIC en los dos tipos de escenarios (Figura 7).

### 5) Topografía (T)

Representa la pendiente de la superficie topográfica e influye en la evacuación de aguas con contaminantes por escorrentía superficial y sub-superficial. En los dos tipos de escenarios se establecen los rangos de este parámetro de igual manera que en el método DRASTIC (Figura 7).

### 6) Infiltración preferencial (PI)

Con la variable PI se evalúan las zonas donde se produce una infiltración rápida. A esta variable se le asigna un peso específico de 5 debido a la importancia que tiene en el funcionamiento del acuífero. Según las características del material y el comportamiento del agua se establece en cada zona un valor que varía desde 1 (mínima vulnerabilidad) hasta 10 (máxima vulnerabilidad) (Figura 5).

<b>Factor I:</b> Naturaleza de la zona no saturada	Rango	Valor
Limo / Arcilla	1 - 2	1
Esquisto / Pizarra	2 - 5	3
Caliza	2 - 7	6
Arenisca	4 - 8	6
Alternancia de arenisca, caliza y arcilla	4 - 8	6
Arena o grava con contenido de limo y arcilla	4 - 8	6
Metamórfica / Ígnea	2 - 8	4
Grava y arena	6 - 9	8
Basalto	2 - 10	9
Caliza kárstica	8 - 10	10

<b>Factor S:</b> Tipo de suelo	Valor
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

<b>Factor T:</b> Pendiente (%)	Valor
0 - 2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
> 18	1

**Figura 7.** Valores de los factores I, S y T del método DRASTIC. Fuente: adaptación de Aller, *et al.*, 1987.

### 2.2.3 Riesgo de contaminación

Basándose en las indicaciones de la Acción COST 620, Jiménez Madrid (2011) define el índice RI (*Risk Index*) para evaluar el riesgo

de contaminación de las aguas subterráneas mediante el producto entre los valores de la intensidad de las presiones y la vulnerabilidad intrínseca previamente obtenidos.

El índice RI se calcula a partir de una matriz de doble entrada (Tabla 4), donde el índice IP y el índice DRISTPI deben estar caracterizados con valores entre 1 y 5 (valor

mínimo y máximo, respectivamente), quedando definidas cinco clases de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

**Tabla 4.** Clases de riesgo, índice RI. Fuente: Jiménez Madrid, 2011.

Índice RI		Vulnerabilidad					Clase de Riesgo
		1	2	3	4	5	
Presión	1	1	2	3	4	5	MUY BAJO
	2	2	4	6	8	10	BAJO
	3	3	6	9	12	15	MODERADO
	4	4	8	12	16	20	ALTO
	5	5	10	15	20	25	MUY ALTO

### 2.3 Delimitación de zonas de alimentación a captaciones

#### 2.3.1 Distribución de captaciones destinadas al consumo humano

La DMA obliga en el artículo 7 a realizar un registro de las captaciones de agua destinadas al consumo humano que proporcionen un promedio de más de 10 m<sup>3</sup> diarios o que abastezcan a más de 50 personas.

#### 2.3.2 Zonas de alimentación a captaciones

La zona de alimentación de la captación (ZAC) es la superficie del terreno que contribuye a la recarga del acuífero mediante la infiltración directa de la precipitación o por infiltración de los cursos de agua, y donde el agua puede ser extraída desde la captación (Bussard, *et al.*, 2006).

Para delimitar las ZAC se utilizan métodos estructurales; métodos hidrodinámicos a partir del nivel piezométrico de los pozos o del régimen de caudales de los manantiales; y métodos complementarios como la caracterización hidroquímica y los análisis de trazadores naturales.

La delimitación de las ZAC en la zona de estudio se contempla en el PHDHG y de esta manera se cumple con los objetivos de la DMA respecto a la necesidad de examinar y proteger el ámbito donde se extrae y de donde procede el agua extraída para consumo humano.

### 2.4 Perímetros de protección

Las actividades antrópicas pueden provocar un deterioro en la calidad de las aguas subterráneas. Con el objetivo de proteger el agua que es obtenida por una captación es necesario delimitar un perímetro de

protección alrededor de la misma y establecer en él las regulaciones requeridas para diversas actividades o instalaciones susceptibles de contaminar las aguas subterráneas (Moreno Merino & Martínez Navarrete, 1991).

La delimitación de los perímetros de protección se realiza a partir de estudios en detalle de las inmediaciones de las captaciones, por lo que deben estar previamente definidos, aprobados y vigentes para ser incorporados directamente en la delimitación de las zonas de salvaguarda.

## **2.5 Delimitación de zonas de salvaguarda para aguas de consumo humano**

Las zonas de salvaguarda son áreas en cuyo ámbito se centran las medidas para proteger las aguas subterráneas con el objetivo de evitar el deterioro de su calidad, contribuyendo así a reducir el nivel de tratamiento de purificación necesario para la producción de agua potable, de acuerdo con el artículo 7.3 de la DMA.

La metodología seguida para la delimitación de las zonas de salvaguarda es la propuesta por Jiménez Madrid (2011) descrita en la Figura 8, donde la combinación e integración de los tres bloques de análisis descritos en los epígrafes anteriores (riesgo de contaminación, zonas de alimentación a captaciones y perímetros de protección) permiten la delimitación de las zonas de

salvaguarda. Se definen cinco clases de protección:

- Zona de salvaguarda con restricciones altas. Contempla las zonas con riesgo alto dentro de las ZAC y la zonificación de los perímetros de protección englobada dentro de la protección interior o próxima, tanto de los perímetros ya definidos y aprobados como los realizados por requisito de la metodología.
- Zonas de salvaguarda con restricciones moderadas. Incluye las zonas con riesgo moderado dentro de las ZAC y la zonificación de los perímetros de protección englobada dentro de la protección exterior o alejada, tanto de los perímetros ya definidos y aprobados como los realizados por requisito de la metodología.
- Zonas de salvaguarda con restricciones bajas. Constituida por las zonas con riesgo de contaminación bajo dentro de las ZAC.
- Zona sin restricciones. Se trata de aquellas zonas con riesgo de contaminación muy bajo dentro de las ZAC debido a una intensidad de las presiones y vulnerabilidad muy bajas.
- Zonas de salvaguarda a futuro. Como indica la DMA, se deben establecer medidas de protección allí donde es posible que el agua subterránea sea destinada a consumo humano en el futuro. Por ello, esta figura de protección incluye aquellas zonas con un riesgo alto y muy

alto de contaminación que se sitúan en el exterior de las ZAC delimitadas previamente.

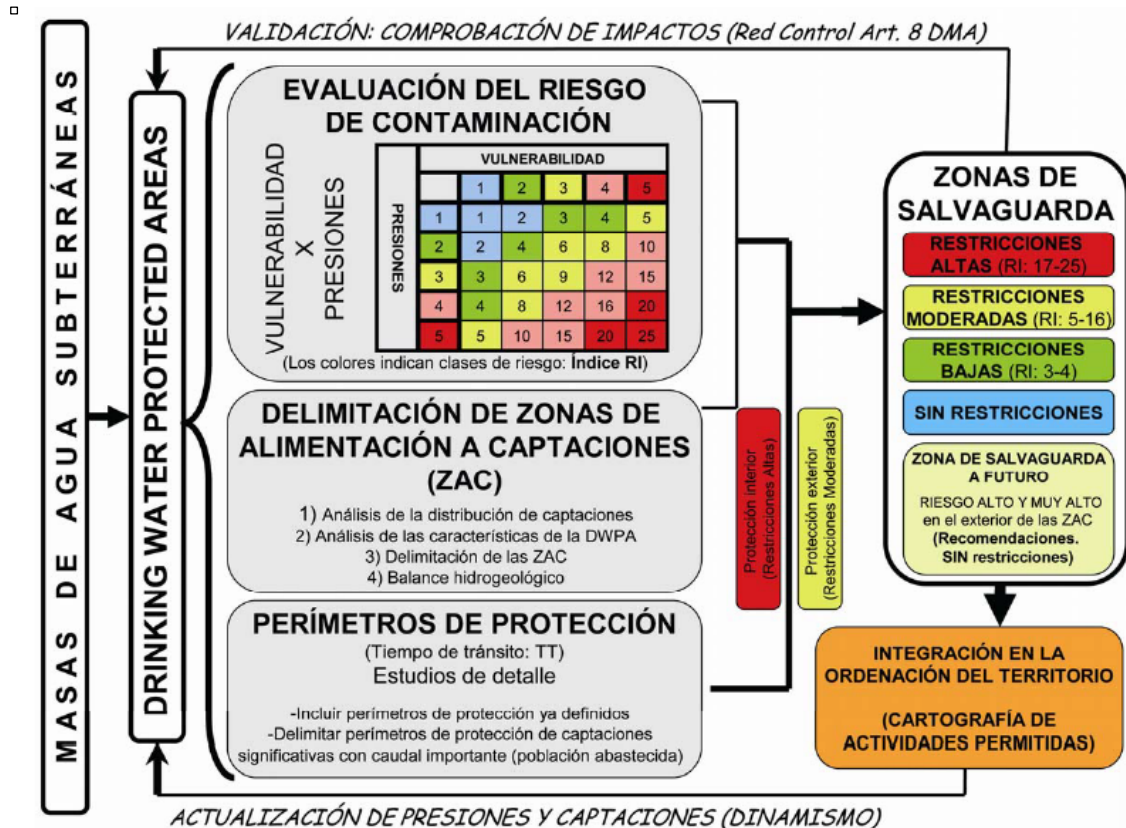


Figura 8. Metodología para la delimitación de zonas de salvaguarda. Fuente: Jiménez Madrid, 2011.

## 2.6 Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas Información Geográfica (SIG) permiten tratar la información disponible para su posterior análisis e interpretación, por lo que resultan una herramienta muy útil en la planificación y gestión hidrológica.

El presente estudio requiere del apoyo de programas, como puede ser ArcMap, que permiten el análisis de las variables, la georreferenciación y elaboración de mapas en la representación final de los resultados.

En el Anexo 1 del presente trabajo se explica el procedimiento detallado de la delimitación de las zonas de salvaguarda en la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas.

### 2.6.1 Fuentes de información

Las fuentes de información empleadas para analizar cada uno de los factores mencionados a lo largo de la metodología se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Fuentes de información.

Fuentes de información		
<b>Inventario de presiones</b>		
IP	Intensidad de presión	Ortofoto PNOA máxima actualidad, hojas: 1005, 1006, 1021, 1022, 1023 y 1037 (IGN, 2013) (1:50.000). Imágenes Google Earth (2015, 2016)
<b>Vulnerabilidad intrínseca</b>		
D	Profundidad	Red piezométrica (REDIAM, 2014)
R	Recarga	APLIS (Andreo, <i>et al.</i> , 2004)
I	Litología ZNS	Hojas MAGNA: 1005, 1006, 1021, 1022, 1023 y 1037 (1:50.000) (IGME, 1981-1983)
S	Suelo	Mapa de suelos (1:400.000) (REDIAM, 2005)
T	Pendiente	MDT 5x5 m, hojas: 1005, 1006, 1021, 1022, 1023 y 1037 (1:25.000) (IGN, 2014)
PI	Infiltración preferencial	Mapa hidrogeológico de España, hoja: 82 (1:200.000) (IGME, 1988) Imágenes Google Earth (2015, 2016)
<b>Delimitación de zonas de alimentación</b>		
ZAC	Zonas de alimentación a captaciones	Perímetros de protección de captaciones (CHG, 2017)
<b>Perímetros de protección</b>		
	Perímetros de protección existentes	Perímetros de protección de captaciones (CHG, 2017)

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Evaluación del riesgo de contaminación

##### 3.1.1 Índice IP

Se ha analizado la presión que ejercen las balsas de purines procedentes de ganadería porcina intensiva sobre las aguas subterráneas de la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas. En total se han localizado 54 presiones repartidas por toda la extensión de la zona estudiada, y una vez inventariadas se ha calculado el índice de intensidad de las mismas (índice IP) como se muestra en el mapa de la Figura 9.

El 83,46% de la extensión es considerada con índice IP bajo, sólo en el caso de balsas de grandes dimensiones se supera el umbral establecido en el epígrafe 2.2.1 (Tabla 2) lo que conlleva a considerar esta presión con un

IP moderado, representando el 0,40% de la zona de estudio.

En las zonas montañosas existentes la intensidad de presión se estima como muy baja, lo que supone el 16,14% de la superficie.

##### 3.1.2 Índice DRISTPI

Los resultados obtenidos en el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca tras la aplicación del método DRISTPI en la masa de agua estudiada se muestran en la Figura 10.

La vulnerabilidad intrínseca predominante es la clase alta (67,19% de la extensión), seguida de la categoría moderada (25,69%). Se encuentran pequeñas áreas de vulnerabilidad baja (2,38%) donde afloran materiales impermeables y el agua se encuentra a mucha profundidad.

En la zona El Peñón y en algunos núcleos de población existen áreas con vulnerabilidad muy alta, lo que representa el 4,74% del total de la superficie estudiada. En cuanto a la vulnerabilidad muy baja, no se detecta ninguna zona con esta categoría.

### **3.1.3 Índice RI**

El mapa de riesgo de contaminación resultante tras la aplicación de la matriz de doble entrada a partir de los índices IP y DRISTPI se muestra en el mapa ilustrado en la Figura 11.

Según los resultados obtenidos tras el cálculo del índice RI, la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas tiene un riesgo de contaminación de las aguas subterráneas predominantemente moderado (77,95% de la superficie).

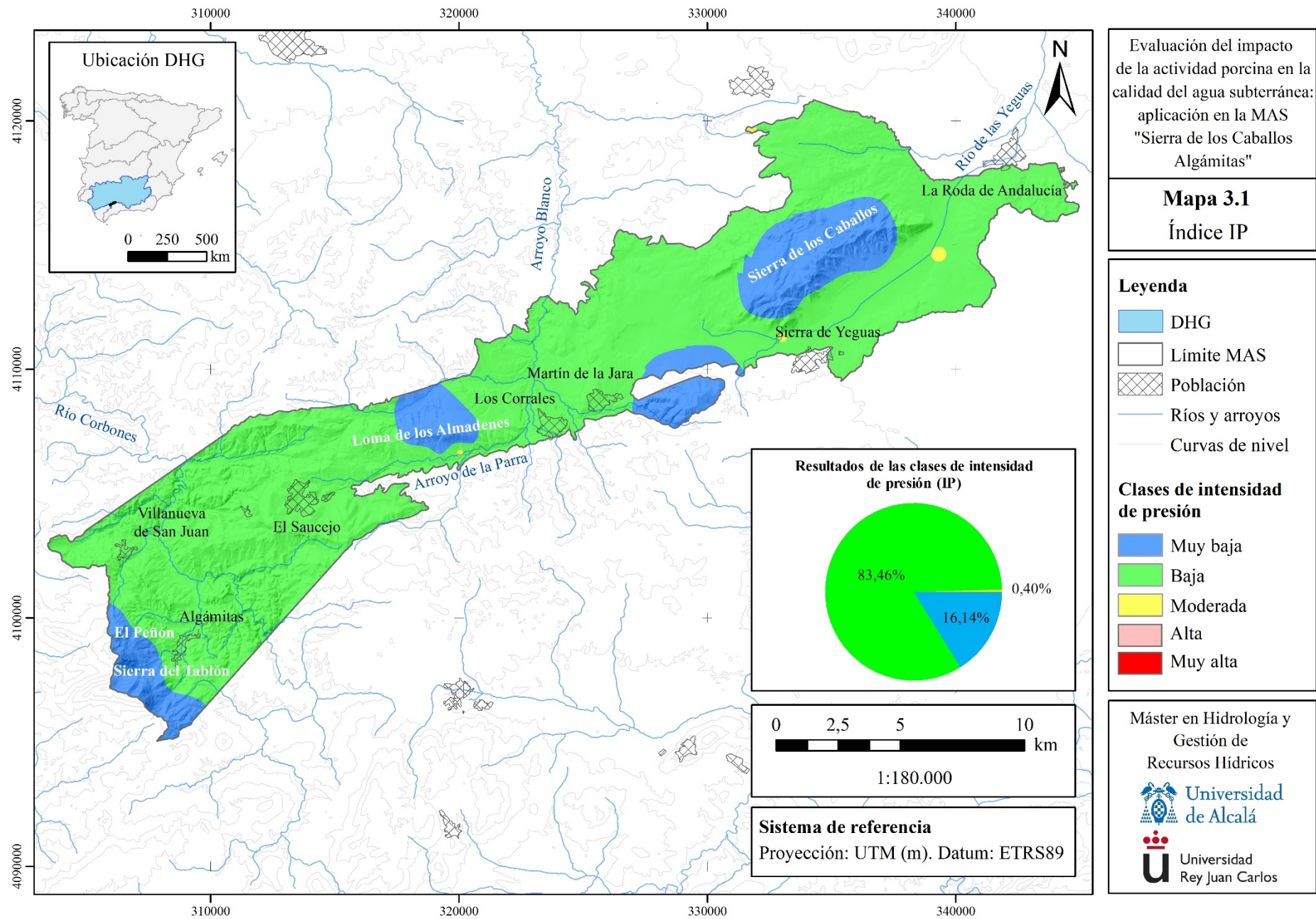
El riesgo es muy bajo donde afloran los materiales de baja permeabilidad con una vulnerabilidad muy baja y las presiones son inexistentes (1,57% de la extensión). La clase de riesgo bajo supone el 15,34% de la superficie analizada y ocupa principalmente los tres afloramientos carbonatados donde no se hallan explotaciones ganaderas.

El entorno de los núcleos de población de El Saucejo, Los Corrales y Martín de la Jara, además de los cauces fluviales, arroyo Blanco y arroyo de la Parra están caracterizados con un RI alto (5,14% del territorio) debido, principalmente, a un índice DRISTPI muy alto al tratarse de zonas de poca profundidad y suaves pendientes (0-2%). En el área estudiada no existen zonas catalogadas con riesgo muy alto de contaminación.

### **3.2 Delimitación de zonas de alimentación a captaciones**

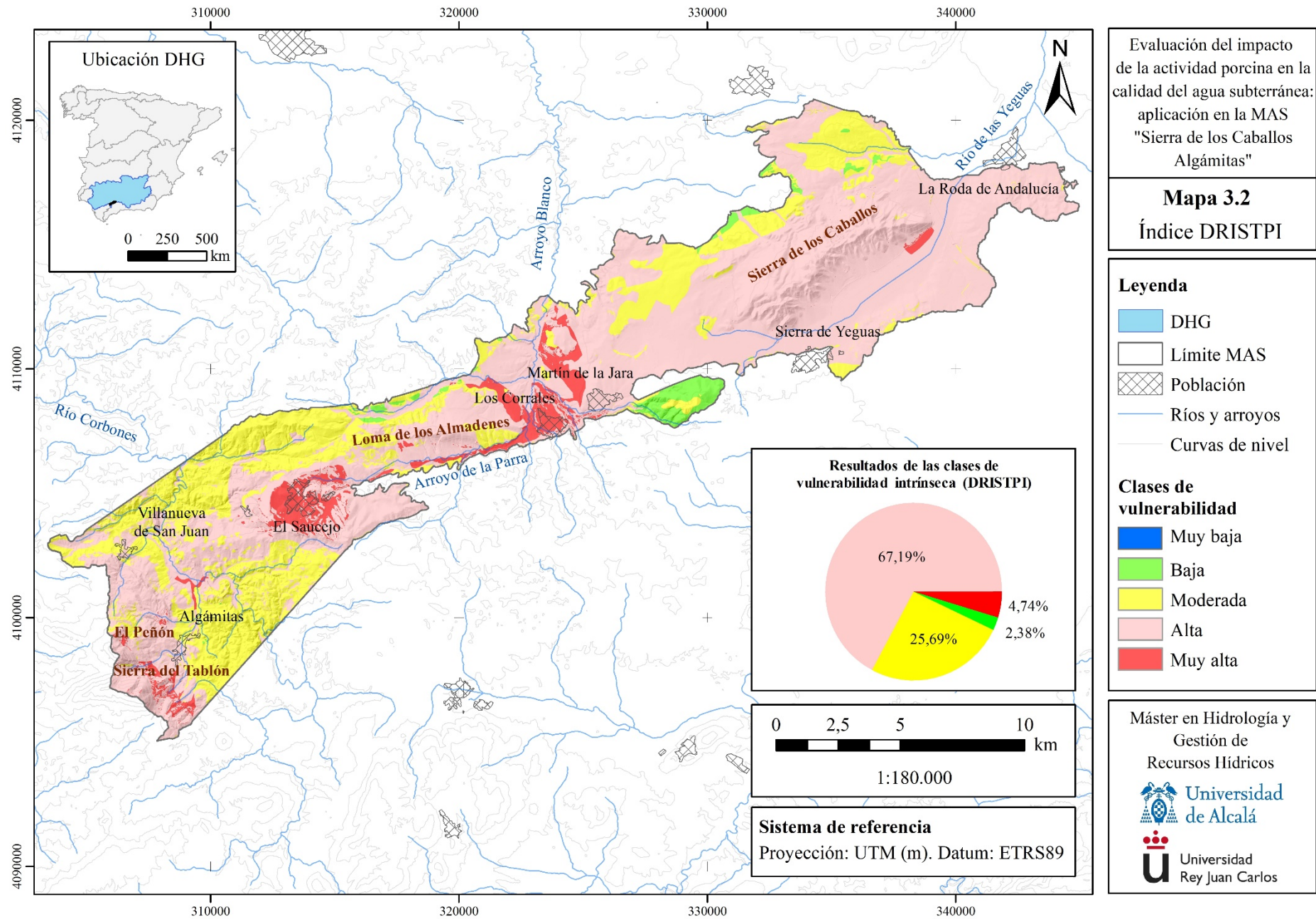
Existe un registro de captaciones destinadas al abastecimiento de poblaciones con las respectivas delimitaciones de las zonas de alimentación en el PHDHG. En total existen 12 captaciones, de las cuales 6 son pozos, 5 sondeos y un manantial.

En la Figura 12 se muestra la delimitación de las ZAC localizadas en la zona de estudio, las cuales ocupan 40,49 km<sup>2</sup>, lo que representa el 15,95% de la superficie total de la MAS.

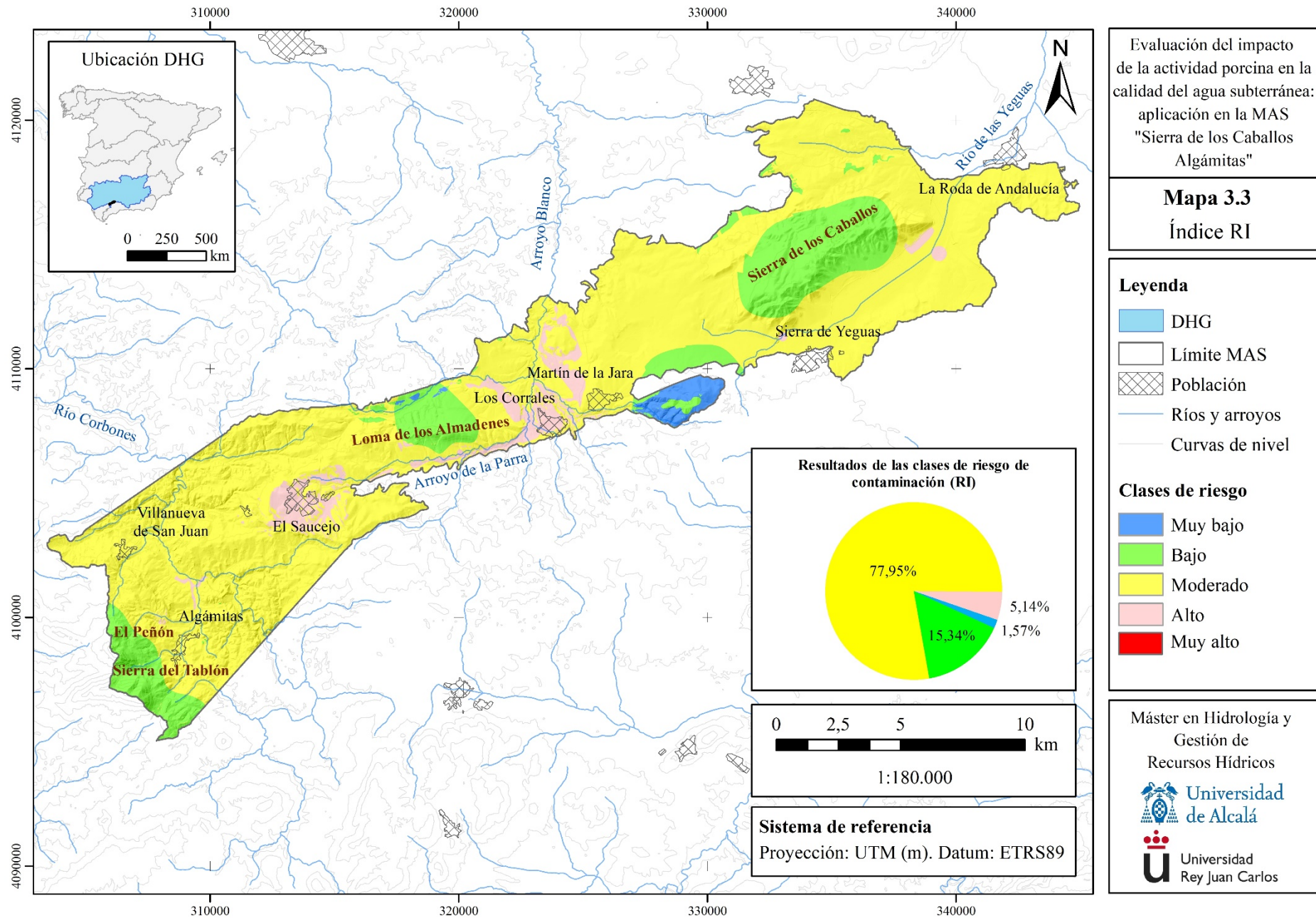


**Figura 9.** Resultados de la intensidad de las presiones sobre las aguas subterráneas de la Sierra de los Caballos - Algámitas. (Índice IP).

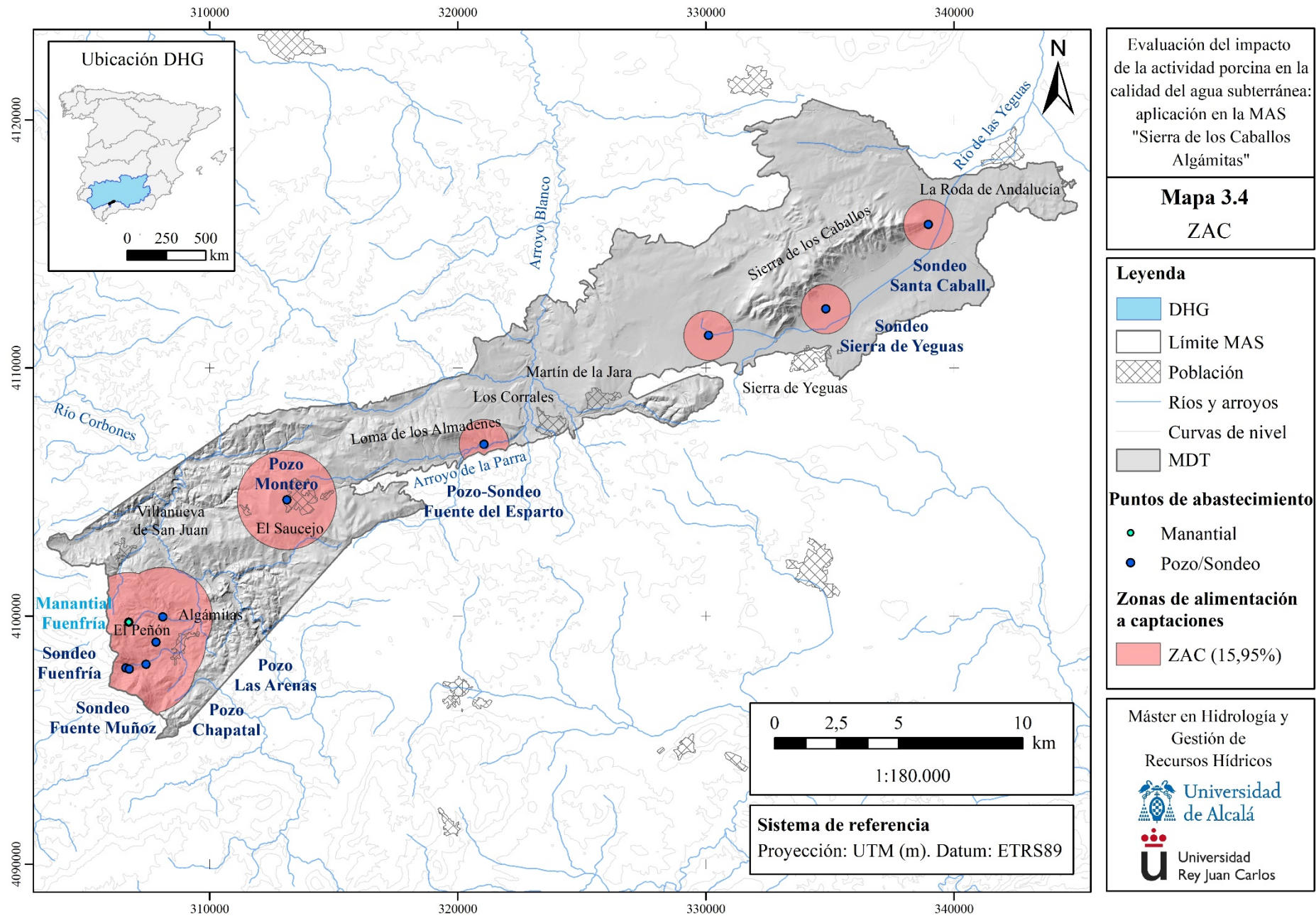




**Figura 10.** Resultados de la vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas de la Sierra de los Caballos - Algámitas (Índice DRISTPI).



**Figura 11.** Resultados del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas de la Sierra de los Caballos - Algámitas (Índice RI).



**Figura 12.** Zonas de alimentación a captaciones de las aguas subterráneas de la Sierra de los Caballos - Algámitas. Fuente: PHDHG, 2016.

### **3.3 Perímetros de protección**

En la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas hay definidos dos perímetros de protección de la calidad de las aguas subterráneas, de acuerdo a lo establecido en el Anejo 5 de zonas protegidas de la Memoria del PH (PHDHG, 2016), y han sido integrados en las zonas de salvaguarda propuestas en el siguiente apartado.

Estos perímetros de protección ocupan 11,78 km<sup>2</sup>, lo que representa el 4,64% de la extensión de la masa y se localizan en las cercanías de la Sierra de los Caballos, como se muestra en el mapa de la Figura 13.

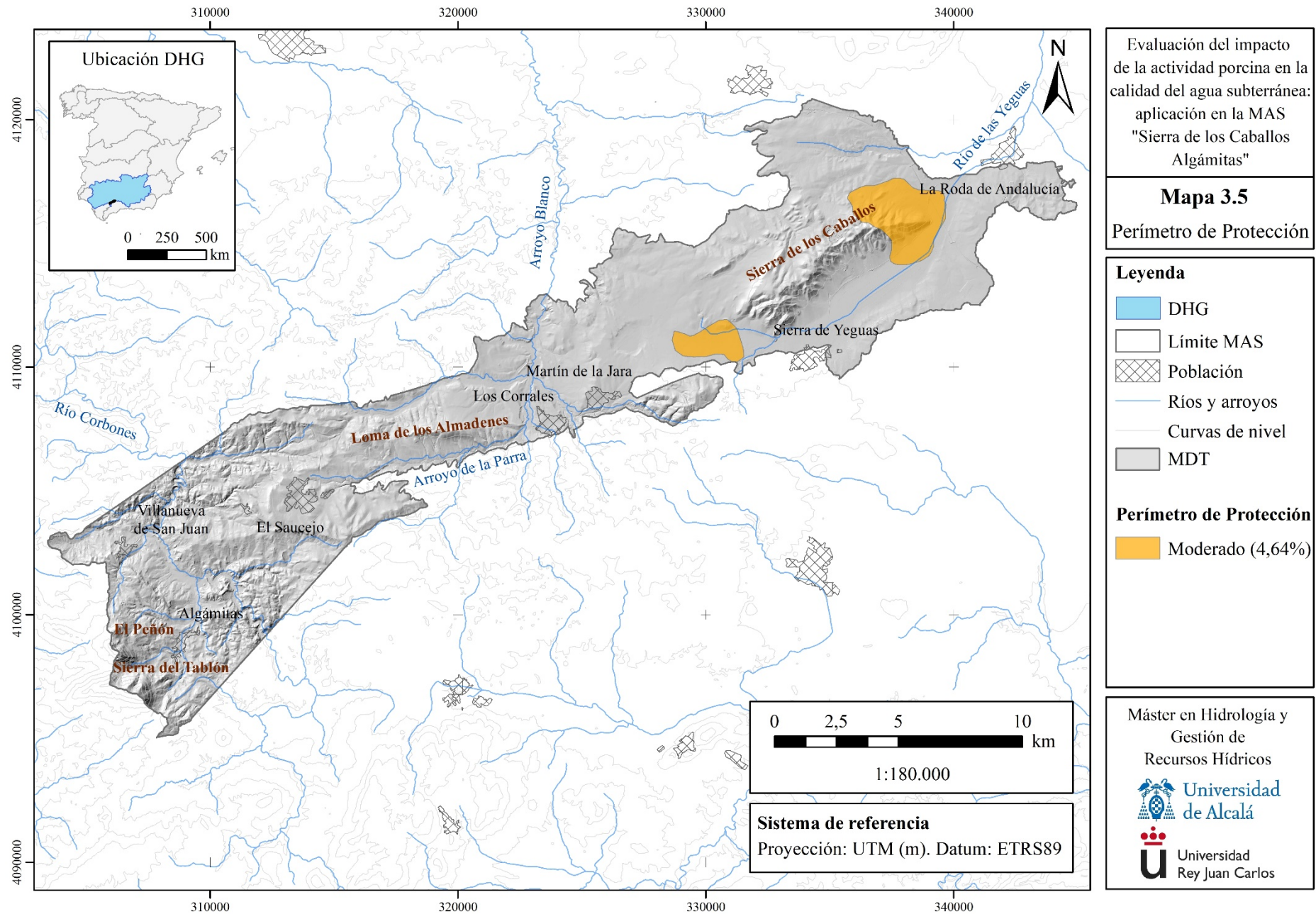
Las restricciones delimitadas en los perímetros de protección implican limitaciones en los usos y en las actividades desarrolladas en los mismos. Al tratarse de perímetros clasificados como zonas de protección moderada, el PHDHG establece que las autorizaciones de actividades porcinas están sujetas a los condicionantes fijados por el gestor del agua correspondiente, en este caso, el Consorcio de Aguas de la Sierra Sur.

### **3.4 Delimitación de zonas de salvaguarda**

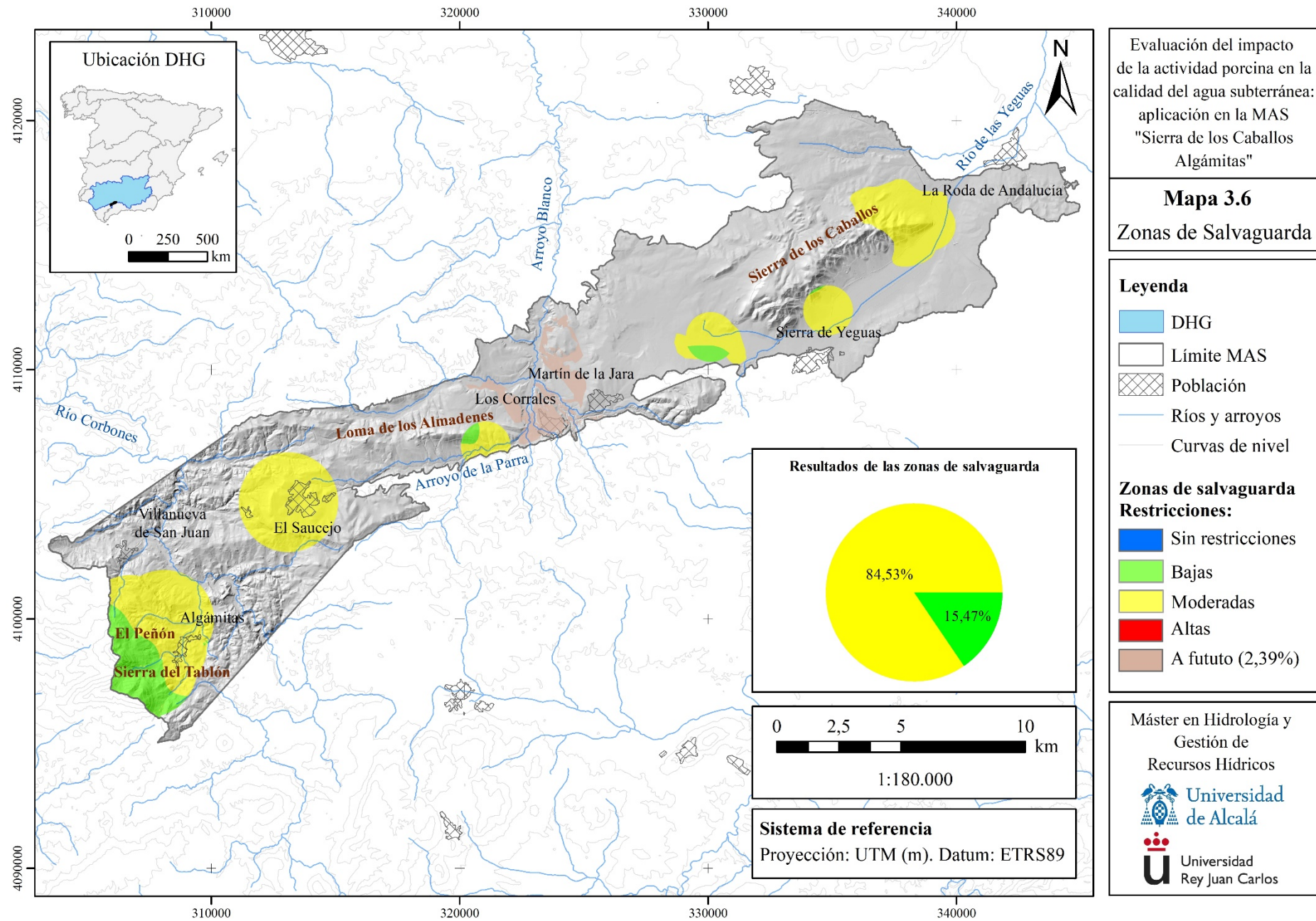
En la Figura 14 se muestran las zonas de salvaguarda delimitadas en la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas para proteger la calidad de las aguas subterráneas destinadas al consumo humano.

Se establecen zonas de salvaguarda en 50,82 km<sup>2</sup>, lo que representa el 20,02% del total de la masa de agua. La mayoría de dichas zonas, el 84,53%, necesita restricciones moderadas para salvaguardar la calidad de las aguas de abastecimiento, mientras que el 15,47% restante necesitaría establecer restricciones bajas. No se han caracterizado zonas sin restricciones ni con restricciones muy altas.

Por otro lado, existen algunas áreas vertientes a sumideros fuera de los límites de las zonas de salvaguarda que se considera que pueden ser utilizadas para abastecimiento humano en el futuro y tienen un índice de riesgo de contaminación alto debido a su elevada vulnerabilidad. Por este motivo, se han definido como zonas de salvaguarda a futuro y representan el 2,39% del total del ámbito analizado.



**Figura 13.** Perímetros de protección existentes en la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas. Fuente: PHDHG, 2016.



**Figura 14.** Delimitación de las zonas de salvaguarda de la Sierra de los Caballos - Algámitas.

#### 4. DISCUSIÓN

La combinación de la presión ejercida por las balsas de purín localizadas junto con los resultados obtenidos en la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca mediante el método DRISTPI indica que más de tres cuartas partes de la masa de agua tiene un índice RI moderado, lo cual se debe a la alta vulnerabilidad intrínseca de la masa de agua, que se caracteriza por la una mezcla heterogénea de arenas, margas y calizas, con permeabilidades medias y altas; y al espesor de la ZNS, que varía entre 0,35 y 10,0 m de profundidad.

Las zonas con riesgo bajo de contaminación se corresponden con los tres afloramientos carbonatados, sin embargo, no presentan la misma vulnerabilidad intrínseca. El índice DRISTPI es muy alto en algunas zonas de El Peñón debido a las formas de infiltración preferencial que existen y a la recarga del acuífero que se produce, entre 250 y 300 mm/año. En cambio, los afloramientos de la Sierra de los Caballos y la Loma de los Almadenes presentan menos desarrollo kárstico y el valor de la recarga se ajusta más a la media de la MAS, que está en torno a 140 mm/año.

La mayoría de las áreas con riesgo de contaminación alto están asociadas a valores de vulnerabilidad intrínseca muy altos; en El Saucejo se puede deber a la profundidad del agua, donde no se superan los 5 m, en cambio, en las cercanías de los núcleos de

Los Corrales y Martín de la Jara se relaciona con las suaves pendientes presentes en las áreas vertientes a sumideros.

Por otro lado, existen seis ZAC que contienen las doce captaciones subterráneas repartidas en toda la extensión de la masa de agua y protegen la cantidad de agua disponible para abastecimiento humano. Asimismo, para preservar la buena calidad del agua subterránea existen dos perímetros de protección en las proximidades de la Sierra de los Caballos, en los municipios de Roda de Andalucía y Martín de la Jara, el cual es el afloramiento más extenso de calizas Jurásicas que se encuentra en la unidad hidrogeológica analizada.

La delimitación de las zonas de salvaguarda es el resultado de combinar el riesgo de contaminación antrópica que existe sobre la MAS, las zonas que garantizan la cantidad de agua que se puede extraer de los acuíferos para abastecer a la población y, por último, los perímetros de protección de la calidad del agua para consumo humano.

Se observa que en la mayor parte de las zonas de salvaguarda las restricciones son moderadas, excepto en las áreas que abarcan zonas abruptas con riesgo de contaminación bajo, donde se establecen restricciones bajas. Además, existen sectores vertientes a ríos con índice DRISTPI muy alto que se considera que deben ser incorporadas a las zonas de salvaguarda en el futuro porque los núcleos

de población de las inmediaciones podrían suministrarse con estas aguas subterráneas.

La ganadería porcina intensiva es una fuente de contaminación puntual que ocupa superficies reducidas, aun así, la intensidad de presión moderada que predomina en la zona de estudio combinada con la alta vulnerabilidad intrínseca de la masa de agua causa que el riesgo de contaminación sea moderado. Cabe destacar que existen once balsas de purín sobre áreas catalogadas con vulnerabilidad intrínseca muy alta, lo que lleva a pensar que quizá este sea el origen de la contaminación por nitratos que existe actualmente en la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas.

## 5. CONCLUSIONES

El agua subterránea es un recurso imprescindible como fuente de abastecimiento, y es necesario proteger el ámbito donde se extrae y de donde procede el agua teniendo en cuenta las actividades socioeconómicas que pueden generar alguna afección sobre el agua, como puede ser la ganadería porcina intensiva, mediante la aplicación de estrategias preventivas de protección.

Con la delimitación de las zonas de salvaguarda se agrupan las medidas de protección en el ámbito de la masa de agua donde es necesario asegurar la calidad de las aguas subterráneas empleadas para consumo humano y reducir el tratamiento de las

mismas, de manera que se cumpla con las recomendaciones planteadas en el artículo 7.3 de la DMA.

Teniendo en cuenta esta observación, las granjas porcinas que se encuentran en el interior de las zonas de salvaguarda definidas representan el 37% de las explotaciones identificadas en el área de estudio, por lo que deben ser reubicadas fuera de los límites de las zonas de salvaguarda como medida correctiva para recuperar el buen estado químico de la masa de agua requerido por la DMA.

Las granjas deberían emplazarse en zonas clasificadas con vulnerabilidad intrínseca baja o moderada, donde predominen los materiales poco permeables y el nivel piezométrico se sitúe a la suficiente profundidad para garantizar la calidad de agua adecuada para consumo humano.

Debido a la variabilidad temporal de algunos parámetros que forman parte de la metodología desarrollada para delimitar las zonas de salvaguarda, como son la ubicación de una nueva explotación porcina o un nuevo punto de extracción de agua, se debe mantener actualizado el inventario de presiones y la delimitación de las nuevas zonas de alimentación de captaciones. Estudios de este tipo, en los cuales son fundamentales los SIG, son una herramienta de gran utilidad para alcanzar el objetivo de buen estado de las masas de agua que busca la DMA.



## 6. RECOMENDACIONES

Para prevenir la contaminación de la calidad del agua subterránea procedente de los nitratos de la ganadería porcina intensiva se plantean las siguientes sugerencias.

Es necesario coordinar los ámbitos sociales, económicos, ambientales y sanitarios que intervienen en la gestión del agua subterránea, y tener en cuenta que el buen estado de las MAS es una condición básica y prioritaria sobre la que se debe sostener toda política y medida de gestión ganadera.

El seguimiento y vigilancia por parte de la Administración debe ser más exhaustivo, controlando que las granjas no sobrepasen el número de cabezas de ganado autorizado, que no se produzcan vertidos directos a cauces públicos, que las balsas estén debidamente diseñadas para evitar posibles filtraciones y que se respeten todas las medidas de prevención. Además, las sanciones deben ser rigurosas, para que no resulte más rentable infringir la norma y pagar la sanción, abordando así el principio de la DMA “quien contamina paga”.

Se debe prohibir el establecimiento de actividades ganaderas porcinas dentro de los límites de las zonas de salvaguarda como

medida preventiva contra posibles contaminaciones futuras por nitratos. De esta manera, se garantiza la disponibilidad del recurso en condiciones adecuadas de calidad para el abastecimiento de las poblaciones, cumpliendo la Directiva 91/676/CE, que limita la concentración de nitratos de origen agrario a 50 mg/l.

Asimismo, con la reordenación de las explotaciones porcinas en las que se debe limitar el número de cabezas de ganado, dando preferencia a las pequeñas explotaciones frente a la ganadería intensiva, se reduce el volumen de purín producido y por consiguiente se facilita la conexión entre la ganadería y la superficie agraria disponible.

También se puede mejorar la gestión de los purines en las granjas mediante la digestión anaerobia. Este tratamiento descompone el purín en ausencia de aire y produce gas metano, que, si bien el rendimiento energético no es muy elevado, se puede emplear en las propias explotaciones ganaderas. El sólido resultante del proceso es apropiado para abonar la tierra porque contiene menos materia orgánica contaminante y se reduce la filtración hacia los acuíferos.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Aller, L., Lehr, J., Petty, R., & Bennett, T. (1987). *DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. National Water Well Association, Worthington, Ohio, United States of America.
- Andreo, B., Vías, J., López-Geta, J., Carrasco, F., Durán, J., & Jiménez, P. (2004). *Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos*. *Boletín geológico y minero*, 115(2), 177-186.
- BOJA. (2008). *Decreto 36/2008, de 5 de febrero, por el que se designan las zonas vulnerables y se establecen medidas contra la contaminación por nitratos de origen agrario*. *Boletín número 36 de 20/02/2008*. *Boletín Oficial de la Junta de Andalucía*.
- Bussard, T., Tacher, L., Parriaux, A., & Maître, V. (2006). *Methodology for delineating groundwater protection areas against persistent contaminants*. *Quarterly journal of engineering geology and hydrogeology*, 39(1), 97-109.
- CHG. (2017). *Captaciones de abastecimiento subterráneas y perímetros de protección*. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Recuperado en julio de 2017, de [http://www.chguadalquivir.es/descargaside/-](http://www.chguadalquivir.es/descargaside/)
- /document\_library\_display/fqkjz7RcvSpB/view/419713?\_110\_INSTANC E\_fqkjz7RcvSpB\_redirect=http%3A%2F%2Fwww.chguadalquivir.es%2Fdescargaside%2F-%2Fdocument\_library\_display%2Ffqkjz7RcvSpB%2Fview%2F54511%3F\_110\_INSTANC
- Consejería de Medio Ambiente. (1997). *Incidencias ambientales y medidas correctoras en sectores agroalimentarios*. Capítulo II: Sector de explotaciones ganaderas. Junta de Andalucía.
- Consejería de Medio Ambiente. (2011). *Guía práctica de calificación ambiental*. Explotaciones ganaderas. Junta de Andalucía. 59 páginas.
- Consejo Europeo. (1991). *Directiva 91/676/CE, de 12 de diciembre de 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura*. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 375, 1-8.
- Foster, S. (1987). *Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy: International Conference, 1987, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution The Hague*. Netherlands Organization for Applied Scientific Research.

- Netherlands Organization for Applied Scientific Research.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2003). Protección de la calidad del agua subterránea. Banco Mundial.
- IGME. (1981-1983). *MAGNA 50 - Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (2ª Serie)*. Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado en junio de 2017, de <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx?language=es>
- IGME. (1988). *Mapa Hidrogeológico de España a escala 1:200.000*. Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado en junio de 2017, de <http://info.igme.es/cartografía/hidrogeologico200.asp>
- IGN. (2013). *Ortofoto PNOA Máxima Actualidad*. Instituto Geográfico Nacional. Recuperado en junio de 2017, de <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- IGN. (2014). *Modelo Digital del Terreno - MDT05*. Instituto Geográfico Nacional. Recuperado en junio de 2017, de <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Jiménez Madrid, A. (2011). Estudio metodológico para el establecimiento de zonas de salvaguarda de masas de agua subterránea en acuíferos carbonatados utilizadas para consumo humano. Aplicación de la Directiva Marco del Agua. *Tesis doctoral*. Universidad de Málaga.
- MAPA. (2006). Guía de mejores técnicas disponibles del sector porcino. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ministerio de Medio Ambiente. 250 páginas.
- MARM. (2010). Caracterización de sistemas de gestión de deyecciones. Sector porcino intensivo. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 41 páginas.
- MIMAM. (1999). Estudio sobre la calidad de las aguas subterráneas empleadas para abastecimiento público de la provincia de Sevilla. Ministerio de Medio Ambiente. 278 páginas.
- Moreno Merino, L., & Martínez Navarrete, C. (1991). *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas: lucha contra la contaminación (No. 556.3 MOR)*. Instituto GeoMinero de España.
- OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable. Primer apéndice. Volumen 1: Recomendaciones. Organización Mundial de la Salud.
- PHDHG. (2016). *Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del*

- Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro.*  
Boletín Oficial del Estado.
- REDIAM. (2005). *Mapas de suelos. Red de Información Ambiental de Andalucía.* Recuperado en julio de 2017, de [http://descargasrediam.cica.es/repo/s/RUR?path=%2F04\\_RECURSOS\\_NATURALES%2F02\\_GEODIVERSIDAD%2F04\\_SUELOS%2F01\\_MAPAS\\_SUELOS%2FSuelos\\_400000](http://descargasrediam.cica.es/repo/s/RUR?path=%2F04_RECURSOS_NATURALES%2F02_GEODIVERSIDAD%2F04_SUELOS%2F01_MAPAS_SUELOS%2FSuelos_400000)
- REDIAM. (2014). *Piezometría de Andalucía. Red de Información Ambiental de Andalucía.* Recuperado en julio de 2017, de [http://descargasrediam.cica.es/repo/s/RUR?path=%2F04\\_RECURSOS\\_NATURALES%2F04\\_AGUAS%2F02\\_SUBTERRANEAS%2FPiezometria\\_Andalucia](http://descargasrediam.cica.es/repo/s/RUR?path=%2F04_RECURSOS_NATURALES%2F04_AGUAS%2F02_SUBTERRANEAS%2FPiezometria_Andalucia)
- Sánchez, D. (2010). *Aplicación de la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE en la cuenca hidrográfica del río Guadalhorce (Málaga). Caracterización inicial (Doctoral dissertation, Tesis Doctoral. Universidad de Málaga).*
- UNESCO. (2017). *El agua subterránea en un medio ambiente cambiante. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.* Recuperado en junio de 2017, de <http://www.unesco.org/new/es/office-in-montevideo/ciencias-naturales/water-international-hydrological-programme/aguas-subterranas/>
- Unión Europea. (2000). *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.* DO L, 327.
- Unión Europea. (2006). *Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.* DO L, 372.
- Vrba, J., & Zaporozec, A. (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability.* Heise.
- Zwahlen, F. (2004). COST Action 620. Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers. Final Report. 315 páginas.

## 8. ANEXOS

### Anexo 1. Metodología detallada de la delimitación de las zonas de salvaguarda

Haciendo uso del software ArcMap v10.1 se han delimitado las zonas de salvaguarda en la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas.

Para calcular los índices IP, DRISTPI, RI y delimitar las zonas de salvaguarda, todas las capas deben estar en formato ráster y con las mismas propiedades espaciales y resolución. En este caso, la capa del MDT disponible en el IGN tiene una resolución de 5 metros y el

sistema de referencia espacial oficial en España es ETRS 89 – UTM Zona 30N, por lo que el resto de las capas deben tener las mismas características.

#### 1. Intensidad de presión (índice IP)

Para determinar la intensidad de presión que existe sobre la masa de agua estudiada, en primer lugar, hay que localizar las granjas de cerdos a partir de las ortofotos del PNOA y de las imágenes disponibles en Google Earth. En la siguiente imagen se muestran las balsas de purín correspondientes a las granjas identificadas (Figura A1-1).

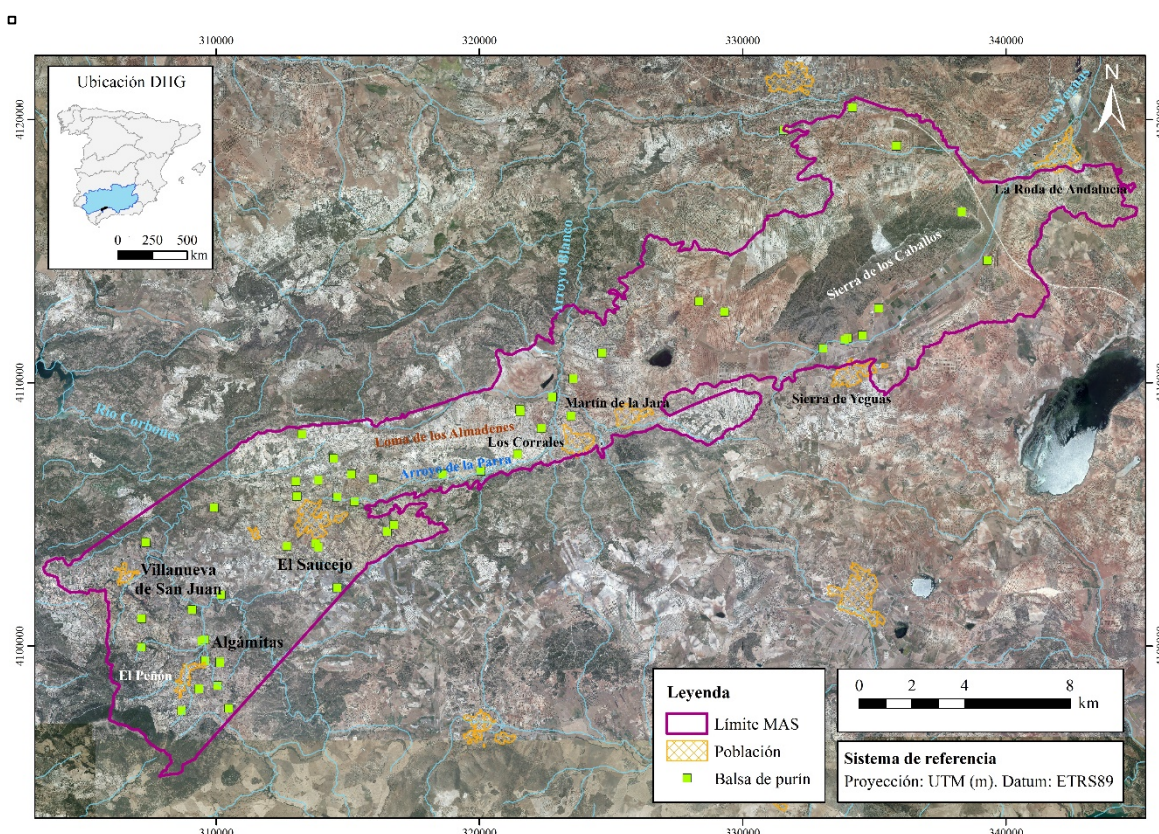


Figura A1-1. Identificación de presiones sobre la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas.

Tras identificar las granjas y asignarles las coordenadas, se ha medido la superficie de

las balsas de purín, y en función del área superficial de las mismas se establece la

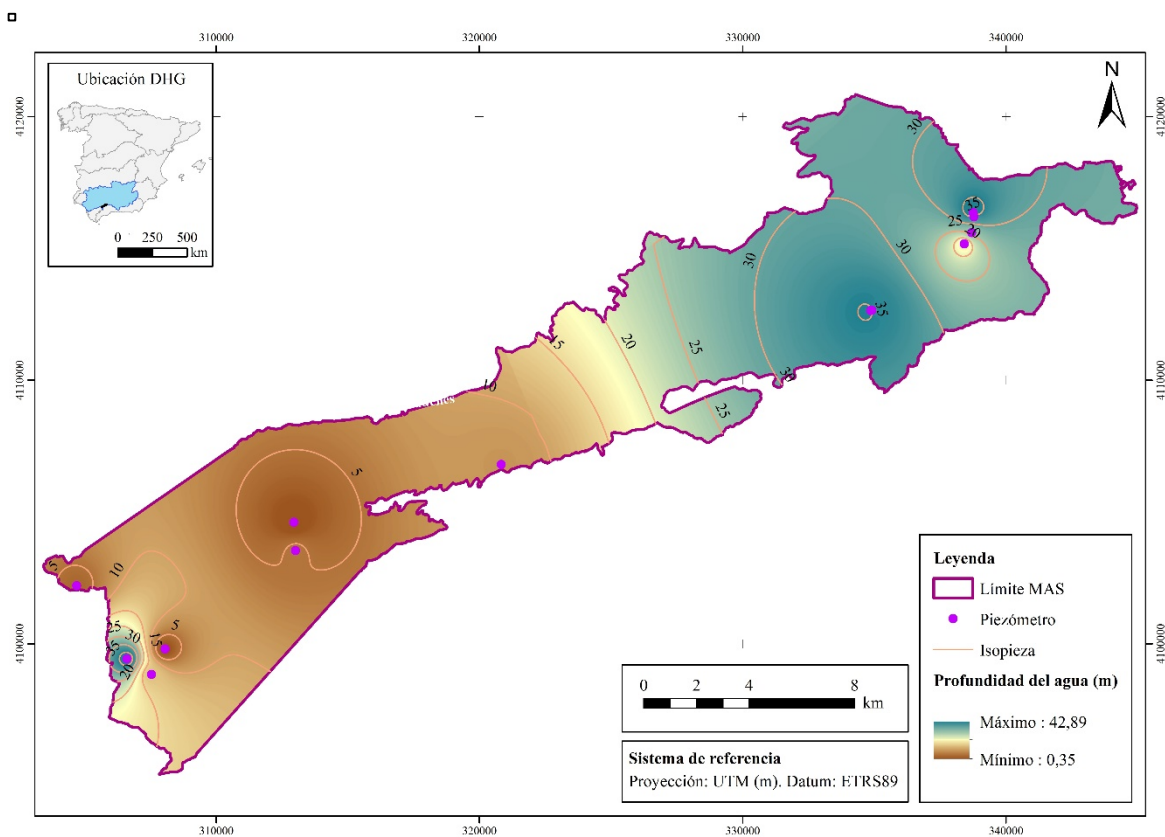
intensidad de presión para posteriormente asignar el valor del índice IP empleando la opción *3D Analyst Tools/ Raster Reclass/ Reclassify* contenida en *ArcToolbox*.

El resultado de este procedimiento se muestra en el mapa ilustrado en la Figura 9.

## 2. Vulnerabilidad intrínseca (método DRISTPI)

### D (Profundidad)

A partir de los datos registrados en los 13 piezómetros existentes sobre la MAS analizada, se extrapolan los valores de la profundidad del agua para toda la extensión de la masa de agua con la ayuda de la opción *ArcToolbox/ Spatial Analyst Tools/ Interpolation/ IDW* (Figura A1-2).



**Figura A1-2.** Profundidad del agua en la MAS Sierra de los Caballos – Algámitas.

A continuación, se clasifican los resultados de acuerdo a los rangos recogidos en la Figura 5 utilizando la herramienta *Reclassify* (*ArcToolbox/ Analyst Tools/ Raster Reclass/ Reclassify*).

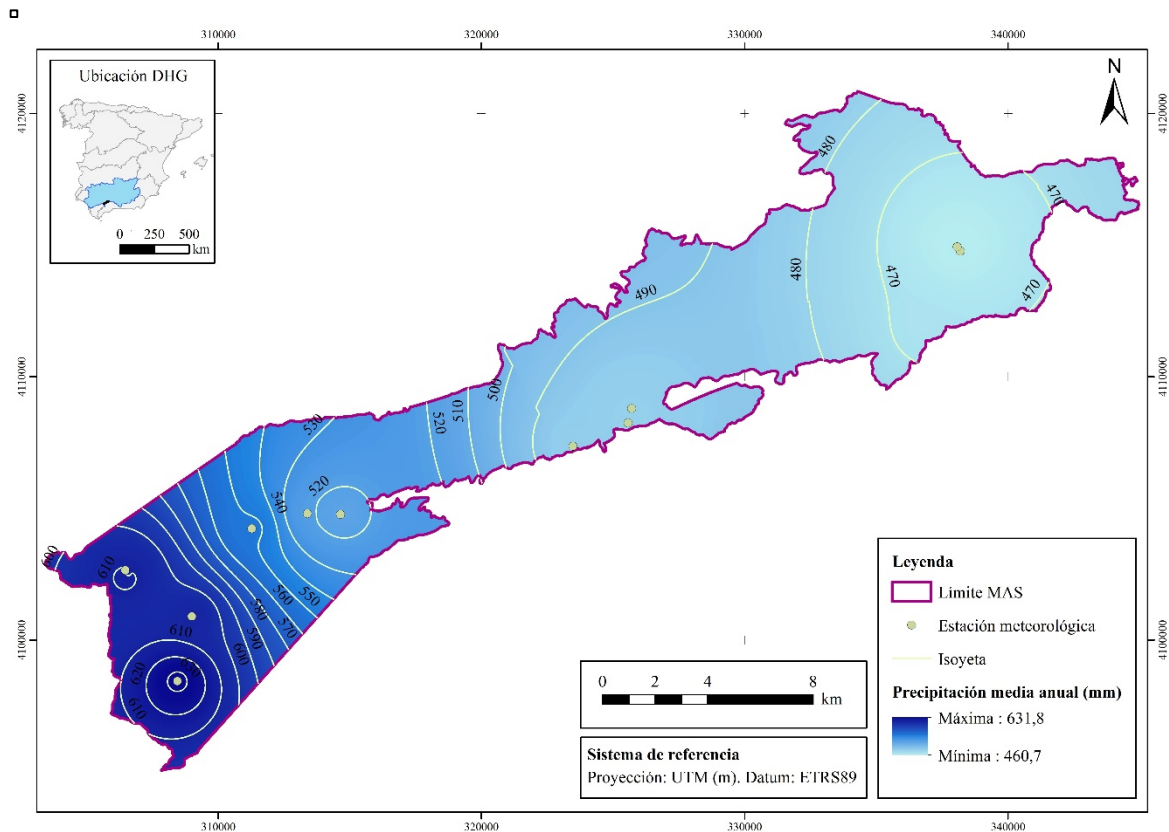
### R (Recarga)

El cálculo la recarga del acuífero se ha realizado como el producto de la precipitación media anual por la tasa de recarga del acuífero.

A partir de los datos registrados en las 11 estaciones meteorológicas ubicadas en el

interior de la zona de estudio, gestionadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), se extrapolan los valores de la

precipitación media anual con la ayuda de la opción *ArcToolbox/ Spatial Analyst Tools/ Interpolation/ IDW* (Figura A1-3).



**Figura A1-3.** Precipitación media anual (mm) en la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas.

La tasa de recarga del acuífero se ha calculado siguiendo la metodología APLIS.

- **Altitud:** para obtener este parámetro se reclasifican los datos de las cotas contenidos en la capa del MDT según los coeficientes de la Figura 6 con la herramienta *ArcToolbox/ Analyst Tools/ Raster Reclass/ Reclassify*).
- **Pendiente:** primero se deben calcular los valores de las pendientes en formato % a partir del MDT con la herramienta *ArcToolbox/ 3D Analyst Tools/ Raster Surface/ Slope*, y a continuación se

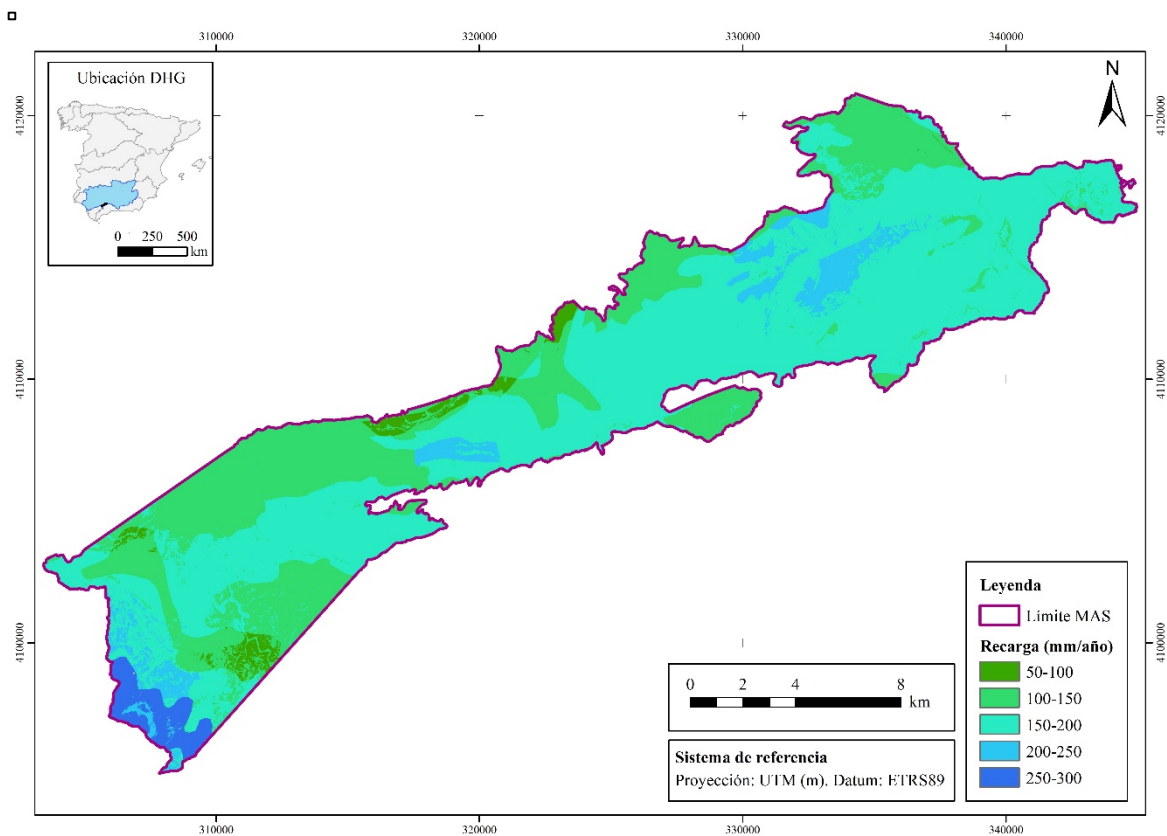
reclasifican estas cifras (*ArcToolbox/ Analyst Tools/ Raster Reclass/ Reclassify*) de acuerdo a los rangos que se muestran en la Figura 6.

- **Litología:** se parte de una capa vectorial que se debe convertir en formato ráster (*ArcToolbox/ Conversion Tools/ To Raster/ Feature to Raster*) y posteriormente se asignan los valores recogidos en la Figura 6 con la opción *ArcToolbox/ Analyst Tools/ Raster Reclass/ Reclassify*.

- Infiltración: se analiza la presencia de formas de infiltración preferencial en la capa de litología y se establecen los valores correspondientes con la herramienta *ArcToolbox/ Analyst Tools/ Raster Reclass/ Reclassify*, según lo expuesto en la Figura 6.
- Suelo: la capa vectorial con la información edáfica de la zona se convierte a formato ráster (*ArcToolbox/ Conversion Tools/ To Raster/ Feature to*

*Raster*) y después se asigna un coeficiente a cada tipo de suelo según lo expuesto en la Figura 6 con la opción *ArcToolbox/ Analyst Tools/ Raster Reclass/ Reclassify*.

Por último, para calcular la recarga del acuífero se multiplican las dos capas ráster creadas anteriormente con la herramienta *Raster Calculator (ArcToolbox/ Spatial Analyst Tools/ Map Algebra/ Raster Calculator)* y se obtiene el mapa de recarga (Figura A1-4).



**Figura A1-4.** Recarga del acuífero (mm/año) en la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas.

### I (Litología de la zona no saturada)

Tras convertir la capa vectorial de la litología de la zona estudiada a formato ráster (*ArcToolbox/ Conversion Tools/ To Raster/ Feature to Raster*) y teniendo en cuenta

también la capacidad permeable de cada material, se establecen los coeficientes de acuerdo a los rangos del método DRISTPI expuestos en la Figura 7, con la herramienta



Reclassify (ArcToolbox/ Analyst Tools/ Raster Reclass/ Reclassify).

En el mapa ilustrado en la Figura A1-5 se muestra el resultado de este cálculo.

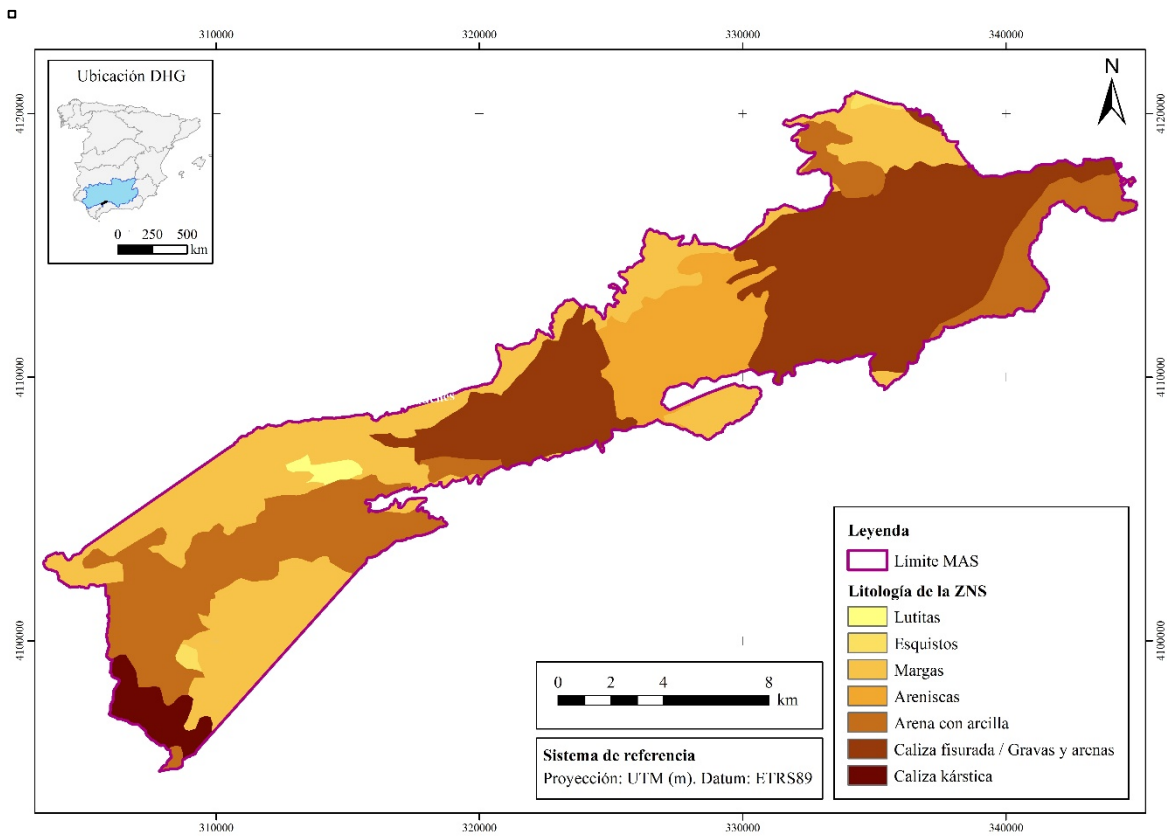


Figura A1-5. Litología de la ZNS de la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas.

### S (Tipo de suelo)

Tras convertir la capa vectorial de las características edáficas a formato ráster (*ArcToolbox/ Conversion Tools/ To Raster/ Feature to Raster*), se asignan los

coeficientes expuestos en la Figura 7 a cada tipo de suelo con la opción *ArcToolbox/ Analyst Tools/ Raster Reclass/ Reclassify*.

El resultado de este procedimiento se expone en la Figura A1-6.

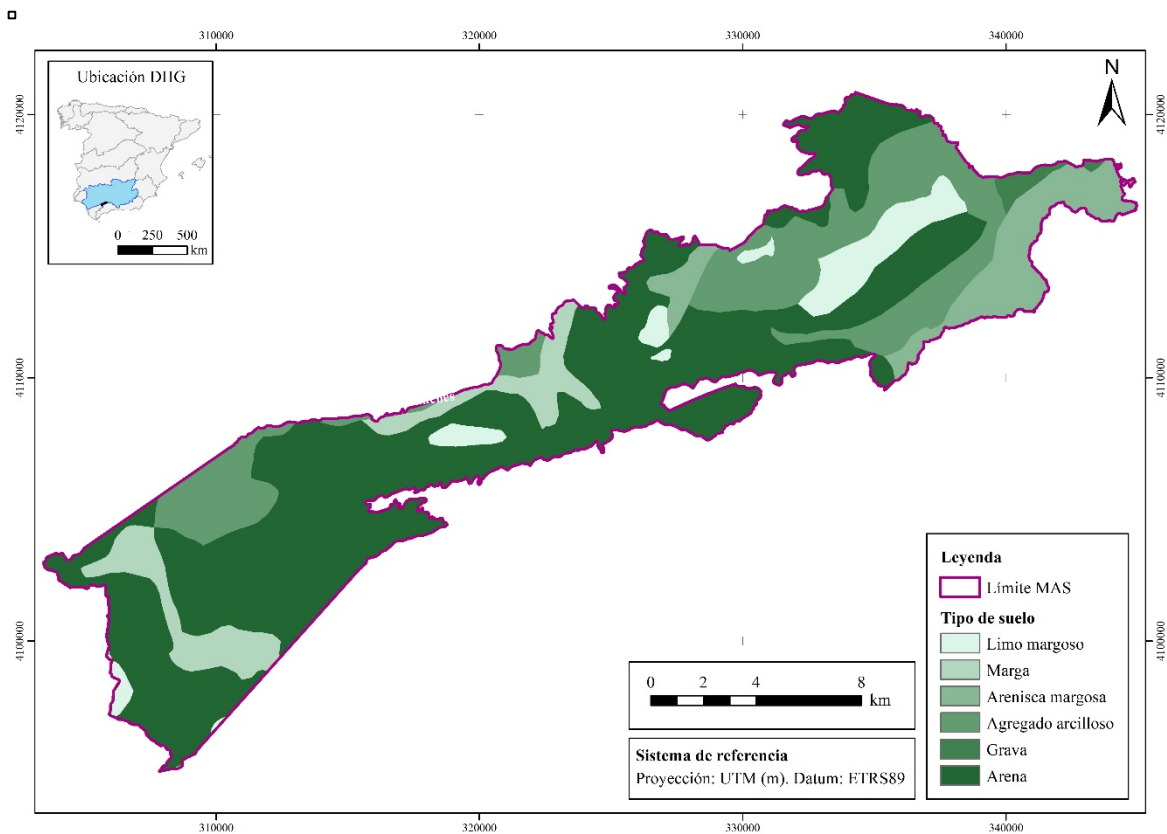


Figura A1-6. Tipo de suelo sobre la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas.

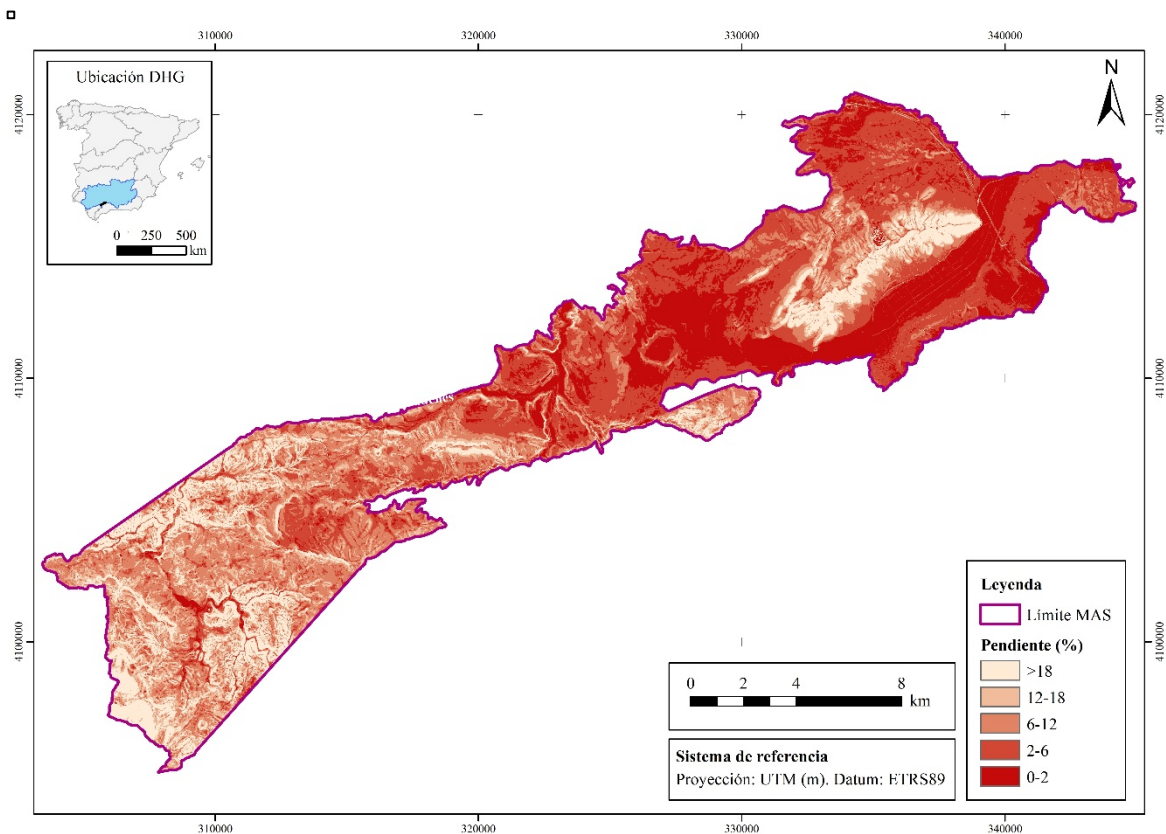
## T (Topografía)

Las pendientes del terreno se calculan a partir del MDT con la herramienta *Slope* (ArcToolbox/ *3D Analyst Tools/ Raster Surface/ Slope*).

Tras obtener los valores de las pendientes en forma de %, se asignan los coeficientes

expuestos en la Figura 7 con la función *ArcToolbox/ Analyst Tools/ Raster Reclass/ Reclassify*.

En la Figura A1-7 se muestran las pendientes del terreno de la zona estudiada en formato de %.



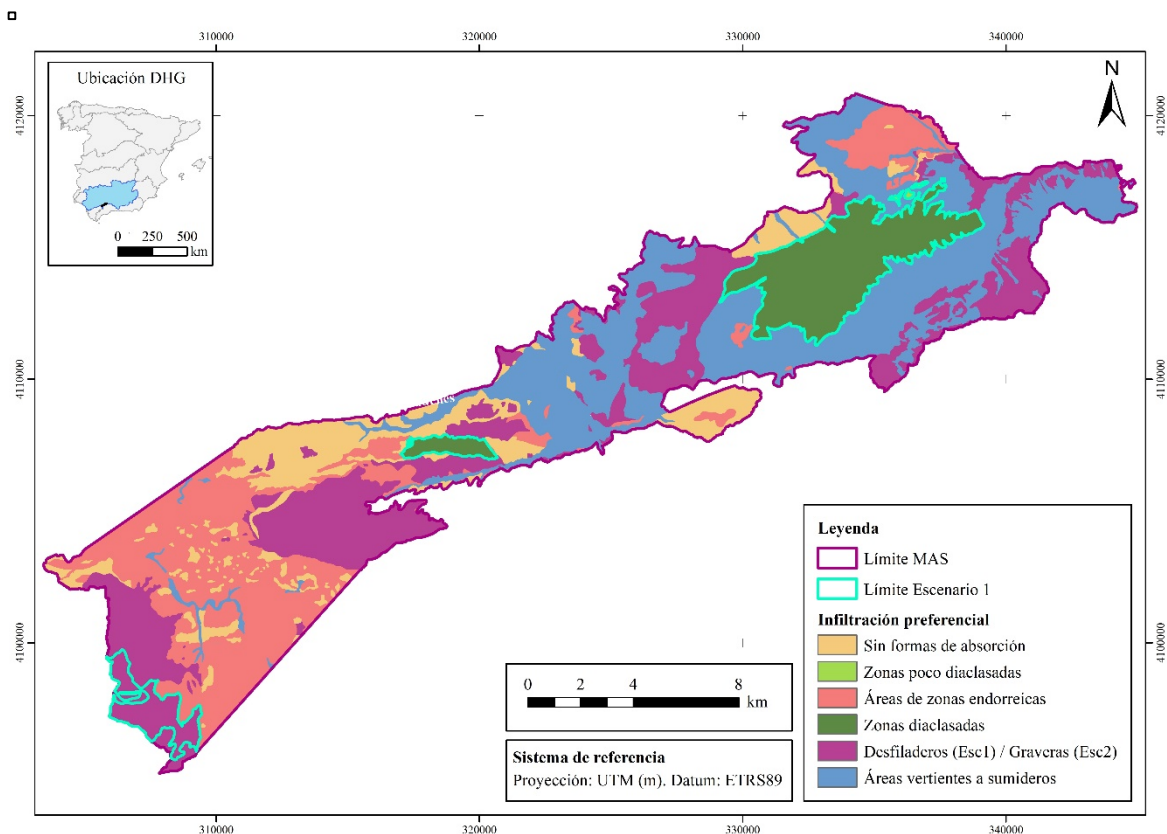
**Figura A1-7.** Pendiente del terreno (%) sobre la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas.

### PI (Infiltración preferencial)

A partir de las características hidrogeológicas, el mapa topográfico y de imágenes disponibles en Google Earth se han identificado las zonas de infiltración preferencial que existen en la zona de estudio, como son las formas kársticas de El Peñón o las áreas vertientes al arroyo Blanco,

y se han asignado los valores apropiados a cada área en función del tipo de escenario (Figura 5) con la función *ArcToolbox/Analyst Tools/Raster Reclass/Reclassify*.

Las zonas de infiltración preferencial se muestran en la Figura A1-8.



**Figura A1-8.** Zonas de infiltración preferencial en la MAS Sierra de los Caballos - Algámitas.

Una vez reclasificados los valores de las seis variables que intervienen en el método DRISTPI, se calcula el propio índice mediante la siguiente operación con la herramienta *ArcToolbox/ Spatial Analyst Tools/ Map Algebra/ Raster Calculator*:

$$D + 4R + 5I + 2S + 1T + 5PI$$

El peso del parámetro D depende del tipo de escenario, se multiplica por 2 en el escenario 1, o por 5 en el caso del escenario 2.

Tras clasificar el ráster creado en la operación previa, de acuerdo a los coeficientes expuestos en la Figura 6 con la herramienta *3D Analyst Tools/ Raster Reclass/ Reclassify*, se obtienen las categorías

de la vulnerabilidad intrínseca de la masa de agua estudiada (Figura 10).

### **3. Riesgo de contaminación (índice RI)**

A partir de las capas ráster que contienen los resultados del índice IP y las clases de vulnerabilidad intrínseca, se realiza el producto de ambas capas utilizando la herramienta *Raster Calculator* contenida en el menú *ArcToolbox/ Spatial Analyst Tools/ Map Algebra*.

Por último, los valores del ráster resultante se organizan según los rangos definidos en la Tabla 4 con la opción *3D Analyst Tools/ Raster Reclass/ Reclassify*.

La conclusión de este procedimiento se muestra en el mapa ilustrado en la Figura 11.

### **4. Zonas de salvaguarda**

Para definir las zonas de salvaguarda mostradas en el epígrafe 3.4 es necesario recortar la capa del índice RI por el contorno de las ZAC utilizando la opción *ArcToolbox/ Spatial Analyst Tools/ Extraction/ Extract by Mask*.

A continuación, se superpone la capa obtenida anteriormente y los perímetros de protección con la herramienta *ArcToolbox/ Data Management Tools/ Raster/ Raster Dataset/ Mosaic to New Raster*.

Se reclasifican los valores de dicho ráster con la opción *3D Analyst Tools/ Raster Reclass/ Reclassify*, conforme a las categorías expuestas en la Figura 8, y se obtiene finalmente la delimitación de las zonas de salvaguarda (Figura 14).

**UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**  
**Y**  
**UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS**



**MASTER OFICIAL EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**TRABAJO FIN DE MASTER**

**VALORACIÓN DEL POTENCIAL ECOLÓGICO DE  
LAS AGUAS DEL EMBALSE DE ITAIPU  
BINACIONAL**

***ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL POTENTIAL OF  
THE WATER OF THE ITAIPU BINATIONAL RESERVOIR***

**AUTOR:  
Ana Carolina Gossen Siani**

**DIRECTOR:  
Dr. Irene de Bustamante (UAH)**

Alcalá de Henares, 04 de Julio de 2017

## ÍNDICE

RESUMEN.....	145
1. INTRODUCCIÓN.....	145
2. OBJETIVOS.....	146
3. METODOLOGÍA.....	147
3.1. ZONA DE ESTUDIO .....	147
3.2. PERIODO DE ESTUDIO .....	148
3.3. CLASIFICACIÓN DEL EMBALSE.....	149
3.4. CARACTERÍSTICAS HIDROMORFOLÓGICA, FISICOQUÍMICA Y BIOLÓGICA....	151
3.5. ESTADO TRÓFICO .....	168
3.6. POTENCIAL ECOLÓGICO ....	170
4. RESULTADOS .....	174
5. DISCUSIÓN.....	179
6. CONCLUSIONES.....	180
7. BIBLIOGRAFÍA.....	181

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Embalse de Itaipu y su perfil longitudinal.....	147
<b>Figura 2.</b> Localización de la zona de estudio y los puntos de monitoreo P1-P3-P5.....	148
<b>Figura 3.</b> Cota del Embalse de Itaipu 2010-2015. Fuente Itaipu Binacional.....	152
<b>Figura 4.</b> Transparencia en el Punto de Muestreo P5 – Cabecera del Embalse .....	153
<b>Figura 5.</b> Conductividad en el Punto de Muestreo P5 – Cabecera del Embalse .....	154
<b>Figura 6.</b> Transparencia en el Punto de Muestreo P3 – Zona media del Embalse .....	155
<b>Figura 7.</b> Conductividad en el Punto de Muestreo P3 – Zona media del Embalse .....	155
<b>Figura 8.</b> Transparencia en el Punto de Muestreo P1 – Zona próxima a la presa .....	155
<b>Figura 9.</b> Conductividad en el Punto de Muestreo P1 – Zona próxima a la presa .....	157
<b>Figura 10.</b> Turbidez (NTU) en los Puntos P5-P3-P1.....	157
<b>Figura 11.</b> Turbidez vs Precipitación media mensual – P5 .....	159
<b>Figura 12.</b> Turbidez vs Precipitación media mensual –P3 .....	159
<b>Figura 13.</b> Turbidez vs Precipitación media mensual – P1 .....	159

<b>Figura 14.</b> Clasificación de la Concentración de Oxígeno Disuelto en P5-P3-P1.....	160
<b>Figura 15.</b> Concentración de Fósforo Total (mg-P/L) en P1-P3-P5..	161
<b>Figura 16.</b> Concentración de Nitrógeno Total Kjeldahl (mg-N/L) en P1-P3-P5.....	162
<b>Figura 17.</b> Riqueza del Fitoplancton en los puntos P5-P3-P1 .....	163
<b>Figura 18.</b> Densidad del Fitoplancton (cél./ml) en los puntos P5-P3- P .....	165
<b>Figura 19.</b> Biovolumen Algal (mm <sup>3</sup> /L) por grupo algal en los puntos P5-P3- P1.....	166
<b>Figura 20.</b> Concentración de Clorofila a en los puntos P5-P3- P1 ....	167
<b>Figura 21.</b> Estado Trófico del Embalse de Itaipu según Toledo (1983).....	169

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tabla de características del Embalse .....	147
<b>Tabla 2.</b> Campañas de Monitoreo en los puntos P1-P3-P5 .....	149
<b>Tabla 3.</b> Tipos de masas de agua muy modificadas y artificiales asimilables a lagos o lenticas .....	150
<b>Tabla 4.</b> Clima de la zona de estudio. Fuente Itaipu Binacional.....	150
<b>Tabla 5.</b> Parámetro, método analítico y límite de detección.....	152
<b>Tabla 6.</b> Grupos Algales encontrados 2010-2015 .....	162
<b>Tabla 7.</b> Límites para estados tróficos según Toledo (1983) .....	168
<b>Tabla 8.</b> Parámetros utilizados para la determinación del Potencial Ecológico.....	170
<b>Tabla 9.</b> Máximo potencial ecológico y límites de cambio de clase de potencial (RD817/2015) .....	171
<b>Tabla 10.</b> Clases de Potencial ecológico para Embalses de Tipo 2.....	172
<b>Tabla 11.</b> Ecuaciones para transformación de RCE a escala numérica para embalses tipo 2 .....	172
<b>Tabla 12.</b> Clasificación del Potencial Ecológico (PE_BIO) según el RCE transformado del Embalse .....	172
<b>Tabla 13.</b> Clases de Potencial ecológico para los elementos de calidad de indicadores Físicoquímicos .....	173



<b>Tabla 14.</b> Combinación de los indicadores para el cálculo del Potencial Ecológico final (CHE, 2015) .....	174
<b>Tabla 15.</b> Resultados en P1 del Potencial Ecológico en función a los indicadores biológicos.....	174
<b>Tabla 16.</b> Resultados en P3 del Potencial Ecológico en función a los indicadores biológicos.....	175
<b>Tabla 17.</b> Resultados en P5 del Potencial Ecológico en función a los indicadores biológicos.....	175
<b>Tabla 18.</b> Resultados en P1 del Potencial Ecológico en función a los indicadores fisicoquímicos.....	176
<b>Tabla 19.</b> Resultados en P3 del Potencial Ecológico en función a los indicadores fisicoquímicos.....	176
<b>Tabla 20.</b> Resultados en P5 del Potencial Ecológico en función a los indicadores fisicoquímicos.....	177
<b>Tabla 21.</b> Resultados en P1 - Potencial Ecológico final .....	177
<b>Tabla 22.</b> Resultados en P3 - Potencial Ecológico final .....	178
<b>Tabla 23.</b> Resultados en P5 - Potencial Ecológico final .....	178

## TABLA DE ABREVIATURAS

CE: Comunidad Europea
CEMIT: Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas
CETESB: Companhia Ambiental del Estado de San Paulo
CHE: Confederación Hidrográfica del Ebro
DMA: Directiva Marco del Agua
IB: Itaipu Binacional
IET: Índice de Estado Tráfico
IGA: Índice de Grupo Algal
NATA: <i>National Assciation of Testing Authorities</i>
OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
RCE: Ratio de Calidad Ecológico
UNA: Universidad Nacional de Asunción
WQRA: <i>Water Quality Research Australia</i>

## RESUMEN

En el presente estudio se muestra la aplicación de los criterios para la valoración del potencial ecológico de la masa de agua del embalse de Itaipu Binacional, en función a la Directiva **2000/60/CE** “Por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas”, conocida como la Directiva Marco de Agua (DMA).

Se toma como base metodológica los criterios establecidos en la normativa española a través del Real Decreto 817/2015 “Por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental” de España, así como la memoria de la Red de Seguimiento de masas de agua muy modificadas de la Confederación Hidrográfica del Ebro (2015).

Se evalúan los aspectos de tipología de embalses, las características hidromorfológicas, fisicoquímicas y biológicas en toda su extensión, así como los niveles de estado trófico. Se abarca un periodo de 5 años y un total de 17 campañas de monitoreo en 3 puntos del cuerpo principal del embalse sobre el Río Paraná, el cual está situado entre los países de Paraguay y Brasil en Sudamérica.

Los resultados obtenidos se expresan en función al Potencial Ecológico, el cual

conjuga las distintas características biológicas y fisicoquímicas del embalse, el cual es definido como masa de agua muy modificada en su estructura, funcionamiento y naturaleza, para así englobar la calidad del mismo.

Además de los resultados obtenidos se presenta dentro de las conclusiones las ventajas y principales limitaciones para la aplicación de la metodología de la Directiva Marco.

## 1. INTRODUCCION

El elevado crecimiento de la demanda de agua dulce en todo el mundo para el abastecimiento doméstico, industrial, producción de energía y alimentos, demuestra como en la actualidad, las actividades humanas son dependientes de la disponibilidad de este recurso natural tanto en cantidad como en calidad. La dependencia del hombre moderno por los ecosistemas acuáticos continentales, principalmente embalses de agua dulce de fácil acceso, es aún más evidente en las regiones industrializadas, en donde la demanda de agua per cápita se ha vuelto cada vez mayor. (Esteves, 2011).

Esta creciente demanda de agua ha hecho que en las últimas décadas la construcción de embalses se haya incrementado notablemente, ya sea para diversos usos tales como captación de agua, producción

de energía hidroeléctrica, control de inundaciones, irrigaciones entre otros.

El represamiento de un curso hídrico, normalmente un río implica no solamente obras civiles de envergadura, sino también implica un cambio total del régimen de ese curso de agua, modificando su naturaleza pasando de un régimen lótico a un régimen léntico por medio de la intervención antrópica.

A diferencia de un lago, los embalses presentan un tiempo de residencia más corto, lo que hace que la renovación de su agua sea más rápida, así también las variaciones de nivel son más intensas en los embalses que en los lagos. Estas diferencias se extienden también a la estratificación, natural en los lagos y variante en los embalses.

El Embalse de Itaipu, objeto de este estudio, está ubicado sobre el antiguo segmento del río Paraná comprendido entre el Salto de Guairá y la Represa de Itaipu en la frontera entre Paraguay y Brasil.

El área inundada a cota 220 es de alrededor de 1.400 km<sup>2</sup>. En consecuencia y en la necesidad de evaluar el impacto ecológico, Itaipu Binacional, durante la construcción de la represa antes del llenado del embalse, condujo entre otros, estudios e investigaciones tendientes a la evaluación del impacto Ecológico de los ambientes acuático y terrestre. Estos estudios

permitieron estimar razonablemente el comportamiento del embalse de modo a prever situaciones no deseables. Después del llenado, se iniciaron los estudios limnológicos, que en el área de la margen derecha en actualidad son realizados en forma conjunta con el Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas (CEMIT) de la Universidad Nacional de Asunción (UNA) y la División de Embalse de Itaipu Binacional.

Hoy día, Itaipu Binacional es líder mundial en la producción de energía limpia y renovable, habiendo producido más de 2,4 mil millones de MWh desde el inicio de su operación, en 1984. Con 20 unidades generadoras y 14.000 MW de la potencia instalada, suministra alrededor del 17% de la energía consumida en Brasil y el 76% de la utilizada en Paraguay.

## **2. OBJETIVOS**

El objetivo general de este proyecto es valorar el Potencial Ecológico de la masa de agua del embalse de Itaipu con la aplicación de la metodología europea establecida en la Directiva 2000/60/CE “Por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas”, conocida como la Directiva Marco de Agua (DMA), para el periodo comprendido entre 2010 y 2015.

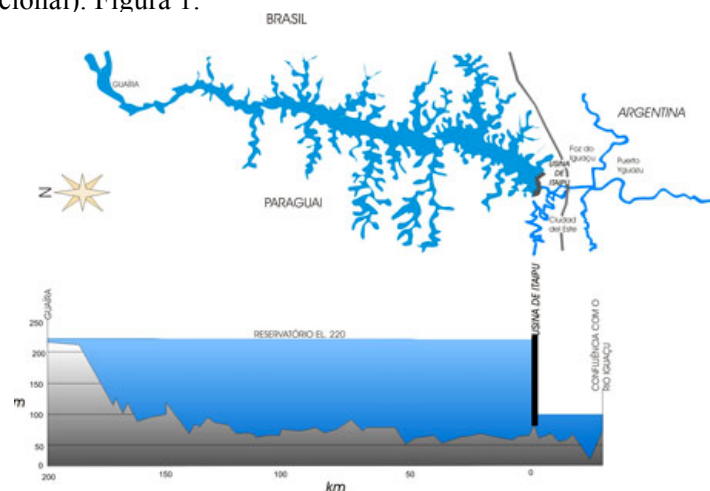
Los objetivos específicos son:

- Analizar la disponibilidad y consistencia de los datos de los estudios limnológicos realizados en el embalse de Itaipu en colaboración con el CEMIT/UNA, para la aplicación de la DMA.
- Evaluar y proponer la incorporación de criterios en los próximos estudios limnológicos del embalse de Itaipu, a fin de valorar su potencial ecológico basado en la DMA.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Zona de estudio

Itaipu Binacional (IB) es un aprovechamiento hidroeléctrico de los recursos hidrológicos del Río Paraná, situado entre los países Paraguay y Brasil, desde e inclusive el Salto del Guaira o Salto Grande de Sete Quedas hasta la boca de Río Iguazú (Itaipu Binacional). Figura 1.



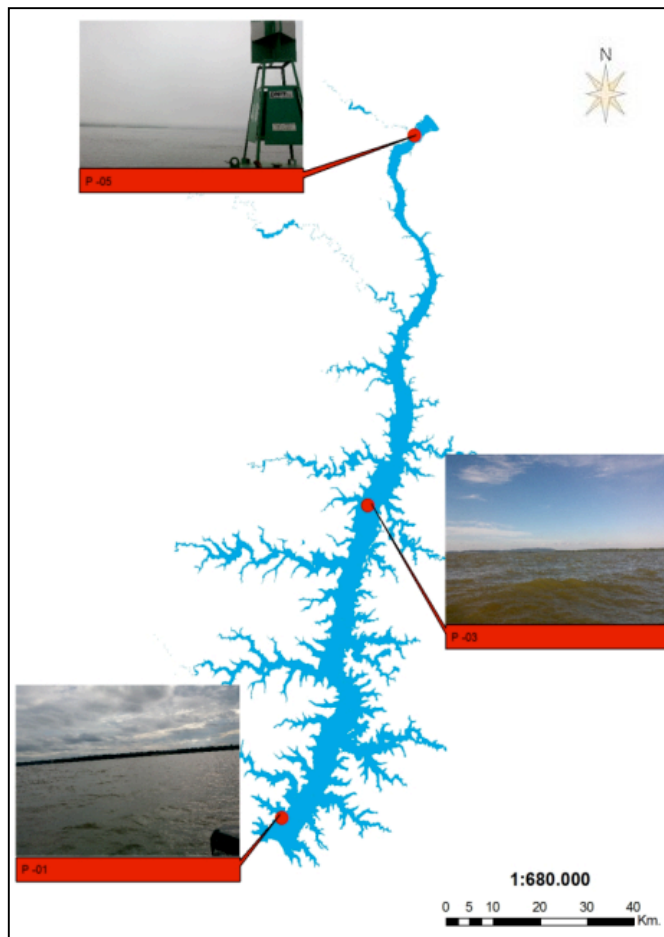
**Figura 1.** Embalse de Itaipu y su perfil longitudinal. Itaipu Binacional (2017)

La capacidad máxima de producción de energía hidroeléctrica es de 14.000 MW por medio de 20 turbinas de capacidad unitaria de 700 MW. Las características del embalse se detallan en la tabla 1.

**Tabla 1.** Tabla de características del Embalse

<i>Parámetros</i>	<i>Características</i>
Volumen máximo normal (m <sup>3</sup> )	20x10 <sup>9</sup>
Volumen útil (m <sup>3</sup> )	19 x10 <sup>9</sup>
Extensión (Km)	170
Ancho Máximo (Km)	12
Ancho medio (Km)	7
Superficie (Km <sup>2</sup> )	1.350

La zona de estudio abarca 3 puntos de monitoreo ubicados al inicio del embalse aguas arriba de la presa P5, en la zona media P3 y otro situado cercano a la presa misma P1. (Figura 2).



**Figura 2.** Localización de la zona de estudio y los puntos de monitoreo P1-P3-P5

### 3.2. Periodo de estudio

El periodo de estudio abarca 5 años desde el 2010 hasta el 2015, periodo en el cual se cuenta con un total de 17 campañas de monitoreo (tabla 2), las cuales fueron realizadas, en forma conjunta con la Universidad Nacional de Asunción (UNA) a través de su Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas (CEMIT) en el marco de los estudios de calidad de agua, eutrofización y contaminación en el Embalse de Itaipu, afluentes de la margen derecha, Río Paraná y otros cuerpos de agua

de interés de la Itaipu Binacional. Estos estudios realizados en conjunto con la UNA/CEMIT abarcan más de 40 puntos de monitoreo distribuidos en toda el área de influencia de Itaipu. Para el presente trabajo solo fueron considerados los puntos del cuerpo principal del embalse.

**Tabla 2.** Campañas de Monitoreo en los puntos P1-P3-P5

<b>Campañas</b>	<b>Meses</b>	<b>Año</b>
C1	Mayo	2010
C2	Agosto	2010
C3	Noviembre	2010
C4	Febrero	2011
C5	Mayo/Junio	2011
C6	Agosto	2011
C7	Noviembre	2011
C8	Febrero	2012
C9	Abril	2013
C10	Julio	2013
C11	Octubre	2013
C12	Febrero	2014
C13	Mayo/Junio	2014
C14	Agosto	2014
C15	Noviembre	2014
C16	Febrero/Marzo	2015
C17	Noviembre/Diciembre	2015

### 3.3. Clasificación del Embalse

Los embalses son considerados como masas de aguas artificiales muy modificados, *una masa de agua superficial que, como consecuencia de alteraciones físicas producidas por la actividad humana, ha experimentado un cambio sustancial en su naturaleza.* (Num.9. Artículo 2°. Definiciones. DMA).

A efectos de clasificar al embalse de Itaipu según las topologías establecidas en la Orden ARM/2656/2008, se toma como referencia la Tabla 3 para considerar la

geología, humedad, área de la cuenca, T° media anual y altitud.

El Área del proyecto ITAIPU se encuentra localizada sobre una meseta con diferencia de cota entre 30 a 60 m. Está formada por derrames basálticos y de diabasa (Itaipu Binacional, 1975). Si bien dentro de la tipología en cuanto a la geología se tiene previsto para embalses silíceos y calcáreos, el embalse en estudio se encuentra en una zona formada por derrames basálticos y de diabasas, considerando que el basalto es una roca rica en silicatos de magnesio y hierro y en sílice, se asume que el embalse es del *tipo silíceo*.

En cuanto a la estratificación térmica, normalmente esta se produce una vez al año, con un gradiente aproximadamente de 4-8°C, especialmente en los meses de octubre -noviembre, por lo tanto el embalse es considerado *Monomíctico*.

Las características (Tabla 4) del clima en la zona de estudio indican que la *temperatura media anual es mayor a 15°C y zona húmeda*.

**Tabla 3.** Tipos de masas de agua muy modificadas y artificiales asimilables a lagos o lenticas.

<i>Tipo</i>	<i>Denominación</i>
1	Monomíctico, silíceo de zonas húmedas, con temperatura media anual menor de 15° C, pertenecientes a ríos de cabecera y tramos altos.
2	Monomíctico, silíceo de zonas húmedas, con temperatura media anual mayor de 15° C, pertenecientes a ríos de cabecera y tramos altos.
3	Monomíctico, silíceo de zonas húmedas, pertenecientes a ríos de la red principal.
4	Monomíctico, silíceo de zonas no húmedas, pertenecientes a ríos de cabecera y tramos altos.
5	Monomíctico, silíceo de zonas no húmedas, pertenecientes a ríos de la red principal.
6	Monomíctico, silíceo de zonas no húmedas, pertenecientes a tramos bajos de los ejes Principales.
7	Monomíctico, calcáreo de zonas húmedas, con temperatura media anual menor de 15°C, pertenecientes a ríos de cabecera y tramos altos.
8	Monomíctico, calcáreo de zonas húmedas, con temperatura media anual mayor de 15° C, pertenecientes a ríos de cabecera y tramos altos.
9	Monomíctico, calcáreo de zonas húmedas, pertenecientes a ríos de la red principal.
10	Monomíctico, calcáreo de zonas no húmedas, pertenecientes a ríos de cabecera y tramos altos.
11	Monomíctico, calcáreo de zonas no húmedas, pertenecientes a ríos de la red principal.
12	Monomíctico, calcáreo de zonas no húmedas, pertenecientes a tramos bajos de ejes principales.
13	Dimíctico.

**Tabla 4.** Clima de la zona de estudio. Fuente Itaipu Binacional (2017)

<i>Parámetros</i>	<i>Medida</i>
<i>Precipitación media anual (mm)</i>	<i>1.868</i>
<i>Evaporación media anual (mm)</i>	<i>1.000</i>
<i>Temperatura media anual (°C)</i>	<i>22</i>

Con las características establecidas, y si bien al altitud del embalse se encuentra en cota 220, dado los datos de humedad y temperatura media anual, se considera que el embalse se encuentra dentro de la ***Tipología 2-*** Monomítico, silíceo de zonas húmedas, con temperatura media anual mayor de 15° C, pertenecientes a ríos de cabecera y tramos altos.

### **3.4. Características Hidromorfológica, Físicoquímica y Biológica**

#### **3.4.1. Caracterización Hidromorfológica**

##### *3.4.1.1. Volumen*

El volumen máximo normal de la masa de agua es de  $29 \times 10^9 \text{ m}^3$ , con un volumen útil de  $19 \times 10^9 \text{ m}^3$ .

##### *3.4.1.2. Superficie*

La superficie a un nivel normal (EL.220) es de  $1.350 \text{ km}^2$ , con una extensión de 170 km y un ancho máximo de 12 km y un ancho promedio de 7 km.

##### *3.4.1.3. Profundidad Máxima*

La profundidad máxima registrada es de aproximadamente 140 m, siendo la profundidad promedio de 22 m

##### *3.4.1.4. Área de la Cuenca*

La cuenca hidrográfica presenta un área de drenaje con una superficie de  $820.000 \text{ km}^2$ , hasta la confluencia con el Río Paranapenema incluyendo la cuenca incremental. El área del embalse es de

100.000 Ha y la franja de protección comprende un ancho de 217 m, alcanzando una extensión de 2.900 km.

##### *3.4.1.5. Tiempo de Residencia*

En tiempo de residencia considerando el volumen máximo normal de  $29 \times 10^9 \text{ m}^3$  y un caudal promedio de  $11.400 \text{ m}^3/\text{s}$  es de 29 a 30 días.

##### *3.4.1.6. Hidrología*

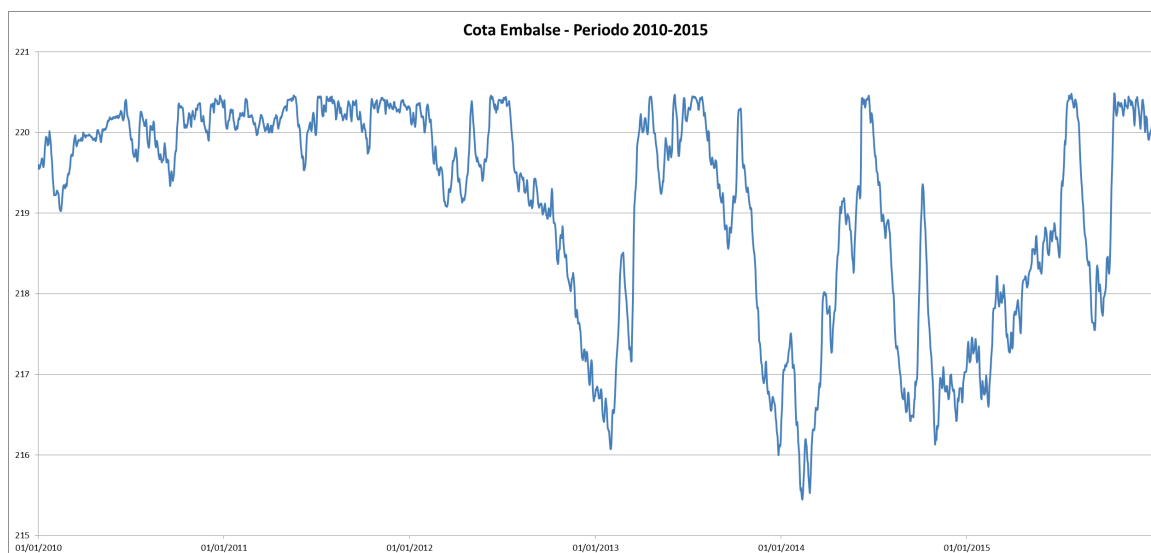
En el periodo de estudio se puede observar que la mínima del nivel del embalse se registró el 12/02/2014 alcanzando una cota de 215,45 msnm. El máximo nivel alcanzado fue en fecha 18/11/2015 llegando a una cota de 220,49 msnm. La Figura 3 representa el comportamiento del nivel del embalse durante el periodo 2010-2015.

#### **3.4.2. Caracterización físicoquímica**

Para la caracterización físicoquímica se han considerado los parámetros transparencia, temperatura, pH, conductividad, turbidez, oxigenación y nutrientes (fósforo total y nitrógeno).

Algunos de estos parámetros fueron medidos in situ y para otros las muestras fueron tomadas, preservadas por el CEMIT-UNA y llevadas a sus laboratorios especializados utilizando los métodos analíticos descritos en la Tabla 5 con su respectivo límite de detección.





**Figura 3.** Cota del Embalse de Itaipu 2010-2015. Fuente Itaipu Binacional

**Tabla 5.** Parámetro, método analítico y límite de detección

<i>Parámetro</i>	<i>Método Analítico</i>	<i>LD</i>
Transparencia	Método del Disco del Secchi	0,02m
Temperatura	Método de laboratorio y campo 2550B	no aplica
pH	Método Electrométrico 4500 –H <sup>+</sup>	1-14
Conductividad	Método de Laboratorio 2510	0-199,9 mS/cm
Turbidez	Método Nefelométrico 2130	0,1 NTU
Oxígeno Disuelto	Método del electrodo de membrana 4500-OG	0,01 mg O <sub>2</sub> /L
Saturación de Oxígeno	Método del electrodo de membrana 4500-OG	no aplica
Fósforo Total	Método del Ácido Ascórbico 4500P-E	0,0090 mg
Nitrógeno Total K	Método macro-kjeldahl-N B	0,0721 mgN/L

### 3.4.2.1 *Transparencia, temperatura, pH y conductividad*

La **transparencia** es la determinación de la porción iluminada de la columna de agua, la cual puede variar desde algunos centímetros hasta decenas de metros. Esta región de la columna de agua es denominada zona eufótica y su extensión depende, principalmente, de la capacidad del medio en atenuar la radiación subacuática. Desde

el punto de vista óptico, la transparencia del agua puede ser considerada el opuesto de la turbidez. Su medición, de manera más simple, es realizada con el empleo de un disco blanco de 20 a 30 cm de diámetro, denominado disco de Secchi (Esteves, 2011).

La **temperatura** nos permite establecer el grado de estratificación, teniendo en cuenta que el embalse se encuentra en una región tropical donde los fenómenos de

estratificación de las masas de agua acontecen de manera diferenciada de aquellas regiones templadas (Esteves, 2011).

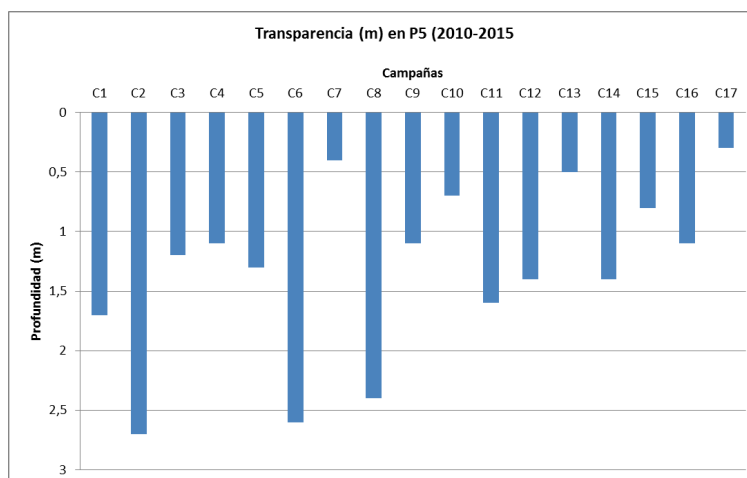
El **pH** es una medida de la acidez (o indirectamente de la basicidad) del sistema, esto es, de la concentración de iones H<sup>+</sup> (acidez) en el sistema.

La **conductividad** una masa de agua es un indicador de la concentración de sólidos disueltos presentes. Los valores de la misma se expresan en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  estandarizados a 20 °C (K20).

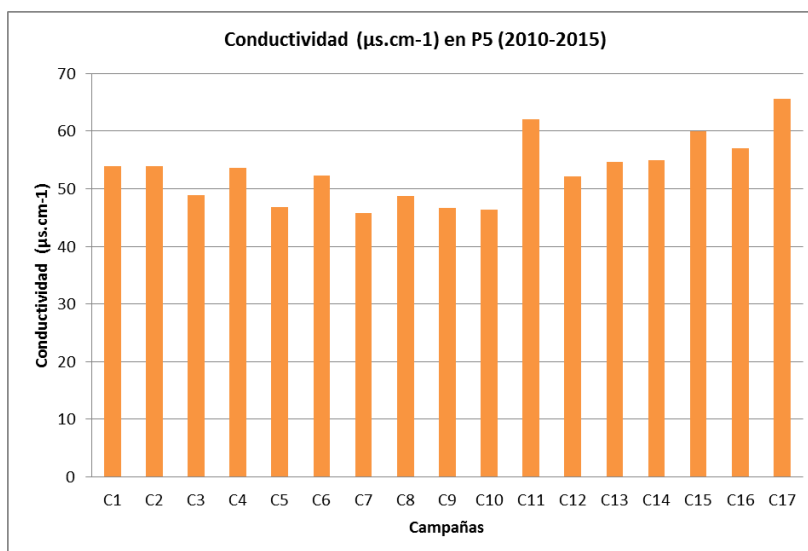
#### ***A-Resultados del Punto de Muestreo P5- Cabecera del Embalse***

- La *transparencia del agua* por el método del disco de secchi es variable en el periodo de estudio, siendo la máxima de 2,70 m, la mínima de 0,30 m y el promedio de 1,31m para el periodo de estudio (Figura 4).

- La *temperatura* del agua presenta para el periodo de estudio una máxima de 29,5°C en el mes de febrero 2012, una mínima de 14,7 °C en el mes de julio 2013 coincidentes con las estaciones de verano e invierno respectivamente, siendo el promedio de 24,36°C.
- El *pH* presenta un valor promedio de 7,04, una máxima de 7,87 y una mínima de 6,57 durante el periodo de estudio.
- La *conductividad* del agua obtenida fue poco variable en el periodo de estudio, presenta un valor promedio de 53,14  $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$  siendo la máxima de 65,60  $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$  en el mes de noviembre 2015 y la mínima registrada de 45,80  $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$  en el mes de noviembre 2011. Figura 5



**Figura 4.** Transparencia en el Punto de Muestreo P5 – cabecera del Embalse



**Figura 5.** Conductividad en el Punto de Muestreo P5 – Cabecera del Embalse

**Resultados del Punto de Muestreo P3-  
Zona media del Embalse**

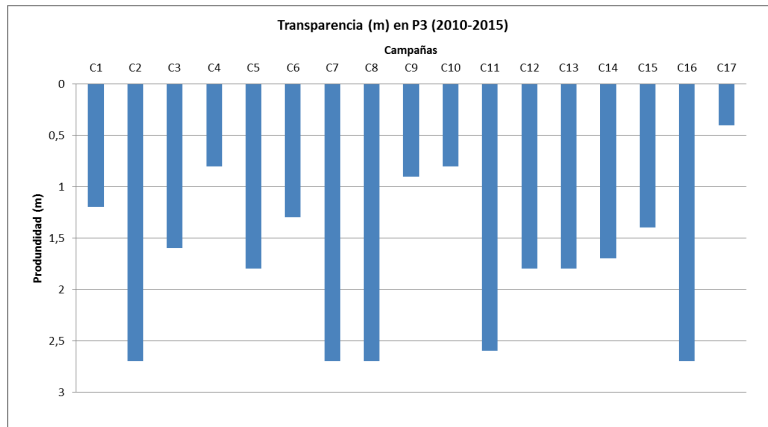
- La *transparencia del agua* por el método del disco de secchi es variable en el periodo de estudio, siendo la máxima de 2,70 m, la mínima de 0,40 m y el promedio de 1,70 m para el periodo de estudio (Figura 6).
- La *temperatura* del agua presenta para el periodo de estudio una máxima de 29,7°C en el mes de febrero 2012, una mínima de 19,20 °C en el mes de agosto 2011, coincidentes con las estaciones de verano e invierno respectivamente, siendo el promedio de 24,54°C.
- El *pH* presenta un valor promedio 7,15; de una máxima de 8,05 y una

mínima de 6,32 durante el periodo de estudio.

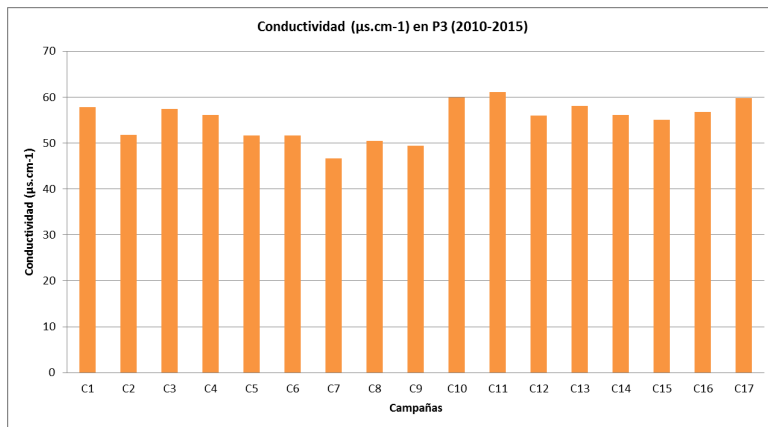
- La *conductividad* del agua obtenida fue poco variable en el periodo de estudio, presenta un valor promedio de 55,0 µs.cm<sup>-1</sup> siendo la máxima de 61,10 µs.cm<sup>-1</sup> en el mes de octubre 2013 y la mínima registrada de 46,70 µs.cm<sup>-1</sup> en el mes de noviembre 2011. (Figura 7)

**C-Resultados del Punto de Muestreo P1-  
Zona próxima a la presa.**

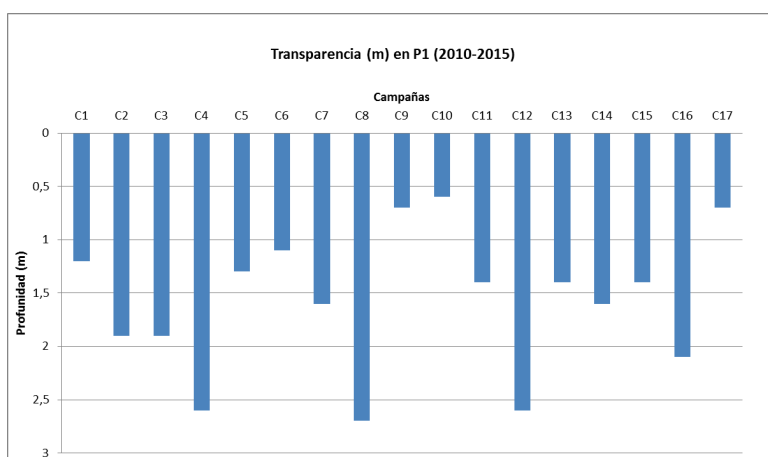
- La *transparencia del agua* por el método del disco de secchi es variable en el periodo de estudio, siendo la máxima de 2,70 m, la mínima de 0,60 m y el promedio de 1,58 m para el periodo de estudio (Figura 8).



**Figura 6.** Transparencia en el Punto de Muestreo P3 – Zona media del Embalse



**Figura 7.** Conductividad en el Punto de Muestreo P3 – Zona media del Embalse



**Figura 8.** Transparencia en el Punto de Muestreo P1 – Zona próxima a la presa

- La *temperatura* del agua presenta para el periodo de estudio una máxima de 30,5°C en el mes de febrero 2014, una mínima de 18,90 °C en el mes de agosto de 2011, coincidentes con las estaciones de verano e invierno respectivamente, siendo el promedio de 25,18°C.
- El *pH* presenta un valor promedio de 7,48, una máxima de 8,49 y una mínima de 6,92 durante el periodo de estudio.
- La *conductividad* del agua obtenida fue poco variable en el periodo de estudio, presenta un valor promedio de 55,83  $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$  siendo la máxima de 61,60  $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$  en el mes de diciembre 2015 y la mínima registrada de 50,50  $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$  en el mes de febrero 2012 ( Figura 9).

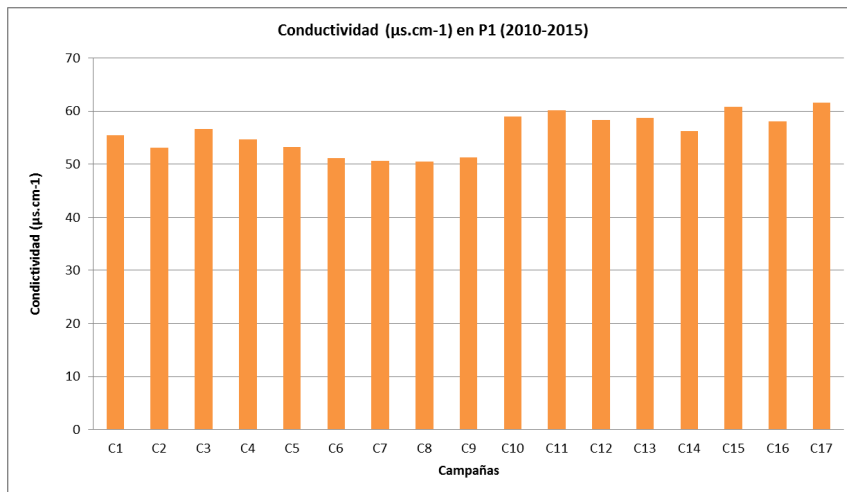
#### 3.4.2.2 Turbidez

La presencia de materias diversas en suspensión, arenas, limos, coloides orgánicos, plancton y otros organismos microscópicos da lugar a la **turbidez** en el agua. Estas partículas (de dimensiones variables, desde 10 nm hasta diámetros del orden de 0,1 mm) se pueden asociar a tres categorías: minerales, partículas orgánicas húmicas (provenientes de la descomposición o agregación de restos vegetales), y partículas filamentosas (por

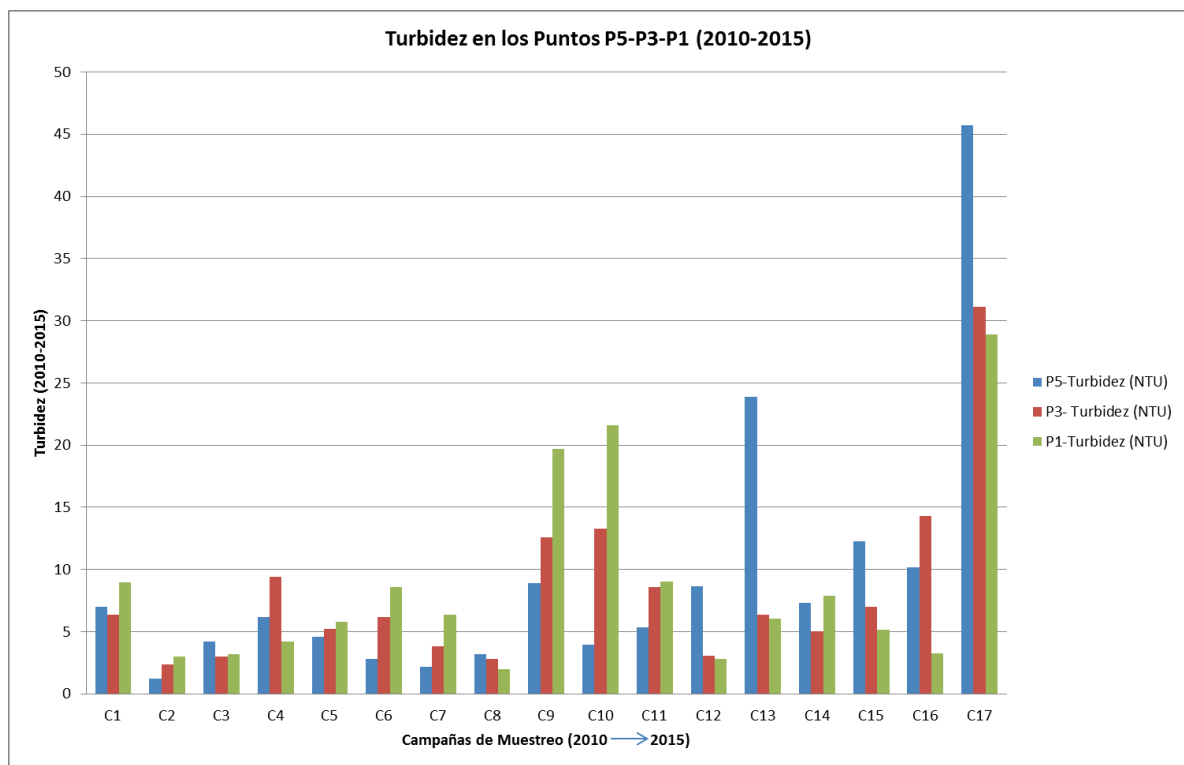
ejemplo, restos de amiantos u otros filosilicatos) (Marín, 2003).

Los resultados de Turbidez en los 3 puntos de muestreo muestran una variabilidad de éste parámetro (Figura 10), en donde se puede observar un incremento importante en la turbidez en la campaña C17 (Noviembre-Diciembre 2015) siendo en ese mismo periodo el máximo nivel registrado del embalse de 220,40 msnm.

Con el fin de comparar el comportamiento de la turbidez versus la precipitación registrada por las Estaciones Meteorológicas con las que cuenta ITAIPU dentro de su área de influencia. Para éste análisis fueron considerados los valores de precipitación media mensual (mm) de las Estaciones Meteorológicas de Mbaracayu, Limoy y Usina, para los puntos P5, P3, P1 respectivamente; según las fechas de las campañas.



**Figura 9.** Conductividad en el Punto de Muestreo P1 – Zona próxima a la presa



**Figura 10.** Turbidez (NTU) en los Puntos P5-P3-P1

Puede observarse en las Figuras 11, 12, 13 que en la campaña N° 17 en los meses de noviembre y diciembre 2015, existe una influencia importante de la precipitación en la turbidez.

La erosión de suelos y rocas, suelen estar revestidas de restos orgánicos, y conforman la fracción más importante de las materias en suspensión de la mayoría de las aguas naturales. Los aportes de aguas turbias de escorrentía en época de lluvias ricas en materias minerales causan aumentos de turbidez en aguas de ríos y embalses (Marín, 2003).

Cabe señalar que durante el periodo 2010-2015, la mayor cantidad de precipitación registrada fue en los meses de noviembre y diciembre de 2015.

#### 3.4.2.3 Oxigenación

De entre los gases disueltos en el agua, el Oxígeno ( $O_2$ ), es uno de los más importantes en la dinámica de la caracterización de los ecosistemas acuáticos. Las principales fuentes de oxígeno para el agua son: la atmósfera y la fotosíntesis. Por otro lado, la oxidación de la materia orgánica, resultado de la actividad de los microorganismos, pérdidas para la atmósfera, o respiración de organismos acuáticos y oxidación de iones metálicos, como, por ejemplo, el hierro y manganeso, contribuyen para la reducción

de la concentración del oxígeno en el agua (Esteves, 2011).

Para el análisis del comportamiento de Oxígeno Disuelto no se pudo contar para las campañas C1 al C8 con datos del perfil de oxígeno de la columna de agua, por lo que fueron tomados los valores de concentración en la zona fótica para los puntos P5, P3 y P1. La clasificación considerada es similar a la empleada por otros autores para la clasificación de las condiciones de oxigenación en lagos de agua dulce en el ámbito europeo (Premazzi y Chiaduanni, 1992).

Los valores muestran (Figura 14) que mayormente en el periodo de estudios de 5 años (2010-2015) la concentración de Oxígeno Disuelto se presenta en el rango buenas condiciones.

#### 3.4.2.4 Nutrientes (Fósforo y Nitrógeno)

Es conocida la importancia del **Fósforo** en los sistemas biológicos, por su participación en procesos fundamentales de los seres vivos.

Tras décadas de debates, actualmente se asume que el *nitrógeno* conjuntamente con el *fósforo*, pueden regular la productividad acuática en la mayoría de las aguas continentales en regiones tropicales, subtropicales y templadas. (Smith, et al, 2006).

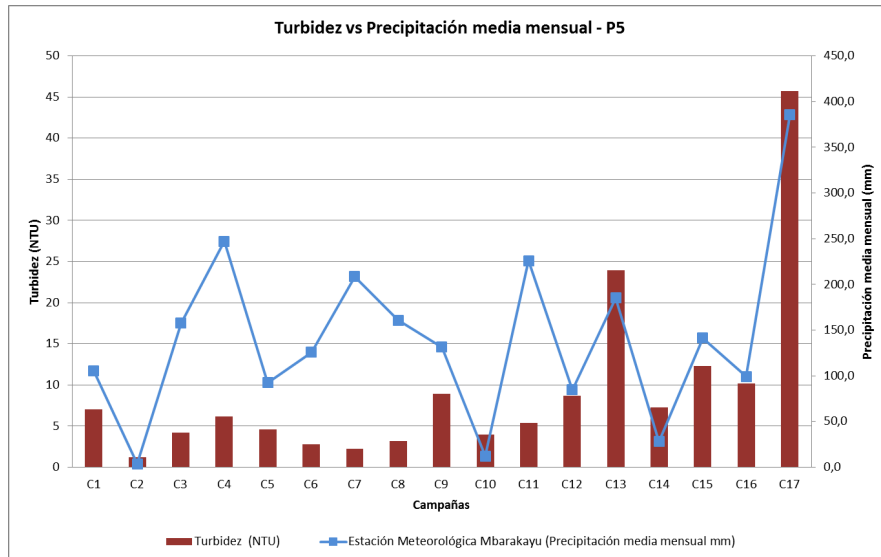


Figura 11. Turbidez vs Precipitación media mensual – P5

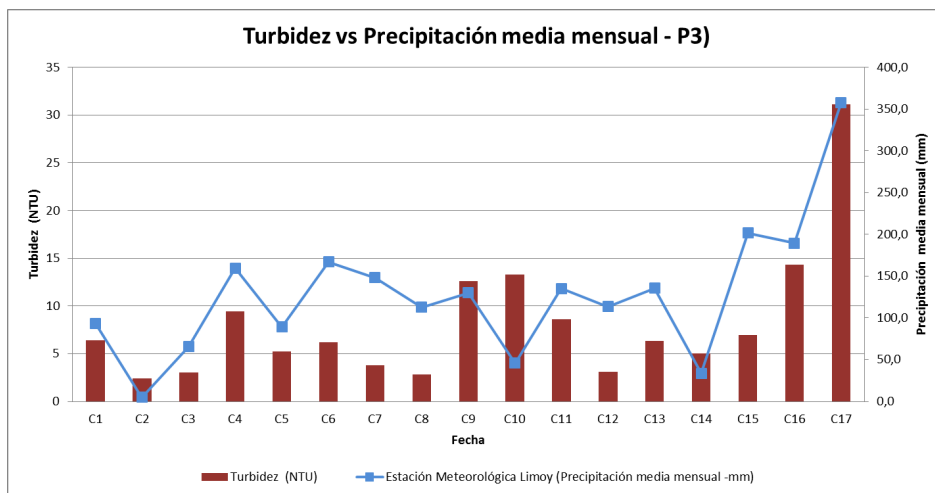


Figura 12. Turbidez vs Precipitación media mensual – P3

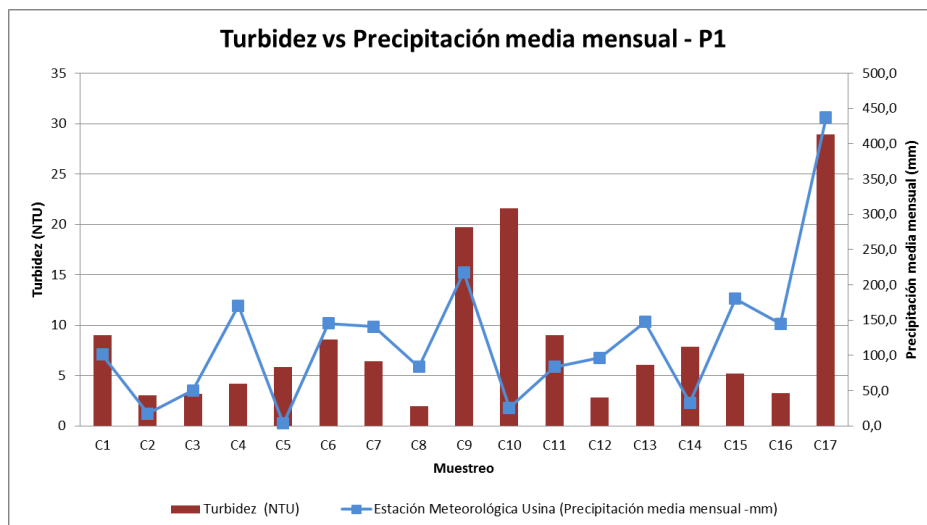
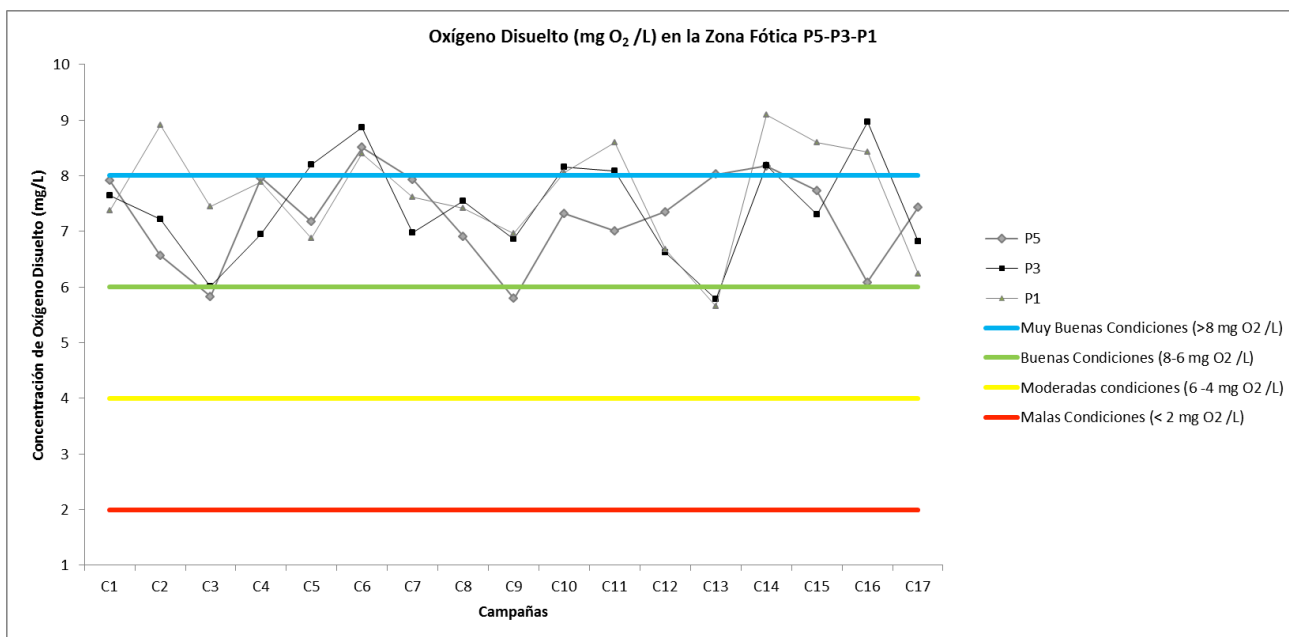


Figura 13. Turbidez vs Precipitación media mensual – P1





**Figura 14.** Clasificación de la Concentración de Oxígeno Disuelto en P5-P3-P1

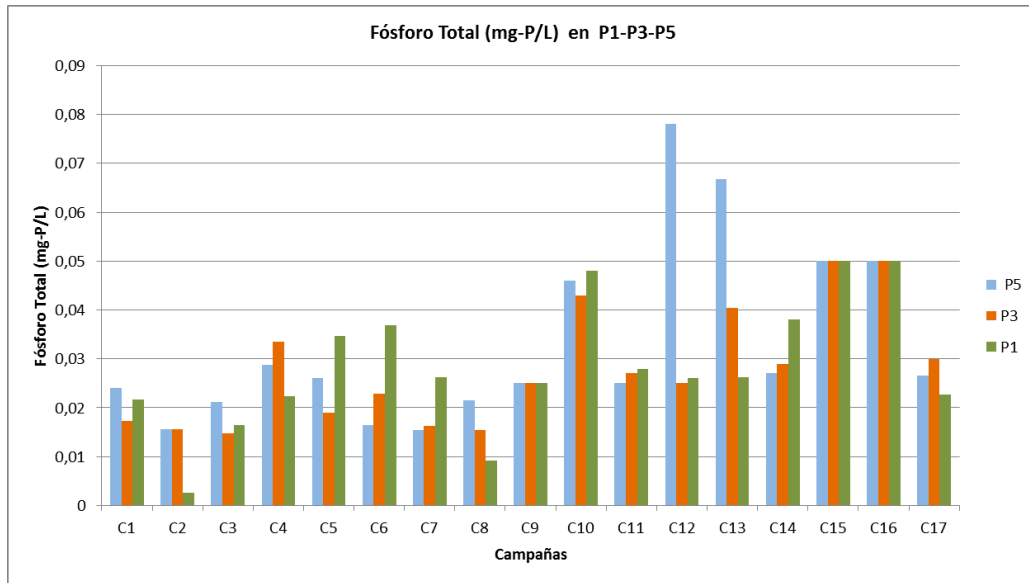
Como consecuencia de esta importancia en el control de la producción primaria en ecosistemas acuáticos continentales, el fósforo ha sido apuntado como el principal responsable por la eutrofización artificial de esos ecosistemas (Schindler et al, 2008).

Los resultados obtenidos de concentración de *Fósforo Total* durante de las 17 campañas son los siguientes (Figura 15.):

- En el punto P5 la concentración máxima obtenida fue de 0,08 mg-P/L; la mínima concentración es 0,02 mg-P/L y el promedio de 0,03 mg-P/L.

máxima obtenida fue de 0,05 mg-P/L; la mínima concentración es 0,01 mg-P/L y el promedio de 0,03 mg-P/L.

- En el punto P1 la concentración máxima obtenida fue de 0,05 mg-P/L; la mínima concentración es 0,0025 mg-P/L y el promedio de 0,03 mg-P/L.

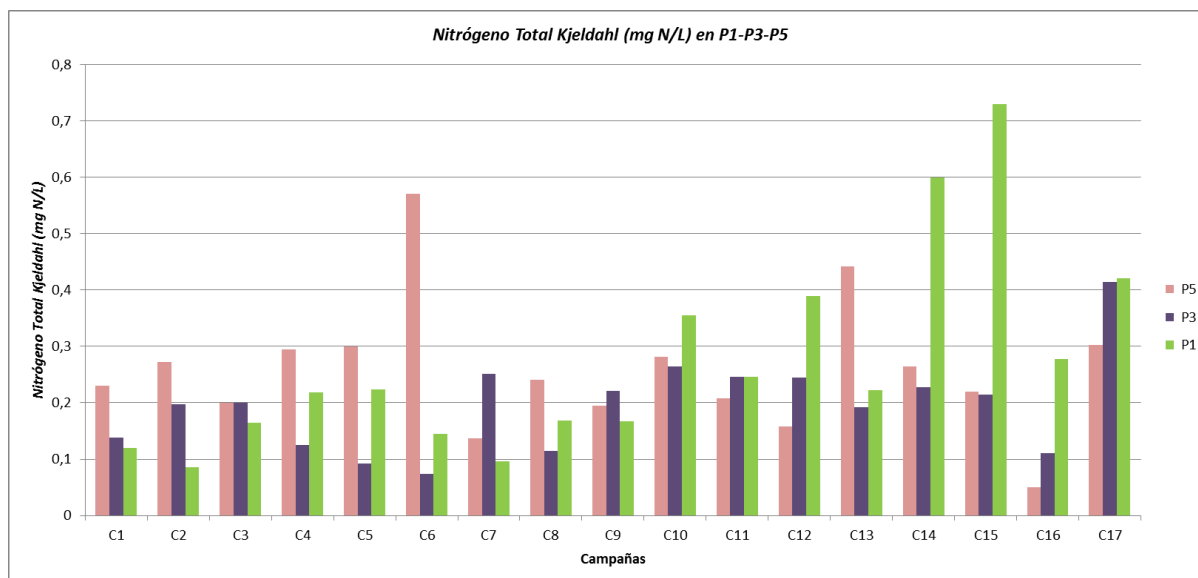


**Figura 15.** Concentración de Fósforo Total (mg-P/L) en P1-P3-P5

El **Nitrógeno** es indispensable para que los organismos pudiendo ser limitante de la producción primaria y secundaria, crecimiento de algas, microorganismos procarióticos (por ejemplo: bacterias planctónicas) y organismos eucariotas (consumidores secundarios como el zooplancton) en ecosistemas acuáticos, cuando en bajas concentraciones.

Los resultados obtenidos de concentración de *Nitrógeno Total Kjeldahl* durante de las 17 campañas son los siguientes (Figura 16):

- En el punto P3 la concentración máxima obtenida fue de 0,41 mg-N/L; la mínima concentración es 0,07 mg-N/L y el promedio de 0,20 mg-N/L.
- En el punto P1 la concentración máxima obtenida fue de 0,73 mg-N/L; la mínima concentración es 0,09 mg-N/L y el promedio de 0,09 mg-N/L.
- En el punto P5 la concentración máxima obtenida fue de 0,57 mg-N/L; la mínima concentración es 0,05 mg-N/L y el promedio de 0,26 mg-N/L.



**Figura 16.** Concentración de Nitrógeno Total Kjeldahl (mg-N/L) en P1-P3-P5

### 3.4.3. Caracterización Biológica

En el periodo 2010-2015 se realizaron estudios del *Fitoplancton* y fueron encontrados en los puntos de muestreos P5, P3 y P1 7 grandes grupos algales, los cuales contienen un total de 57 taxones (Tabla 6)

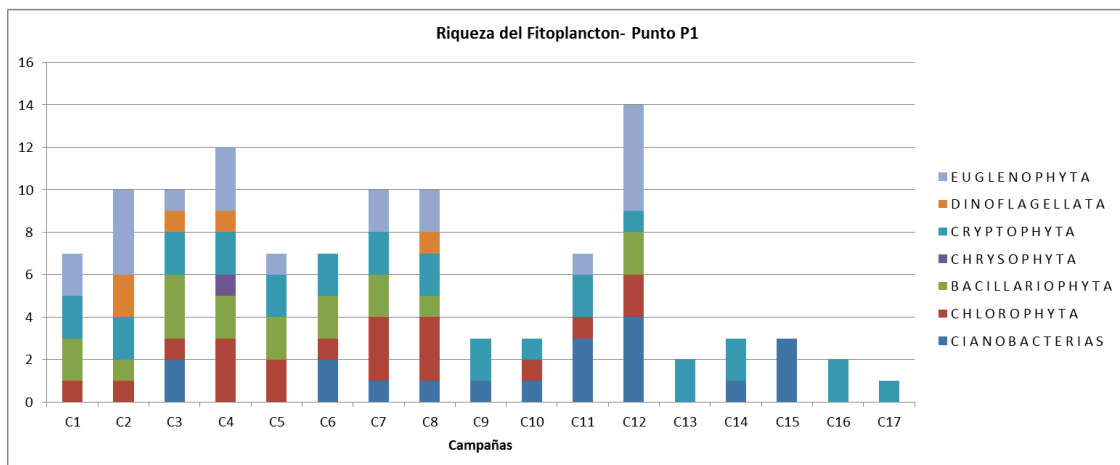
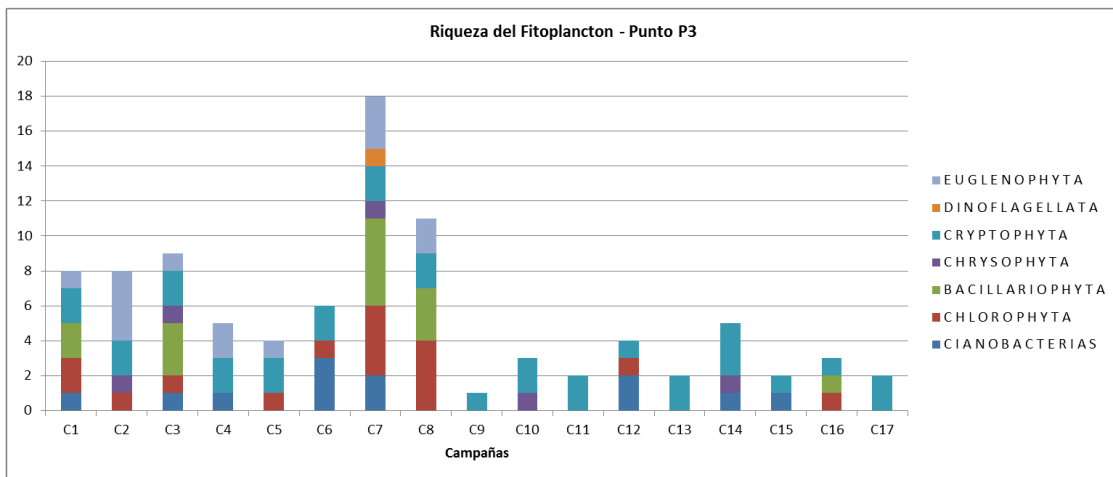
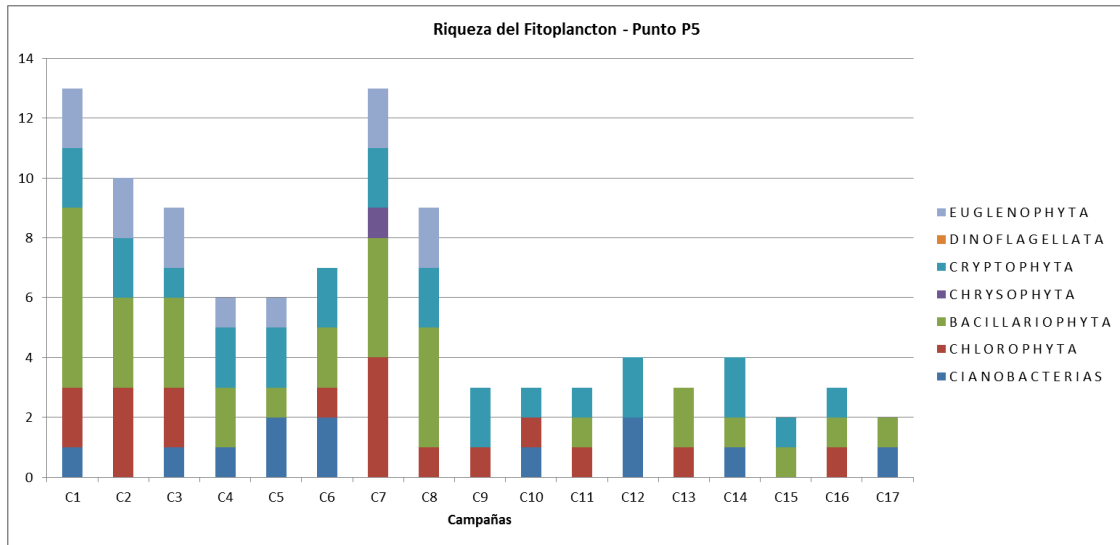
**Tabla 6.** Grupos Algales encontrados 2010-2015

GRUPO	Nº DE ESPECIES
<i>Cyanobacterias</i>	12
<i>Chlorophyta</i>	17
<i>Bacillariophyta</i>	16
<i>Chrysophyta</i>	2
<i>Cryptophyta</i>	3
<i>Dinoflagellata</i>	3
<i>Euglenophyta</i>	4

Para la caracterización biológica en cuanto a la comunidad fitoplanctónica es considerada la riqueza (nº de especies), la densidad algal (cel/ml), una aproximación del biovolumen (mm<sup>3</sup>/L) y concentración de clorofila a (µg/L).

La *riqueza* en número de especies se representan en la Figura 17 en donde se muestra la distribución de los grupos algales en el periodo de estudios para los 3 puntos de monitoreo.

Los resultados presentados muestran que en las campañas C1 al C8 mayormente existen *Euglenophytas*, *Bacillariophytas* y *Chlorophytas* para los tres puntos de muestreo, en cambio durante C9 en adelante hubo una notoria disminución de la riqueza del fitoplancton.



**Figura 17.** Riqueza del Fitoplancton en los puntos P5-P3- del Fitoplancton en los

En cuanto a la *Densidad algal* expresada en cel/ml existe una dominancia de *Cianobacterias* en comparación con los demás grupos algales. (Figura 18)

Para la determinación del *Biovolumen* ( $\text{mm}^3/\text{L}$ ) no se contó con datos propios debido a que no es considerado aún como un parámetro dentro de la caracterización biológica, por lo que fue necesario establecer una metodología a efectos de estimar una aproximación para el mismo.

Para ese efecto se realizaron consultas con referencias normalizadas y bases de datos de diversos orígenes, en los cuales para la mayoría de las especies se determinaron valores de referencia o simplemente una base de datos de los diversos biovolúmenes determinados para una misma especie.

Las referencias y base de datos consultadas y consideradas son:

- Standard reference algal cell/filament volumes used within the calculator are based upon various sources including; the National Protocol for the Monitoring of Cyanobacteria and their Toxins in Surface Fresh Waters (NRMMC 2005), Water Quality Research Australia (WQRA), International Guidance Manual for the Management of Toxic Cyanobacteria (2009) and

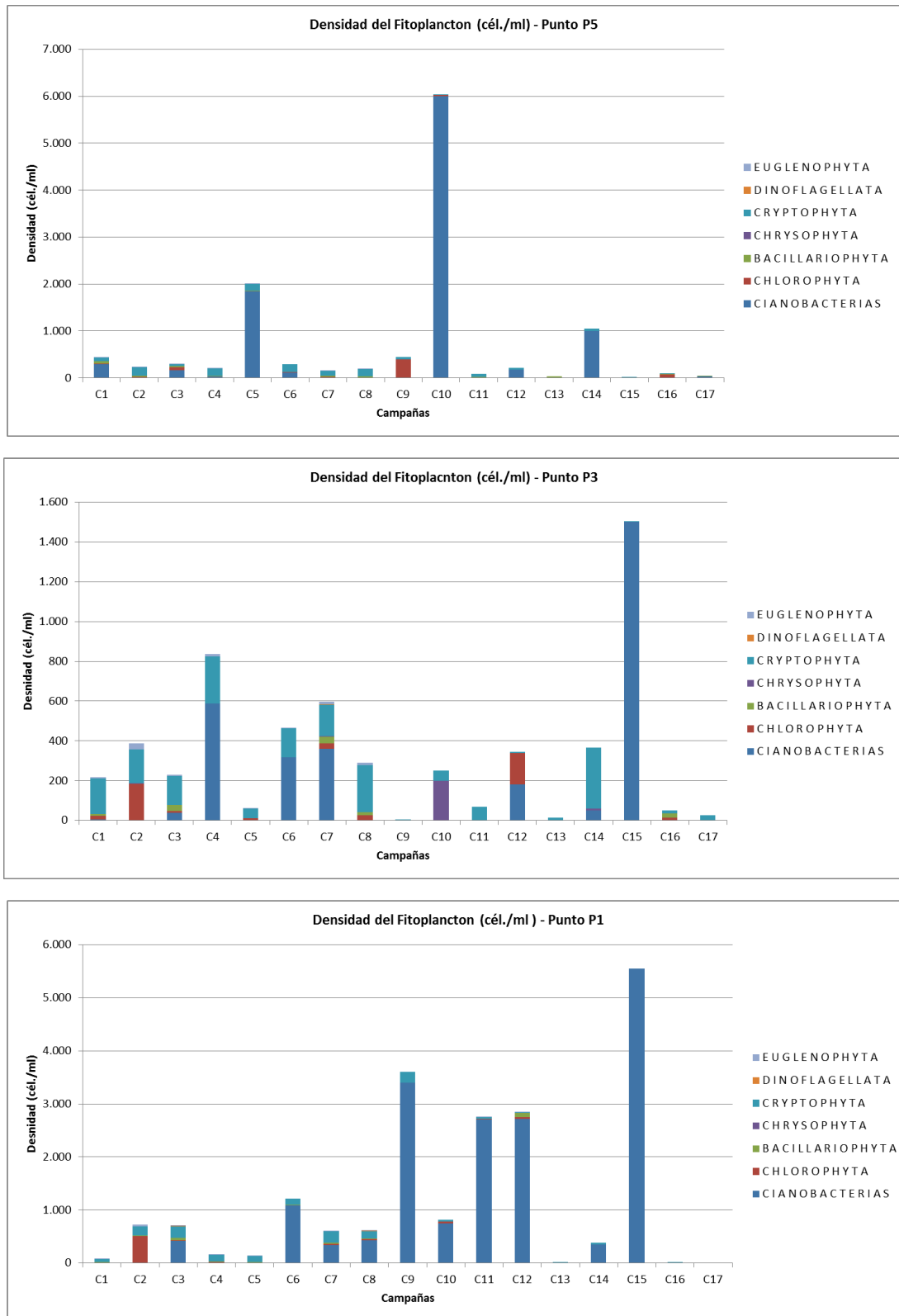
biovolumes measured by NATA accredited laboratories. (AUSTRALIA).

- INAG, I.P. 2011. *Manual para a avaliação da qualidade biológica da água. Guia de utilização da tabela de valores-guia normalizados de biovolumes e determinação do biovolume através de procedimentos laboratoriais*. Ministério da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território. Instituto da Água. (PORTUGAL).
- Phycology Section, Patrick Center for Environmental Research, Academy of Natural Sciences of Drexel University. Taxonomy Systems. <https://diatom.ansp.org/taxaservice/ShowList.aspx>

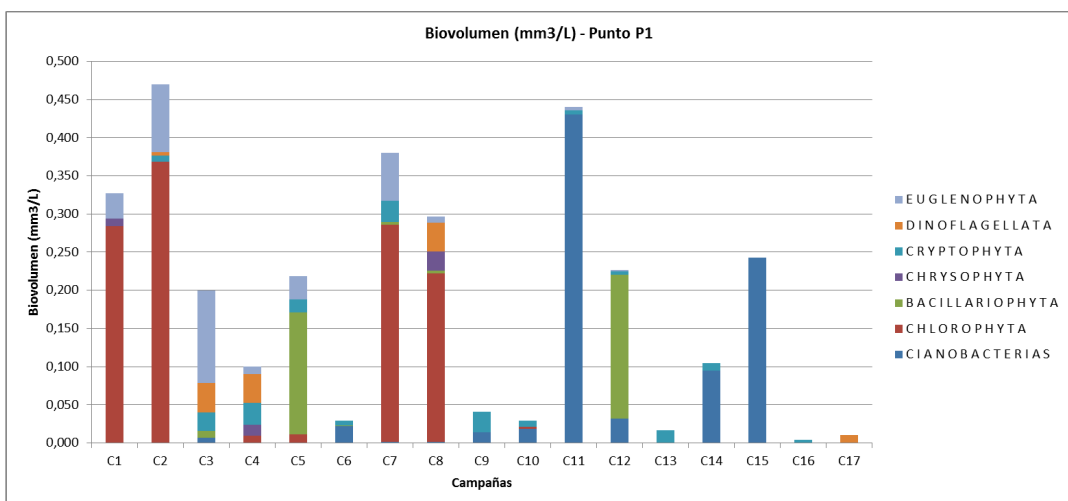
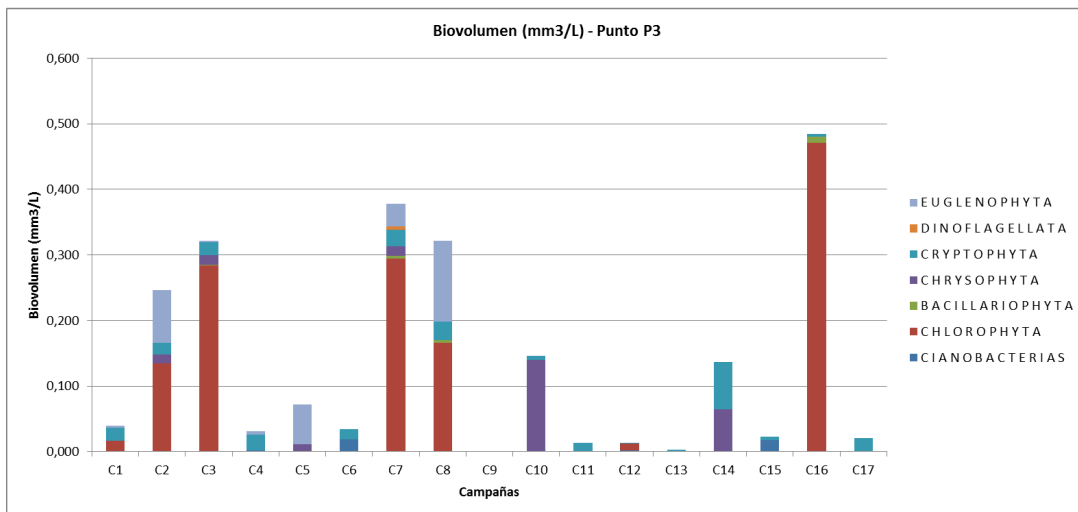
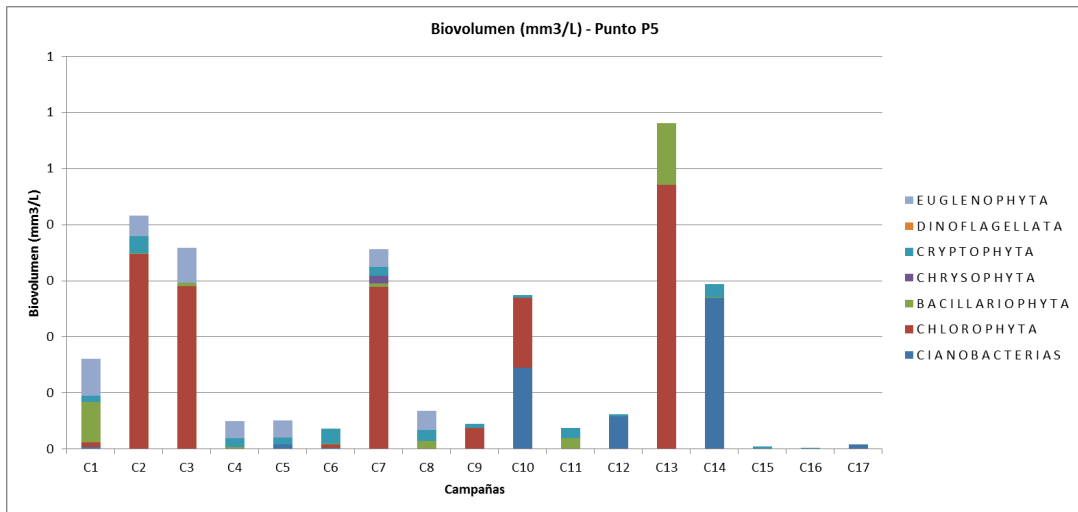
Otra limitante encontrada para la determinación del Biovolumen algal fue que la identificación taxonómica del fitoplancton en algunos casos no pudo ser determinada hasta el nivel de especies solo hasta la identificación del género. No obstante en las referencias consultadas se pudo lograr asignarle un valor y forma geométrica a los géneros encontrados.

Los resultados logrados para la determinación del Biovolumen Algal, con

la metodología establecida se exponen en la  
 Figura 19.



**Figura 18.** Densidad del Fitoplancton (cél./ml) en los puntos P5-P3- P1



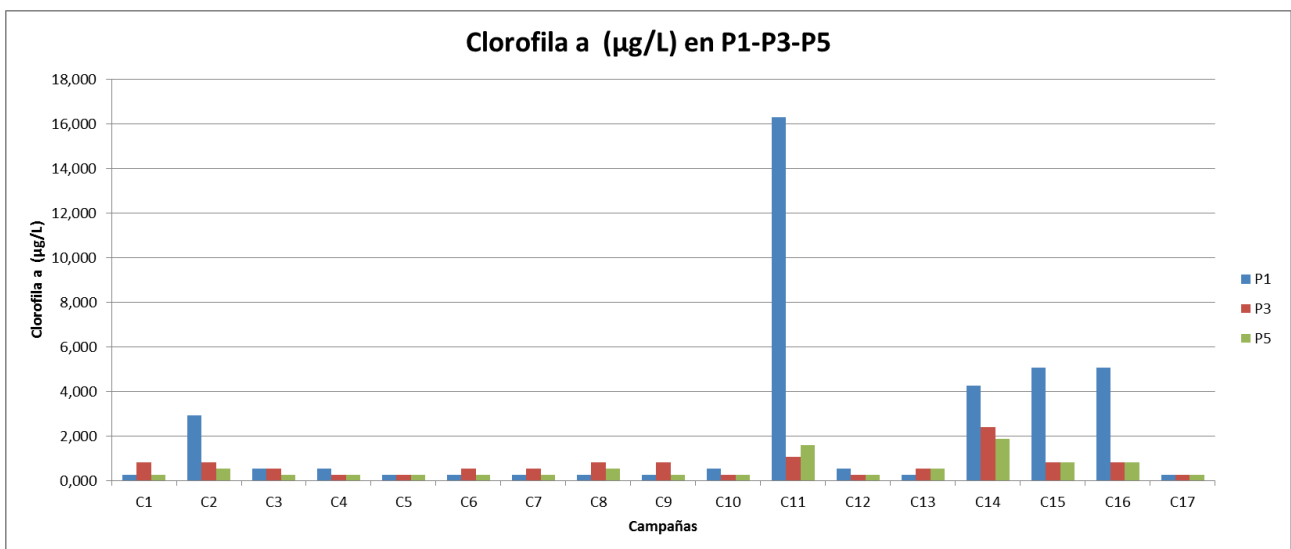
**Figura 19.** Biovolumen Algal (mm<sup>3</sup>/L) por grupo algal en los puntos P5-P3- P1

Los resultados obtenidos de concentración de *Clorofila a* ( $\mu\text{g/L}$ ) durante de las 17 campañas son los siguientes (Figura 20):

- En el punto P5 la concentración máxima obtenida fue de 1,870  $\mu\text{g/L}$ ; la mínima concentración es 0,267  $\mu\text{g/L}$  y el promedio de 0,550  $\mu\text{g/L}$
- En el punto P3 la concentración máxima obtenida fue de 2,40  $\mu\text{g/L}$ ; la mínima concentración es 0,267  $\mu\text{g/L}$  y el promedio de 0,691  $\mu\text{g/L}$

- En el punto P1 la concentración máxima obtenida fue de 16,3  $\mu\text{g/L}$ ; la mínima concentración es 0,267  $\mu\text{g/L}$  y el promedio de 2,231  $\mu\text{g/L}$ .

En la campaña C11 se obtiene en el punto P1 un valor bastante alto de concentración de clorofila a, el cual indica que durante este monitoreo las aguas se encontraban eutrofizadas.



**Figura 20.** Concentración de Clorofila a en los puntos P5-P3- P1



### 3.5. Estado Trófico

De forma general podemos definir a la “eutrofización” como un aumento de la concentración de nutrientes- especialmente el fósforo y nitrógeno- en una determinado ecosistema acuático, que tiene como consecuencia el aumento de la productividad de diversos de sus compartimientos y alteraciones diversas sobre su funcionamiento. Como consecuencia de este proceso, el ecosistema acuático pasa de la condición de oligotrófico o mesotrófico para eutrófico e hipereutrófico. (Esteves, 2011)

Para la determinación del Estado Trófico del Embalse de ITAIPU se utiliza el Índice de Estado Trófico (IET), propuesto por Carlson (1977) y modificado para regiones tropicales por Toledo et al. (1983), que tiene por finalidad evaluar la calidad de agua en cuanto al enriquecimiento por nutrientes. Este índice utiliza solamente tres parámetros para su determinación: clorofila a, transparencia del agua y fósforo total.

Los rangos de clasificación se exponen en la Tabla 7 y las ecuaciones utilizadas para la determinación del Índice de Estado Trófico son:

$$IET(\text{Secchi}) = 10 \left[ 6 - \left( \frac{0,64 + \ln \text{Secchi}}{\ln 2} \right) \right]$$

$$IET(\text{Fosfato}) = 10 \left[ 6 - \left( \frac{\ln[80,32/\text{Fosfato}]}{\ln 2} \right) \right]$$

$$IET(\text{Clorofila}) = 10 \left[ 6 - \left( \frac{2,04 - 0,695 \cdot \ln \text{Clorofila}}{\ln 2} \right) \right]$$

$$IET(\text{Médio}) = \frac{IET(\text{Secchi}) + 2[IET(\text{Fosfato}) + IET(\text{Clorofila})]}{5}$$

**Tabla 7.** Límites para estados tróficos según Toledo (1983)

Índice de estado trófico (IET)	
Índice	Clasificación
$IET \leq 24$	Ultraoligotrófico
$24 < IET \leq 44$	Oligotrófico
$44 < IET \leq 54$	Mesotrófico
$54 < IET \leq 74$	Eutrófico
$IET > 74$	Hipereutrófico

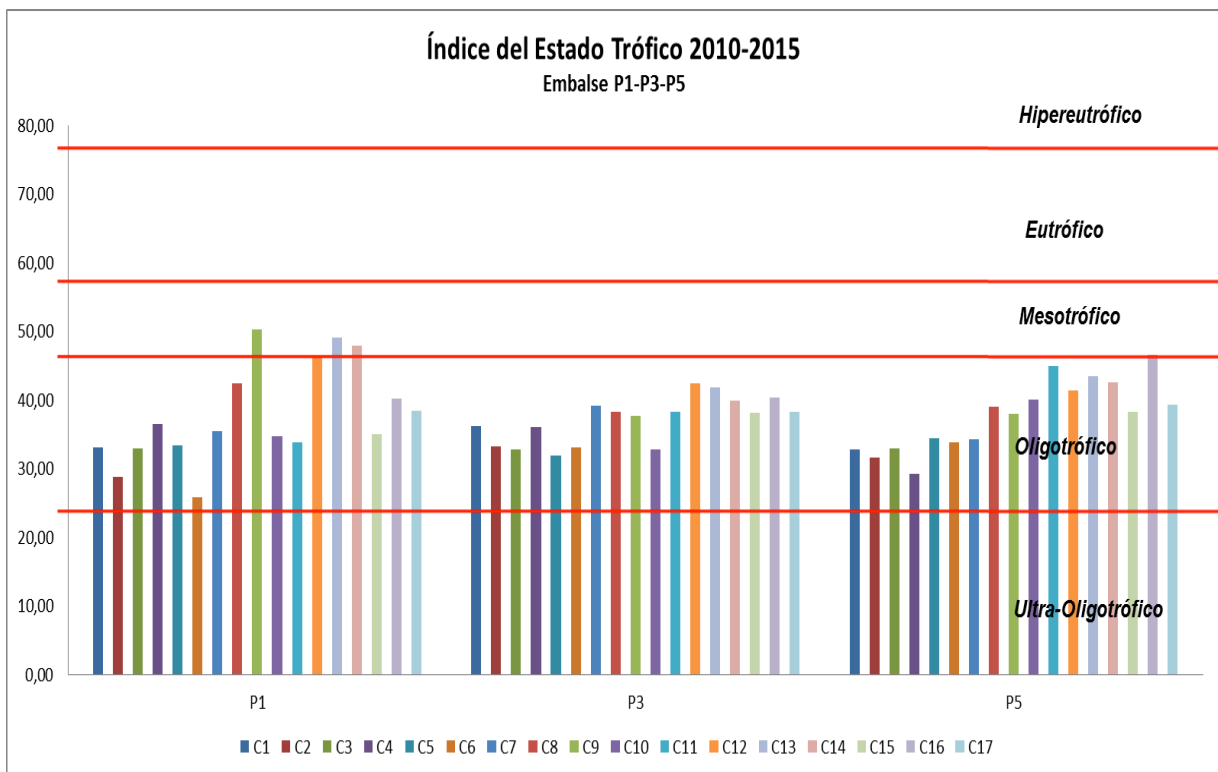
De acuerdo a este índice, los embalses pueden ser clasificados en 05 categorías referentes a su grado de trofia (CETESB, 2010)

- Ultraoligotrófico: cuerpos de agua limpios con productividad muy baja. Presenta concentraciones insignificantes de nutrientes, no causando perjuicio a los usos de agua.
- Oligotrófico: cuerpos de agua limpios, de baja productividad, en los que no ocurren interferencias indeseables sobre los usos del agua.
- Mesotrófico: cuerpos de agua con productividad intermedia, con posibles implicaciones sobre la calidad del agua, más en niveles aceptables para la mayoría de los casos.
- Eutrófico: cuerpos de agua con alta productividad en relación a las condiciones naturales, de baja transparencia. En general, son afectados por actividades antrópicas, ocurriendo alteraciones

indeseables en la calidad del agua e interferencias en sus múltiples usos.

- **Hipereutrófico:** cuerpos de agua afectados significativamente por elevadas concentraciones de nutrientes y materia orgánica, comprometiendo sus usos. Pueden presentar muchas floraciones de algas y mortandad de peces.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 21, en donde el nivel de estado trófico del embalse de Itaipu se encuentra predominantemente dentro del **estado oligotrófico**, por lo tanto considerando este índice se puede indicar que las aguas del embalse presentan baja productividad, donde no ocurren interferencias indeseables sobre los posibles usos del agua.



**Figura 21.** Estado Trófico del Embalse de Itaipu según Toledo (1983)

### 3.6. Potencial Ecológico

La DMA incorpora el concepto de estado ecológico como una expresión de la calidad de la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos asociados a las aguas superficiales. La diferencia esencial entre el concepto de estado y potencial ecológico reside en que ambos conceptos se aplican a distintos tipos de masas de agua.

El uso y calificación del término de estado ecológico responde al funcionamiento de los ecosistemas acuáticos asociados a las masas de aguas superficiales naturales, reservándose el término de *potencial ecológico* a las masas de agua artificiales o muy modificadas, entre las que quedan englobados los embalses.

El potencial ecológico es una expresión de la calidad de la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos asociados a una masa de agua artificial o muy modificada.

Se ha definido la caracterización hidromorfológica, fisicoquímica y biológica del embalse de Itaipu considerando los 3 puntos de estudio dentro del cuerpo principal, asimismo se ha definido el nivel del estado trófico para el periodo de estudio.

Así también se ha enmarcado la tipología del embalse en una aproximación a las variables y consideraciones establecidas

para dicha definición en la Orden ARM/2656/2008.

Para la obtención del potencial ecológico en función a la DMA son considerados los parámetros agrupados en indicadores biológicos y fisicoquímicos (ver Tabla 8)

**Tabla 8.** Parámetros utilizados para la determinación del Potencial Ecológico

Indicador	Elementos	Parámetros
Biológico	Composición, abundancia y biomasa del Fitoplancton	Biovolumen Algal
		Biomasa algal: Clorofila a
		Porcentaje de cianobacterias
Fisicoquímico	Concentración de Nutrientes	Fósforo Total ( $\mu\text{g P/L}$ )
		Concentración de Oxígeno
	Oxigenación	Disuelto (mg/L)
		Profundidad del Disco de Secchi (m)

Una vez definido los parámetros a ser considerados para la determinación del Potencial Ecológico se procede a las métricas seleccionadas para cada indicador.

#### 3.6.1. Indicadores biológicos

Para la medición del elemento de calidad Fitoplancton se utilizan los valores de cambio de clase establecidos en forma de Ratio de Calidad Ecológico<sup>1</sup> (RCE), según

<sup>1</sup> Relación entre los valores observados en la masa de agua y los correspondientes a las condiciones de referencia del tipo al que pertenece dicha masa de agua, expresado mediante un valor numérico comprendido entre 0 y 1.

se indica en el anexo II, apartado C del Real Decreto 817/2015 (ver Tabla 9).

**Tabla 9.** Máximo potencial ecológico y límites de cambio de clase de potencial (RD817/2015)

Tipo de Embalse	Indicador	Unidades	Máximo Potencial Ecológico	Límites de cambio de clase RCE		
				Bueno o superior/ Moderado	Moderado/ Deficiente	Deficiente/Malo
2	% Cianobacterias	%	0,00	0,908	0,607	0,303
	Clorofila a	mg/m <sup>3</sup>	2,00	0,211	0,14	0,07
	Biovolumen	mm <sup>3</sup> /L	0,36	0,189	0,126	0,063

Para la composición, abundancia y biomasa algal son considerados los parámetros de % de Cianobacterias, Biovolumen y Concentración de clorofila a. No es posible determinar el Índice de grupo algales (IGA) debido a que la estructura de diversidad del fitoplancton en los estudios del embalse de ITAIPU presentan una estructura taxonómica diferente, por lo tanto no es considerado para la determinación del Potencial ecológico.

La metodología utilizada para la determinación de una aproximación del Biovolumen algal fue explicada en el apartado 2.4.3.1.

Para el cálculo de % de Cianobacterias indicadoras se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$\%CIANO = \frac{BVOL_{CIA} - [BVOL_{CHR} - (BVOL_{MIC} + BVOL_{WOR})]}{BVOL_{TOT}}$$

Dónde:

- BVOL<sub>CIA</sub> Biovolumen de cianobacterias totales
- BVOL<sub>CHR</sub> Biovolumen Chroococcales
- BVOL<sub>MIC</sub> Biovolumen de *Microcystis*
- BVOL<sub>WOR</sub> Biovolumen de *Woronichinia*
- BVOL<sub>TOT</sub> Biovolumen total del Fitoplancton

Para los cálculos de RCE en función a % de Cianobacterias, Biovolumen y Concentración de clorofila a, son utilizadas las siguientes formulas:

% de Cianobacterias

$$RCE_{\%Ciano} = (100 - V_{observado}) / (100 - V_{referencia})$$

Biovolumen Algal

$$RCE_{Biol} = V_{referencia} / V_{observado}$$

Clorofila a

$$RCE_{Chl} = V_{referencia} / V_{observado}$$

Utilizando las fórmulas para la determinación del RCE en función al Máximo Potencial Ecológico (Valor de referencia) se clasifica el potencial ecológico según el RCE utilizando los rangos establecidos en la Tabla 9 para los embalses del tipo 2, así como una escala de colores para clasificación (ver Tabla 10)

**Tabla 10.** Clases de Potencial ecológico para Embalses de Tipo 2

RCE	Bueno o Superior	Moderado	Deficiente	Malo
%	>0,908	0,907 –	0,606 –	<0,303
Cianobacterias		0,607	0,303	
Biovolumen	>0,189	0,188 -	0,125 –	<0,063
Algal		0,126	0,063	
Clorofila a	>0,211	0,210 –	0,13 –	<0,07
		0,14	0,07	

Una vez obtenidos los RCE es necesario llevar a cabo la transformación de los valores de RCE obtenidos, a una escala numérica. Para el efecto se establecen unas ecuaciones para realizar dicha transformación en función al tipo de embalse (ver Tabla 11).

**Tabla 11.** Ecuaciones para transformación de RCE a escala numérica para embalses tipo 2

% Cianobacterias	
RCE >0,91	$RCE_{trans} = 4,4444 \times RCE - 3,4444$
RCE ≤ 0,91	$RCE_{trans} = 0,6593 \times RCE$
Biovolumen	
RCE >0,19	$RCE_{trans} = 0,4938 \times RCE + 0,5062$
RCE ≤ 0,19	$RCE_{trans} = 3,1579 \times RCE$
Clorofila a	
RCE >0,21	$RCE_{trans} = 0,5063 \times RCE + 0,4937$
RCE ≤ 0,21	$RCE_{trans} = 2,8571 \times RCE$

Posteriormente se combinan los indicadores por medio de la media RCE transformado correspondiente a los parámetros de abundancia-biomasa y composición, para la obtención de RCE transformado del embalse.

La combinación de los RCE transformados se realiza en primera etapa calculado la media entre los RCE transformados de los

indicadores de abundancia – biomasa que corresponden a clorofila y Biovolumen. Como segunda parte se toma el valor de RCE transformado del % de Cianobacterias directamente como único indicador de composición, ya que no se cuenta con el RCE proveniente del IGA. Finalmente se halla la media de los valores de RCE transformados en las partes 1 y 2, según la siguiente fórmula:

$$RCE_{TransEmbalse} = [(RCE_{TransBiov} + RCE_{TransChr})/2 + RCE_{Trans\%Ciano}]/2$$

Una vez obtenido el Ratio de Calidad transformado del Embalse se realiza la clasificación (Tabla 12) para la determinación del Potencial ecológico.

**Tabla 12.** Clasificación del Potencial Ecológico (PE\_BIO) según el RCE transformado del Embalse

Clase de Potencial ecológico	Bueno o Superior	Moderado	Deficiente	Malo
RCE <sub>TransEmbalse</sub> (PE_Bio)	>0,6	0,4 – 0,6	0,2 – 0,4	<0,2
Valoración de cada Clase	4	3	2	1

### 3.6.2. Indicadores Físicoquímicos

Se establece el potencial ecológico en función a los indicadores físicoquímicos considerando los parámetros *Transparencia del Disco de Secchi (m)*, *concentración de oxígeno disuelto (mg/L)* y *la concentración de Fósforo Total (µg P/L)*,

Para la *transparencia* del disco de secchi por ser uno de los indicadores del estado trófico del embalse y por su relación con la productividad biológica. Se aplican los criterios de la OCDE (1982) para los límites de clase del potencial ecológico.

El *Oxígeno Disuelto* (mg/L O<sub>2</sub>) para la determinación de las condiciones de oxigenación como un indicador para la vida acuática. Se aplican los criterios de oxigenación son los establecidos para lagos de agua dulce en el ámbito europeo (Premazzi y Chiaduani, 1992).

La concentración del *Fósforo Total* (µg P/L) considerado como principal precursor de los procesos de eutrofización y elemento limitante de la para el crecimiento de las algas. Se aplican los criterios de la OCDE (1982) para los límites de clase del potencial ecológico.

En la tabla 13 se indican los límites de clase del potencial ecológico en función a los elementos de calidad seleccionados.

**Tabla 13.** Clases de Potencial ecológico para los elementos de calidad de indicadores fisicoquímicos

Clase de Potencial ecológico	Muy bueno	Bueno o Superior	Moderado	Deficiente	Malo
Transparencia (m)	>6	6-3	1,5 – 3	0,7-1,5	<0,7
Oxígeno Disuelto (mg/L O <sub>2</sub> )	>8	8-6	6-4	4-2	<2
Fósforo Total (µg P/L)	0-4	4-10	10-35	35-100	>100
Valoración de cada Clase	5	4	3	2	1

Una vez obtenida la clasificación de los elementos de calidad de los indicadores fisicoquímicos se procede a la valoración de cada clase según la escala establecida en la Tabla 14 y finalmente se obtiene el promedio de esa valoración para establecer el Potencial ecológico en función a los indicadores fisicoquímicos.

### 3.6.3. Potencial Ecológico final

La metodología propuesta para el potencial ecológico final (Tabla 14) es la combinación del potencial ecológico en

función a los indicadores biológicos y el potencial ecológico de los indicadores fisicoquímicos, basada en la propuesta experimental de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE, 2015)<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Confederación Hidrográfica del Ebro (2015). Red de seguimiento de masas de agua muy modificadas en la Demarcación Hidrográfica del Ebro. 208 págs. más anejos. Disponible en PDF en la web: <http://www.chebro.es>

**Tabla 14.** Combinación de los indicadores para el cálculo del Potencial Ecológico final (CHE, 2015)

<i>Ind_FQ</i>	<i>Ind_BIO</i>	<i>PE_FINAL</i>
Muy Bueno	Bueno o Superior	Bueno o Superior
Bueno	Bueno o Superior	Bueno o Superior
Moderado	Bueno o Superior	Moderado
Indistinto	Moderado	Moderado
Indistinto	Deficiente	Deficiente
Indistinto	Malo	Malo

Todas las valoraciones se realizan por cada punto de estudio en las 17 campañas de muestreo durante el periodo de 2010-2015, obteniéndose así el potencial ecológico final para cada punto y campaña. Finalmente se establece el promedio de la valoración del embalse en cada campaña y su comportamiento en el periodo de estudio.

#### 4. RESULTADOS

##### 4.1. Potencial ecológico de los indicadores biológicos

En función a la metodología establecida en el apartado 2.6.1 se obtuvieron los resultados (Tablas 15,16 y 17) para los puntos P1-P3-P5 en las 17 campañas, en donde existe una predominancia del estado bueno o superior.

**Tabla 15.** Resultados en P1 del Potencial Ecológico en función a los indicadores

Punto P1				
Campañas	RCE- %Ciano	RCE - Biovolumen	RCE - Clorofila a	PE_BIO
C1	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C2	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C3	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C4	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C5	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C6	Malo	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C7	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C8	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C9	Moderado	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C10	Deficiente	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C11	Malo	Bueno o Superior	Deficiente	Deficiente
C12	Moderado	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C13	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C14	Malo	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C15	Malo	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Moderado
C16	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C17	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior

**Tabla 16.** Resultados en P3 del Potencial Ecológico en función a los indicadores

<b>Punto P3</b>				
<b>Campañas</b>	<b>RCE- %Ciano</b>	<b>RCE - Biovolumen</b>	<b>RCE - Clorofila a</b>	<b>PE_BIO</b>
C1	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C2	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C3	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C4	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C5	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C6	Deficiente	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C7	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C8	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C9	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C10	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C11	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C12	Moderado	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C13	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C14	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C15	Malo	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C16	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C17	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior

**Tabla 17.** Resultados en P5 del Potencial Ecológico en función a los indicadores

<b>Punto P5</b>				
<b>Campañas</b>	<b>RCE- %Ciano</b>	<b>RCE - Biovolumen</b>	<b>RCE - Clorofila a</b>	<b>PE_BIO</b>
C1	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C2	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C3	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C4	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C5	Moderado	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C6	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C7	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C8	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C9	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C10	Deficiente	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C11	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C12	Malo	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C13	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C14	Malo	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Moderado
C15	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C16	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C17	Malo	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior



**4.2. Potencial ecológico de los indicadores fisicoquímicos**

En función a la metodología establecida en el apartado 2.6.2 se obtuvieron los

resultados expuestos en las Tablas 18, 19 y 20 para los puntos P1-P3-P5 en las 17 campañas.

**Tabla 18.** Resultados en P1 del Potencial Ecológico en función a los indicadores fisicoquímicos

Campañas	P1			
	Ind-FQ Transparencia (m)	Ind-FQ Oxígeno Disuelto mg/L	Ind. FQ Fósforo Total (µg P/L)	Ind_FQ
C1	Deficiente	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C2	Moderado	Muy bueno	Muy bueno	Bueno o Superior
C3	Moderado	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C4	Moderado	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C5	Deficiente	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C6	Deficiente	Muy bueno	Deficiente	Moderado
C7	Moderado	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C8	Moderado	Bueno o Superior	Bueno o Superior	Bueno o Superior
C9	Deficiente	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C10	Malo	Muy bueno	Deficiente	Moderado
C11	Deficiente	Muy bueno	Moderado	Moderado
C12	Moderado	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C13	Deficiente	Moderado	Moderado	Moderado
C14	Moderado	Muy bueno	Deficiente	Moderado
C15	Deficiente	Muy bueno	Deficiente	Moderado
C16	Moderado	Muy bueno	Deficiente	Moderado
C17	Deficiente	Bueno o Superior	Moderado	Moderado

**Tabla 19.** Resultados en P3 del Potencial Ecológico en función a los indicadores fisicoquímicos

Campañas	P3			
	Ind-FQ Transparencia (m)	Ind-FQ Oxígeno Disuelto mg/L	Ind. FQ Fósforo Total (µg P/L)	Ind_FQ
C1	Deficiente	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C2	Moderado	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C3	Moderado	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C4	Deficiente	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C5	Moderado	Muy bueno	Moderado	Bueno o Superior
C6	Deficiente	Muy bueno	Moderado	Moderado
C7	Moderado	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C8	Moderado	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C9	Deficiente	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C10	Deficiente	Muy bueno	Deficiente	Moderado
C11	Moderado	Muy bueno	Moderado	Bueno o Superior
C12	Moderado	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C13	Moderado	Moderado	Deficiente	Moderado
C14	Moderado	Muy bueno	Moderado	Bueno o Superior
C15	Deficiente	Bueno o Superior	Deficiente	Moderado
C16	Moderado	Muy bueno	Deficiente	Moderado
C17	Malo	Bueno o Superior	Moderado	Moderado

**Tabla 20.** Resultados en P5 del Potencial Ecológico en función a los indicadores fisicoquímicos

Campañas	P5			
	Ind-FQ Transparencia (m)	Ind-FQ Oxígeno Disuelto mg/L	Ind. FQ Fósforo Total (µg P/L)	Ind_FQ
C1	Moderado	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C2	Moderado	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C3	Deficiente	Moderado	Moderado	Moderado
C4	Deficiente	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C5	Deficiente	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C6	Moderado	Muy bueno	Moderado	Bueno o Superior
C7	Malo	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C8	Moderado	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C9	Deficiente	Moderado	Moderado	Moderado
C10	Deficiente	Bueno o Superior	Deficiente	Moderado
C11	Moderado	Bueno o Superior	Moderado	Moderado
C12	Deficiente	Bueno o Superior	Deficiente	Moderado
C13	Malo	Muy bueno	Deficiente	Moderado
C14	Deficiente	Muy bueno	Moderado	Moderado
C15	Deficiente	Bueno o Superior	Deficiente	Moderado
C16	Deficiente	Bueno o Superior	Deficiente	Moderado
C17	Malo	Bueno o Superior	Moderado	Moderado

#### 4.3. Potencial ecológico final

En función a la metodología establecida en el apartado 2.6.3 se obtuvieron los

resultados expresados en las Tablas 21, 22 y 23 para el Potencial Ecológico final del embalse de Itaipu para los puntos P1-P3-P5 en las 17 campañas.

**Tabla 21.** Resultados en P1 - Potencial Ecológico final

Campañas	P1		
	Ind_FQ	PE_BIO	PE_FINAL
C1	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C2	Bueno o Superior	Bueno o Superior	<b>Bueno o Superior</b>
C3	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C4	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C5	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C6	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C7	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C8	Bueno o Superior	Bueno o Superior	<b>Bueno o Superior</b>
C9	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C10	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C11	Moderado	Deficiente	<b>Deficiente</b>
C12	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C13	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C14	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C15	Moderado	Moderado	<b>Moderado</b>
C16	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C17	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>

**Tabla 22.** Resultados en P3 - Potencial Ecológico final

Campañas	P3		
	Ind_FQ	PE_BIO	PE_FINAL
C1	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C2	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C3	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C4	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C5	Bueno o Superior	Bueno o Superior	<b>Bueno o Superior</b>
C6	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C7	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C8	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C9	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C10	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C11	Bueno o Superior	Bueno o Superior	<b>Bueno o Superior</b>
C12	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C13	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C14	Bueno o Superior	Bueno o Superior	<b>Bueno o Superior</b>
C15	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C16	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C17	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>

**Tabla 23.** Resultados en P5 - Potencial Ecológico final

Campañas	P5		
	Ind_FQ	PE_BIO	PE_FINAL
C1	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C2	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C3	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C4	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C5	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C6	Bueno o Superior	Bueno o Superior	<b>Bueno o Superior</b>
C7	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C8	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C9	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C10	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C11	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C12	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C13	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C14	Moderado	Moderado	<b>Moderado</b>
C15	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C16	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>
C17	Moderado	Bueno o Superior	<b>Moderado</b>

## 5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos con la aproximación de metodología de la Directiva Marco de Agua de la comunidad Europea son posibles con algunas consideraciones, modificaciones y ajustes en función a la disponibilidad de datos.

La catalogación del *estado trófico* del embalse se determina en función al Índice de Estado Trófico desarrollado por Carlson (1977) y modificado para zonas tropicales por Toledo et al. (1983). Esta catalogación le otorga un nivel trófico mayoritariamente *oligotrófico* en la zona y periodo de estudio.

Para los elementos de calidad para los *indicadores biológicos* y el cálculo de los Ratios de calidad ecológicos (RCE) se aplica la metodología de la DMA con algunas restricciones, debido a la indisponibilidad de datos.

Para la determinación de la biomasa, las normativas tanto de Paraguay como Brasil consideran al parámetro clorofila a como la referencia, por lo tanto no es utilizado en el Biovolumen algal, por lo que es necesario realizar una estimación recurriendo a bases de datos y referencias de Portugal, Australia y Estados Unidos. Además se requiere, para mejorar esta aproximación o estimación, lograr identificar al fitoplancton hasta el nivel de especies, y en muchos casos durante el periodo de estudio se logró identificar hasta el nivel de género.

Asimismo estructura taxonómica para la cuantificación de la densidad y diversidad de la comunidad fitoplanctónica es otra limitante para la aplicación plena de la metodología. Debido a esta limitación se realizan algunos ajustes tales como la no consideración del Índice de Grupos Algales (IGA) como uno de los componentes para la determinación de la composición algal, lo cual implica un ajuste de la fórmula del Potencial ecológico con los parámetros biológicos.

No obstante, con las modificaciones propuestas a la metodología se logra obtener los Potenciales Ecológicos en función a los parámetros biológicos para cada punto de muestreo en todas las campañas. Los resultados indican que el embalse de ITAIPU, en la zona y periodo de estudio, presenta en forma general una clasificación del *Potencial ecológico bueno o superior* para sus componentes biológicos.

Por otro lado, para los elementos de calidad seleccionados como *indicadores fisicoquímicos* fue posible contar con los datos para todos los puntos de monitoreo así como para todas las campañas y realizar la clasificación en función a los valores de referencia para transparencia del disco secchi y concentración de fósforo total establecidos por la OCDE (1982) y para las condiciones de oxigenación se realizó la

clasificación establecida por Premazzi y Chiaduani (1992).

Teniendo que cuenta que la utilización de los valores de referencia de la OCDE (1982), específicamente para el elemento de calidad transparencia del disco secchi, le otorga un potencial ecológico entre moderado y deficiente, e inclusive en algunas campañas, una clasificación mala. Es por ello y dada la influencia de las lluvias en los parámetros de turbidez y transparencia en el embalse de ITAIPU, se podrían desarrollar estudios, análisis y correlaciones, para establecer valores propios de referencia.

Con la aplicación de los criterios indicados, se logra obtener los Potenciales Ecológicos en función a los parámetros fisicoquímicos para cada punto de muestreo en todas las campañas. Los resultados indican que el embalse de ITAIPU, en la zona y periodo de estudio, presenta en forma general una clasificación del *Potencial ecológico moderado* según los indicadores fisicoquímicos considerados.

El *potencial ecológico final* se logra con la combinación de los Potenciales Ecológicos biológicos y los indicadores fisicoquímicos, en función a criterios de combinaciones establecidos en forma experimental por la CHE (2015). Los resultados indican que el embalse de Itaipu, en el periodo de estudio, presenta una clasificación final del *Potencial ecológico moderado*.

## 6. CONCLUSIONES

Del trabajo realizado se puede concluir:

- La central Hidroeléctrica de Itaipu es un emprendimiento binacional entre Paraguay y Brasil. En temas ambientales cada país se rige por su propia normativa. En Paraguay la legislación o normativa aplicable a los recursos hídricos es aún incipiente, por lo que la utilización de metodologías de otras normativas más completas y detalladas es interesante y permite valorar en forma aproximada la condición de un cuerpo de agua.
- La aproximación a la metodología de la Directiva Marco de Agua de la Comunidad Europea es posible con algunas consideraciones, modificaciones y ajustes en función a la disponibilidad de datos.
- Se requiere realizar estudios y análisis más profundos para la determinación de valores de referencia que puedan ser aplicables a las condiciones hidromorfológicas, fisicoquímicas y biológicas de una masa de agua con la del embalse de Itaipu.

Como resultado de este trabajo, se realizará la incorporación de la determinación del Biovolumen Algal en los próximos estudios de calidad del agua del embalse de Itaipu,

los cuales son realizados en colaboración con el Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas (CEMIT) de la Universidad Nacional de Asunción (UNA).

## **BIBLIOGRAFIA**

- BOE (2008). ORDEN ARM/2656/2008 por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. Boletín Oficial del Estado num. 229 de 10 de septiembre 2008.
- BOE (2015). Real Decreto 817/2015 por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental. Boletín Oficial del Estado num. 219 de 12 de setiembre de 2015.
- Carlson R.E. (1977). Trophic State Index for Lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369.
- CE (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de Octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- CETESB (2010) – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Relatorios del Estado de San Paulo. Disponible en: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acceso el 01.06.2017.
- CHE (2015). Red de seguimiento de masas de agua muy modificadas en la Demarcación Hidrográfica del Ebro. 208 p. más anejos. Disponible en PDF en la web: <http://www.chebro.es>. Acceso 02.04.2017.
- Esteves F.A, (2011). Fundamentos de Limnología. 3º Edición. Rio de Janeiro. Interciencia. 826 p.
- INAG, I.P. 2011. Manual para a avaliação da qualidade biológica da água. Guia de utilização da tabela de valores-guia normalizados de biovolumes e determinação do biovolume através de procedimentos laboratoriais. 11 p más anexos. Ministério da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território. Instituto da Água. I.P.
- Itaipu Binacional (1975). Plan Básico de Conservación del medio ambiente. 41p.
- Marín R. (2003). Físicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas. Ediciones Diaz de Santos. 336p.
- OCDE (1982). Eutrophication of water: monitoring, assessment and control. Organization of Economic Cooperation and Development, Paris.
- Premazzi, G. y Chiaduani, G. (1992). Ecological quality of Surface Water. Commission of the

- European Communities, JRC Report EUR 14563, 124 p.
- WQRA (2009). The National Protocol for the Monitoring of Cyanobacteria and their Toxins in Surface Fresh Waters (NRMMC 2005). Disponible en <http://www.waterra.com.au/cyanobacteria-manual/Overview.htm>. Acceso en 04.04.2017.
- Taxonomy Systems. Phycology Section, Patrick Center for Environmental Research, Academy of Natural Sciences of Drexel University. <https://diatom.ansp.org/taxaservice/ShowList.aspx>. Acceso en 06.04.2017.
- Schindler D.W., Hecky R.E., Findlay D.L., Stainton M.P., Parker B.R. Peterson M.J. et al. (2008). Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of 37-years whole - ecosystem experiment. PNAS 105 (32): 11254-11258.
- Smith V.H., Joye S.B., Howarth R.W. (2006). Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. Limnol Oceanogr 51 (1 part 2): 351-355.
- Toledo Jr. A.P., Talarico M., Chinez S.J, Agudo E.G. (1983) A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. In: Anais do 12º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária. Camboriú. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária. 34p.

**UNIVERSIDAD DE ALCALÁ  
Y  
UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS**



**MASTER OFICIAL EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**PROYECTO DE FIN DE MASTER**

**La utilización de cartografía antigua para la  
reconstrucción del patrimonio cultural y paisajes del  
agua en el río Mijares (Castellón)**

**AUTOR:**

**Jaime Alberto Jaramillo Giraldo**

**DIRECTOR:**

**Juan Antonio Pascual Aguilar**

Alcalá de Henares, 06 de junio de 2017



## ÍNDICE

RESUMEN.....	187
1. INTRODUCCIÓN.....	187
1.1. PATRIMONIO CULTURAL... 187	
1.2. PUESTA EN VALOR.....	188
1.3. ÁREA DE ESTUDIO.....	189
1.4. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN.....	191
2. METODOLOGÍA.....	191
2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	191
2.2. FUENTES.....	191
2.2.1. PLANOS ANTIGUOS.....	191
2.2.2. IMÁGENES DE GOOGLE EARTH.....	194
2.2.3. IMÁGENES PNOA.....	194
2.3. PROCESO METODOLÓGICO	194
2.3.1. LECTURA DE PLANOS ANTIGUOS.....	197
2.3.2. GEORREFERENCIACIÓN.....	200
2.3.3. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS, LÍNEAS Y POLÍGONOS EN PLANOS INDIVIDUALES Y DIGITALIZACIÓN DE SUS ELEMENTOS.....	200
2.3.4. DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS (TABLA DE ATRIBUTOS).....	200
2.3.5. ELABORACIÓN DE RUTAS PARA VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA (CRITERIOS).....	201
2.3.6. VALIDACIÓN EN CAMPO....	201
2.3.7. IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS.....	201
2.3.8. TOMA DE COORDENADAS.	202
2.3.9. DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS.....	202
2.3.10. TOMA DE REGISTROS FOTOGRÁFICOS.....	202
2.3.11. PATRIMONIO ORAL.....	202
2.3.12. EQUIPOS Y SOFTWARE.....	202
3. RESULTADOS.....	203
3.1. VALIDACIÓN Y AJUSTE DE PLANOS ANTIGUOS.....	203
3.2. REPRESENTACIÓN ESPACIAL DE ELEMENTOS HIDRÁULICOS IDENTIFICADOS... 204	
3.2.1. MAPA DE ELEMENTOS DE PATRIMONIO HIDRÁULICO PUNTUALES.....	205
3.2.2. MAPA DE ELEMENTOS DE PATRIMONIO LINEAL.....	205
3.2.3. MAPA DE ELEMENTOS DE PATRIMONIO POLIGONAL.....	205
3.3. RESUMEN DE ELEMENTOS DE PATRIMONIO POR MUNICIPIO.....	210
3.4. RESUMEN ESTADÍSTICO.....	211
3.5. VALIDACIÓN DE COORDENADAS DE CAMPO VS. COORDENADAS DE PLANOS ANTIGUOS.....	213
3.6. FICHAS TÉCNICAS TEMÁTICAS.....	213
4. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES.....	217
5. BIBLIOGRAFÍA.....	219
6. ANEXO: FICHAS DE CAMPO – FICHA TÉCNICA: FT01.....	220

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Superficie municipal del área de estudio en la Provincia de Castellón.....	191
<b>Tabla 2.</b> Atributos de planos antiguos por municipio .....	192
<b>Tabla 3.</b> Simbología utilizada en planos antiguos.....	197
<b>Tabla 4.</b> Error Residual en el ajuste de planos .....	204
<b>Tabla 5.</b> Inventario de puntos del Patrimonio Hidráulico en el área de estudio. ....	210
<b>Tabla 6.</b> Validación de Coordenadas de campo Vs. Coordenadas planos antiguos .....	213

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Pilares de la gestión del patrimonio.....	189
<b>Figura 2.</b> Mapa de localización área de estudio .....	190
<b>Figura 3.</b> Representación del Mapa Onda Zona 1ª (CNIG, 1938).....	193
<b>Figura 4.</b> Detalle plano Onda zona 1ª. Balsa y Noria (CNIG, 1938).....	193
<b>Figura 5.</b> Distrito de riego Miralcamp (Google Earth, Google inc.).....	194
<b>Figura 6.</b> Diagrama Metodológico para el reconocimiento del Patrimonio hidráulico .....	196
<b>Figura 7.</b> Proceso de Georreferenciación en el reconocimiento del Patrimonio Hidráulico. ....	200
<b>Figura 8.</b> Tabla de atributos línea de puntos.....	201
<b>Figura 9.</b> Cuadro de validación de ajuste de planos.....	203
<b>Figura 10.</b> Mapa de puntos .....	206
<b>Figura 11.</b> Mapa comparativo Norias y Fuentes.....	207
<b>Figura 12.</b> Mapa de elementos hidráulicos lineales .....	208
<b>Figura 13.</b> Mapa de cultivos y superficie de riego.....	209
<b>Figura 14.</b> Estadísticas de elementos ..	212

## **ABREVIATURAS**

IGN: Instituto de Geografía Nacional de España.

PNOA: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.

CNIG: Centro Nacional de Información Geográfica

## RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló para optar al grado de Máster en hidrología y Gestión de Recursos Hídricos. El objetivo fundamental del mismo es contribuir a la difusión del rico Patrimonio Histórico existente en un sector de la cuenca del río Mijares, Provincia de Castellón en la Comunidad Valenciana. Dicho Patrimonio se caracteriza por su diversidad e importancia en el desarrollo agrícola, industrial y cultural, constituyéndose en claro ejemplo de cómo el hombre con su ingenio se adapta a la naturaleza. El uso de la Cartografía antigua nos ayuda a identificar este valioso patrimonio convirtiéndose en importante herramienta para su reconstrucción conservación y difusión a generaciones actuales y futuras.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Patrimonio cultural

El Patrimonio Cultural definido como “Conjunto de manifestaciones u objetos nacidos de la producción humana, que una sociedad ha recibido como herencia, y que constituyen elementos significativos de su identidad como pueblo” (Llull, 2005), nos reafirma en la necesidad de ir más allá del viejo concepto de patrimonio histórico que se circunscribía solo a la monumentalidad y a la estética, y adentrarnos en los nuevos conceptos de puesta en valor de los bienes patrimoniales que incorporan la investigación histórica, el estudio socioeconómico, su

entorno paisajístico, la educación y la importancia de su difusión según Guglielmino (2007). Esto es particularmente válido para el patrimonio hidráulico, dada su incidencia en aspectos básicos del desarrollo social relacionados con el uso del agua para consumo doméstico, el desarrollo agrario, su uso industrial y recreacional.

El hombre a través de la historia ha desarrollado métodos que le permitan la localización de fuentes de agua. Ha utilizado su ingenio para crear elementos que faciliten su captación como presas, azudes, pozos, norias, galerías, etc., formas de conducir el agua hasta los sitios donde se requiere este elemento mediante acueductos, canales, acequias, tuberías, obras para su regulación como embalses, balsas, depósitos y sistemas para su gestión; Constituyendo estos elementos en un valioso patrimonio histórico para la humanidad (Hermosilla, 2009 y 2011).

No de menos trascendencia, son los elementos creados por el hombre para el aprovechamiento de la energía del agua, como los molinos harineros, molinos para uso textil (batán) y de ruedas hidráulicas para generación de energía para otros usos.

En el presente trabajo se pretende identificar estos elementos en un área del río Mijares, tomando como base primaria de información la cartografía antigua.

La cartografía Antigua, son planimetrías elaboradas por el Instituto Geográfico y Estadístico de España (hoy el Instituto de Geografía Nacional de España - IGN) entre finales del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX a escala 1:25000, las cuales incluyen detalles topográficos como caminos, ríos, barrancos, arroyos, cultivos, acequias, norias, molinos, fábricas de luz, puentes, lavaderos, fuentes, balsas presas, pantanos, casas, manantiales, etc.

Los planos en general tienen algunas limitaciones como ausencia de una simbología unificada o falta de la misma, letra ilegible, manchas que dificultan la interpretación e imprecisión dados los instrumentos de la época utilizados para los levantamientos topográficos. Las actualizaciones generalmente se identifican con colores rojos, los elementos de agua en color azul o verde (Blanco, 2016). Otro factor que afecta la lectura es el hecho de que cada plano es realizado bajo el criterio personal de los responsables. A pesar de lo anterior, son una fuente original de gran importancia para este tipo de trabajos ya que muchos de los problemas de interpretación pueden ser solucionados con las visitas de campo o el uso de herramientas modernas de imágenes satelitales como el Google Earth.

## **1.2. Puesta en valor**

Gracias a la superación del concepto de Patrimonio Histórico como solo objeto monumental, tesoro histórico o belleza estética, hoy día se han impuesto conceptos

como la puesta en valor, gestión del Patrimonio o gestión cultural, difusión del Patrimonio que tienen como objetivo el reconocimiento de ese Patrimonio por parte de la sociedad; logrando de esta forma crear conciencia sobre la importancia de su estudio, restauración y conservación (Guglielmino, 2007)

La gestión del Patrimonio se fundamenta sobre tres pilares (Figura 1): La Difusión, La investigación y documentación, la Conservación y Restauración Según Guglielmino (2007) “Es una gestión mediadora entre dicho Patrimonio y la sociedad. Gestión porque implica un proceso complejo que abarca documentar, valorar, interpretar, manipular, producir y divulgar no ya el objeto en sí, sino un modelo comprensible y asimilable de dicho objeto en su relación con su pasado histórico y su medio presente”.

La puesta en valor tiene dos componentes básicos. El primer componente tiene relación con la Cultura del lugar y el mensaje del bien, lo cual obliga a una Investigación histórica relacionada con la cultura del lugar. El segundo componente, es la formalización del mensaje directamente sobre el bien: Cultura proyectual (diseño, organización, jerarquización de espacios y funciones, conservación. (Guglielmino, 2007).

Un bien Patrimonial tiene diversos valores: valor de uso, valor material, valor simbólico,



**Figura 1.** Pilares de la gestión del patrimonio.

En nuestro tema de estudio de Patrimonio Rural, es evidente la gran importancia de determinar el papel que el objeto de estudio ha desempeñado en la historia social de la región; de esta forma podemos lograr a través de su difusión, el sentido de pertenencia social que se requiere para su conservación. Consecuentemente, lograr “frenar” de esta forma el acelerado deterioro a que es sometido el Patrimonio, como consecuencia de la urbanización y el uso de tecnologías agrícolas modernas.

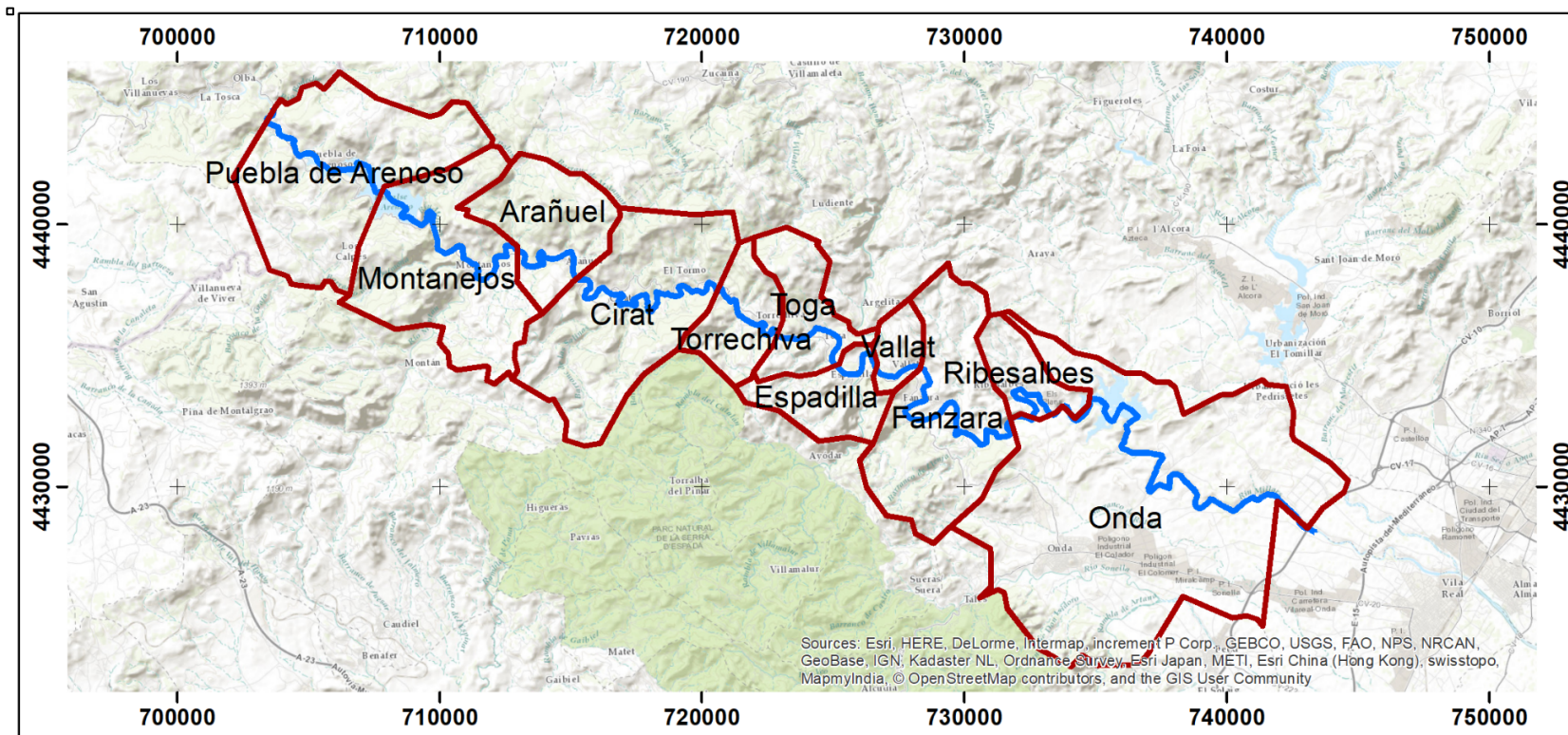
Como antecedente de puesta en valor en la zona de estudio, se dispone de las publicaciones, trabajos y metodología propuesta desarrollados por el grupo Estepa, con el apoyo de la Universidad de Valencia y la Confederación Hidrográfica del Júcar (Hermosilla, 2016).

### 1.3. Área de estudio

El área de estudio está ubicada en la cuenca del río Mijares – Provincia de Castellón,

abarca 11 municipios con un área total de 33,484 hectáreas (**Tabla 1**).

Castellón es una Provincia al este de España, montañosa en su interior, limita por el Norte con la comarca del Maestrazgo y la Sierra de Espadán por el Sur, por el Oeste limita con el área Turolense del Alto Mijares y por el este con el mar Mediterráneo. La Provincia de Castellón cuenta con dos ríos principales el Mijares y el Palencia. El clima mediterráneo se caracteriza por inviernos suaves y veranos cálidos. Tiene una temperatura media de 17 ° C y las precipitaciones medias anuales varían entre 400 a 600 mm; en zonas montañosas pueden superar los 600 mm, las lluvias se caracterizan por su gran irregularidad anual (un año húmedo puede quintuplicar la precipitación de un año seco) y mensual (Ginés, 2013).



## Mapa de localización del área de estudio

Sistema de referencia  
ETRS 1989 UTM 30 N



Figura 2. Mapa de localización área de estudio

**Tabla 1.** Superficie municipal del área de estudio en la Provincia de Castellón.

<b>Municipio</b>	<b>Superficie (has)</b>
Arañuel	1926.02
Cirat	4124.57
Espadilla	1204.11
Fanzara	3489.75
Montanejos	3764.86
Onda	10835.03
Puebla de Arenoso	4261.72
Ribesalbes	848.5
Toga	1358.07
Torrechiva	1173.74
Vallat	497.43
Total	33483.8

El Área de estudio aparece delimitada en la (Figura 2), comprende los municipios de Puebla de Arenoso iniciando en los límites de Olba, continuando hacia el este con los municipios de Montanejos, Arañuel, Cirat, Torrechiva, Toga, Espadilla, Vallat, Fanzara, Ribesalbes, finalizando en el municipio de Onda. Este trayecto corresponde a 77 km., de recorrido de oeste a este del río Mijares.

#### **1.4. Objetivos y justificación**

El objetivo de este trabajo es destacar la importancia de la difusión en la concienciación de la gestión del patrimonio hidráulico Rural en serio peligro de extinción. Este tipo de patrimonio por sus características de dispersión espacial, está siendo afectado en forma negativa por el desarrollo urbano y la utilización de tecnologías modernas en la agricultura.

El objetivo específico, luego de realizar un inventario de elementos en la zona de estudio, es suministrar herramientas para establecer itinerarios de patrimonio histórico virtual, utilizando tecnologías interactivas modernas, que permitan poner a prueba una metodología basada en el uso de planos antiguos, la integración de elementos, su relación con el entorno paisajístico y su puesta en valor.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Revisión bibliográfica**

Para el desarrollo del presente trabajo, se revisaron documentos básicos que establecen procedimientos metodológicos sobre patrimonio histórico en general, patrimonio histórico hidráulico, y metodologías basadas en el uso de mapas antiguos.

Se leyeron varios trabajos realizados sobre patrimonio histórico de la zona con el fin de familiarizarse con el lenguaje, historia de la región, metodología utilizada y resultados obtenidos.

Se consultaron artículos publicados en revistas sobre puesta en valor y gestión de patrimonio histórico.

### **2.2. Fuentes**

#### **2.2.1. Planos antiguos**

En la (Tabla 2), se relacionan los planos antiguos indicando Municipio, escala y fechas de elaboración y de actualización,



incluyéndose el mapa de un sector del municipio de Onda elaborado en 1938 (Figura 3), así como un detalle del mismo en

el que se pueden apreciar las características de su elaboración (Figura 4).

**Tabla 2.** Atributos de planos antiguos por municipio

<b>No.</b>	<b>Identificador</b>	<b>Termino municipal</b>	<b>Escala</b>	<b>Fecha de elaboración</b>	<b>Fecha última actualización</b>
1	120041	Arañuel	1:25000	1910	1948
2	120090	Campos de arenoso	1:25000	1911	1948
3	120115	Cirat	1:25000	1910	1948
4	120116	Cirat	1:25000	1951	
5	120135	Espadilla	1:25000	1908	1937 -1948
6	120136	Fanzara Zona S.O.	1:25000	1908	1937
7	120137	Fanzara Zona S.E.	1:25000	1908	
8	120138	Fanzara Zona Norte	1:25000	1907	
9	120139	Fanzara hoja 640	1:25000	1949	1953
10	120172	Montanejo	1:25000	1910	
11	120190	Onda Zona 1ª.	1:25000	1938	
12	120191	Onda Zona 1ª. Hoja 1a	1:25000	1909	1937
13	120192	Onda Hoja 2ª. Zona 2	1:25000	1909	
14	120194	Onda Zona 1 Hoja 2ª.	1:25000	1909	1937
15	120207	Puebla de Arenoso	1:25000	1910	
16	120212	Ribesalbes	1:25000	1938	
17	120249	Toga	1:25000	1909	1937-1948
18	120258	Torrechiva	1:25000	1909	1949
19	120271	Vallat	1:25000	1908	1948

Los planos en general, presentan condiciones aceptables para su interpretación; indican fundamentalmente elementos relacionados con el agua y fueron elaborados

fundamentalmente en la primera mitad del siglo pasado. Representando así, elementos valiosos en la interpretación, reconocimiento y valoración del Patrimonio.

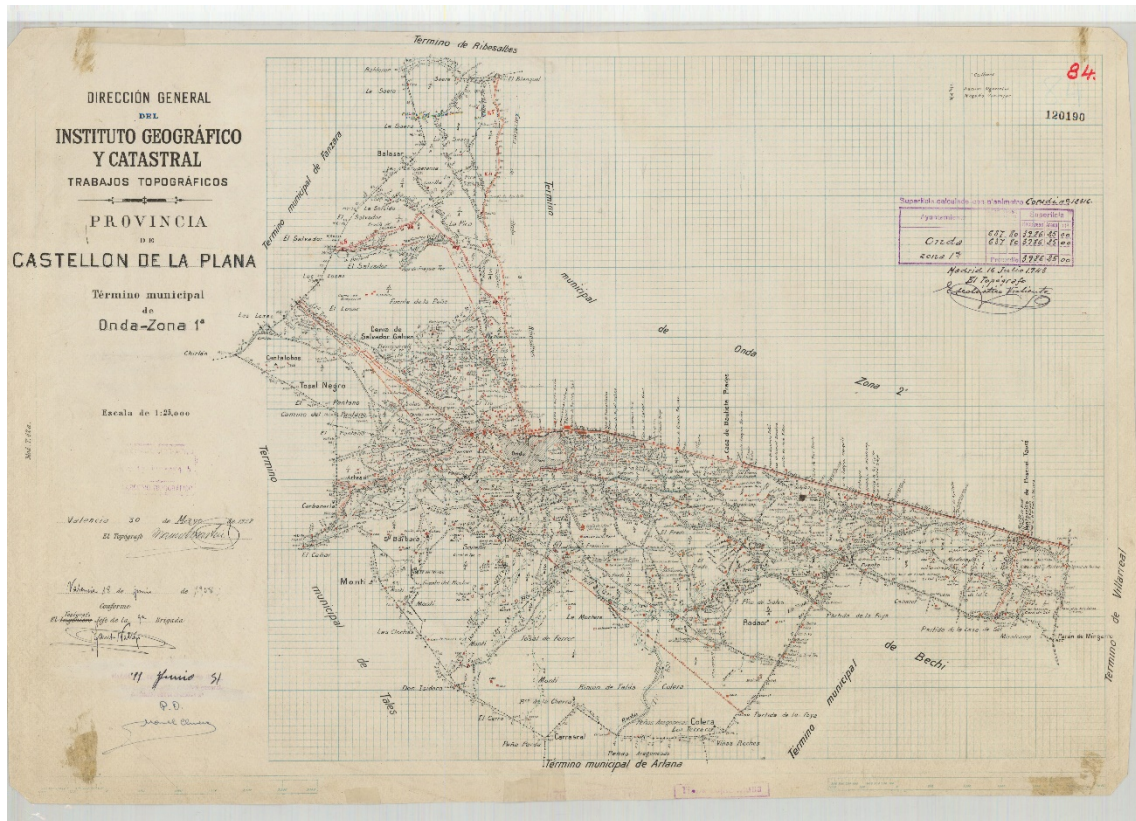


Figura 3. Representación del Mapa Onda Zona 1ª (CNIG, 1938)



Figura 4. Detalle plano Onda zona 1ª. Balsa y Noria (CNIG, 1938)

### 2.2.2. Imágenes de Google Earth

Para el presente trabajo se utilizaron también, sistemas de información con imágenes del globo virtual de Google Earth. Como ejemplo, se incluye la (Figura 5) que nos muestra una panorámica del distrito de riego

por superficie de la comunidad de regantes de Miralcamp en el Municipio de Onda. En el centro, se pueden apreciar las balsas de regulación del riego, al fondo a la derecha se ve el avance de la zona industrial sobre la zona agraria.



Figura 5. Distrito de riego Miralcamp (Google Earth, Google inc.)

### 2.2.3. Imágenes PNOA

Las imágenes utilizadas del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea), fueron obtenidas de la página oficial del IGN (Instituto Nacional de Geografía de España), son fotografías aéreas digitales con resolución espacial de 50 centímetros, con sistema de referencia ETRS89, Huso horario HU30, escala 1:15000 (PNOA 25). Los planos utilizados tienen una exactitud planimétrica  $RMSE_{xy} \leq 0.50$  m y exactitud altimétrica del modelo digital del terreno de  $RSME_{xy} \leq 1.0$  m.

Las imágenes del PNOA utilizadas son:

PNOA\_MA\_OF\_ETRS89\_HU30\_h50\_0614

PNOA\_MA\_OF\_ETRS89\_HU30\_h50\_0615  
PNOA\_MA\_OF\_ETRS89\_HU30\_h50\_0616  
PNOA\_MA\_OF\_ETRS89\_HU30\_h50\_0639  
PNOA\_MA\_OF\_ETRS89\_HU30\_h50\_0640  
PNOA\_MA\_OF\_ETRS89\_HU30\_h50\_0641.

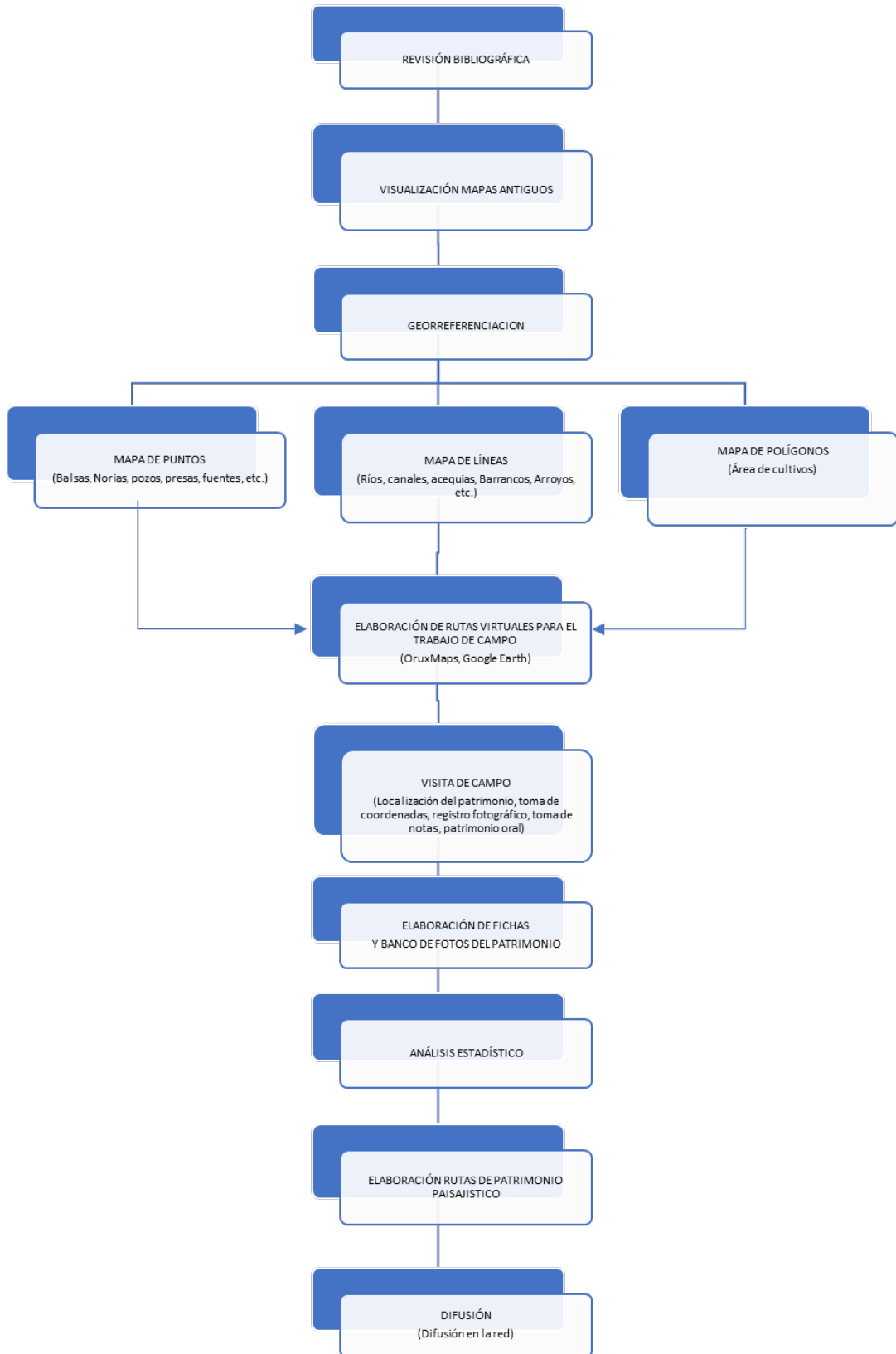
### 2.3. Proceso Metodológico

Inicialmente se parte de una revisión bibliográfica exhaustiva, que permite establecer la línea base de trabajo. Posteriormente, se realiza un análisis general de la cartografía antigua, con el fin de unificar criterios de selección de elementos. Dadas las condiciones en que se elaboraban los planos antiguos, es de esperar que haya dificultades con la precisión, por tanto, todo el esfuerzo que se haga para mejorar el ajuste

y corrección de los planos facilitará el trabajo de campo. Para lo anterior, es fundamental el uso de sistemas de información con imágenes satelitales y ortofotos de alta resolución espacial, reduciendo el error en planta y el tiempo empleado en la localización en campo.

Elementos como: la experticia, la lectura de trabajos similares previos (revisión bibliográfica), el conocimiento de la zona de trabajo, así como la información local, facilitan la labor y permiten ser más eficientes en las tareas de campo. Para una comprensión simplificada del proceso, se

anexa un diagrama general de la metodología utilizada (Figura 6). Dentro de este diagrama, cabe destacar la importancia en el proceso de la superposición de los planos de puntos y líneas en los mapas antiguos generando un mapa de superficies que nos muestra interesantes asociaciones entre estos elementos como (noria, balsa, acequia de riego) o (azud, acequias, cultivos bajo riego) o (azud, acequia, molinos), las cuales nos permiten establecer las denominadas rutas de interés patrimonial. Estas rutas están asociadas al desarrollo cultural, social y de paisaje en la región.



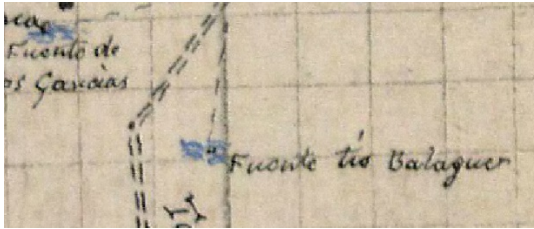

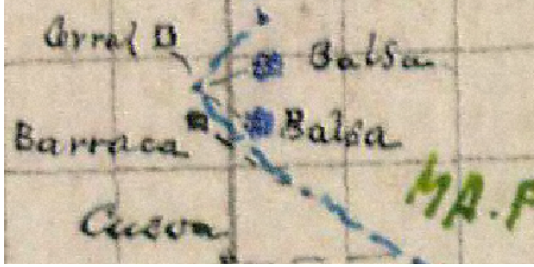
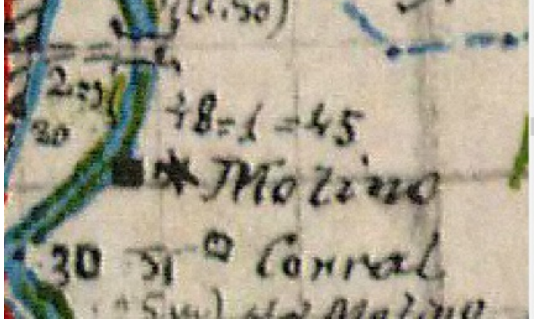
**Figura 6.** Diagrama Metodológico para el reconocimiento del Patrimonio hidráulico

### 2.3.1. Lectura de planos antiguos

Inicialmente, se realizó una lectura visual para familiarizarse con la simbología que

aparece en los mapas antiguos. En la Tabla 3, se pueden apreciar las convenciones, trazos, colores y texto utilizado.

**Tabla 3.** Simbología utilizada en planos antiguos

Elemento	Elemento identificado en mapa
○ Fuente	
○ Azud o presa, Fuente, molino, canal, balsa	
○ balsa	
○ Molino	

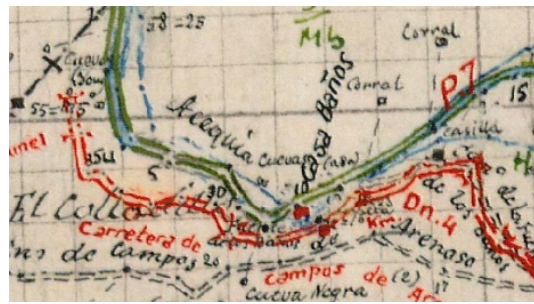
---

Elemento

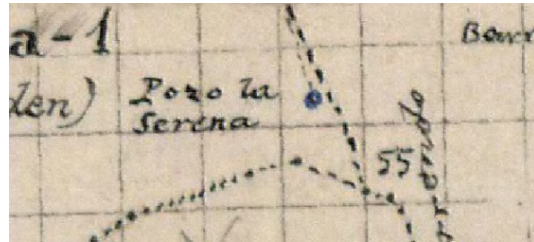
Elemento identificado en mapa

---

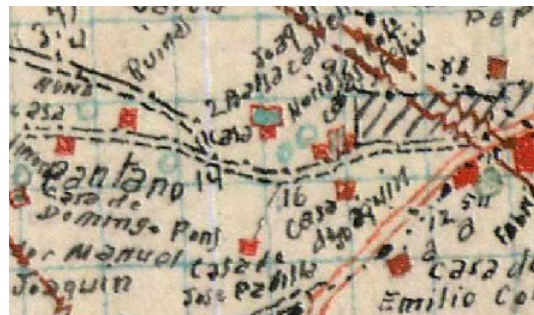
○ Acequia



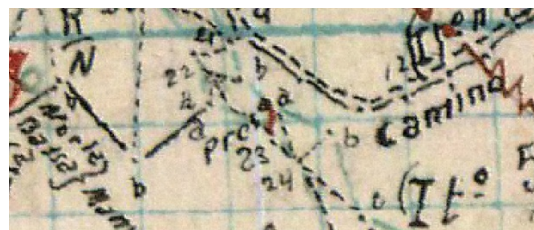
○ Pozo



○ Noria



○ Presa



○ Fábrica de Luz



---

Elemento

Elemento identificado en mapa

---

- Motor Noria y Balsa



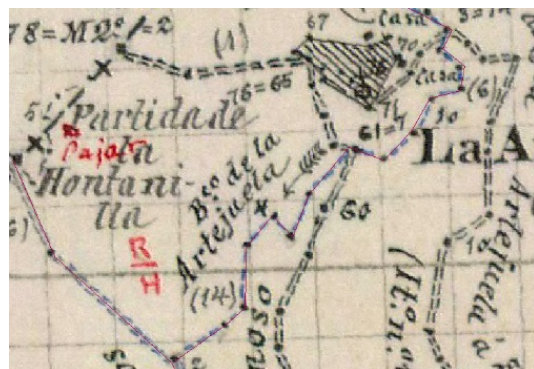
- Lavaderos



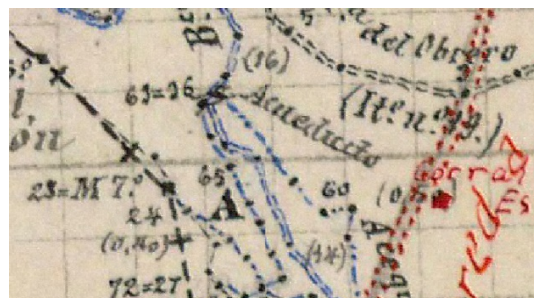
- Sifón



- Barranco



- Acueducto





### 2.3.2. Georreferenciación

En el diagrama de flujo (Figura 7), se indica el proceso de georreferenciación de los planos antiguos. Para empezar, primero introducimos el PNOA, de esta forma su sistema de referencia (ETRS89) será tomado como base. Posteriormente, se entra al plano antiguo en “proyección de vuelo” para visualización y procedemos a la selección de puntos de control con base en el PNOA. El proceso a continuación es la verificación del error, si este es menor o igual a 40 metros, continuamos el proceso para ajuste del plano antiguo y su georreferenciación con base en ETRS89. En caso de que el error sea mayor a 40 metros procedemos a nueva selección de puntos de control y nueva verificación del error.

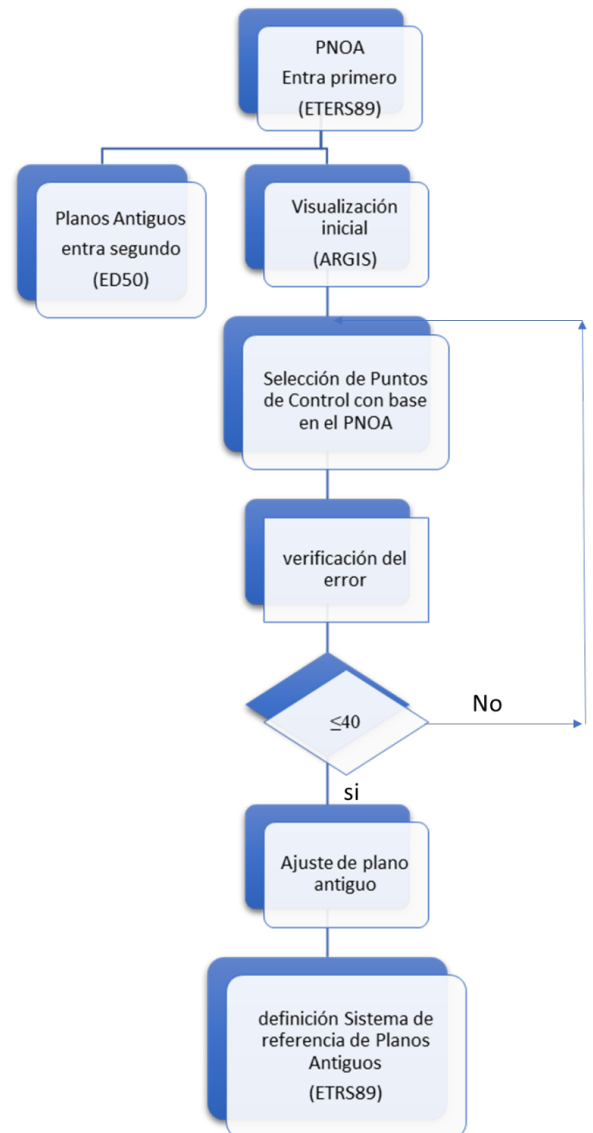
### 2.3.3. Identificación de puntos, líneas y polígonos en planos individuales y digitalización de sus elementos.

Este es un proceso visual, que se va mejorando a medida que se avanza en la interpretación de los planos. En esta fase, tiene gran importancia el uso de sistemas de información geográfica con imágenes de satélite para su verificación.

### 2.3.4. Descripción de elementos (tabla de atributos)

En la (Figura 8), se pueden ver los datos de los atributos del mapa de puntos el cual incluye: Identificación, número del plano

utilizado, coordenadas, tipología, toponimia y localización. En la práctica, la mayor dificultad encontrada es la lectura de la información escrita por su ilegibilidad; sin embargo, al momento de la visita de campo se pueden precisar los nombres que conservan los elementos patrimoniales.



**Figura 7.** Proceso de Georreferenciación en el reconocimiento del Patrimonio Hidráulico.

Shape	Id	FID	tipo	PlanoNo	X1	Y1	Elemento	Municipio	id_1	munic
Point	271	270	Aljibe	120191	74072	443234	Aljibe	ONDA	1	ONDA
Point	34	33	Balsa	120138	73063	443753	Balsa	FANZARA	1	FANZARA
Point	35	34	Balsa	120138	72905	443670	Balsa	FANZARA	1	FANZARA
Point	36	35	Balsa	120138	73099	443673	Balsa	FANZARA	1	FANZARA
Point	37	36	Balsa	120138	73029	443724	Balsa	FANZARA	1	FANZARA
Point	47	46	Balsa	120190	73342	442896	Balsa	ONDA	1	ONDA
Point	50	49	Balsa	120190	73280	442895	Balsa	ONDA	1	ONDA
Point	51	50	Balsa	120190	73238	442893	Balsa	ONDA	1	ONDA
Point	52	51	Balsa	120190	73193	442836	Balsa	ONDA	1	ONDA
Point	53	52	Balsa	120190	73231	442845	Balsa	ONDA	1	ONDA

**Figura 8.** Tabla de atributos línea de puntos

### 2.3.5. Elaboración de rutas para validación de la metodología (criterios)

Los criterios que se siguieron para la elaboración de las rutas de trabajo de campo luego de efectuadas las superposiciones de planos fueron:

- Tipos de asociación de elementos:
  - Pozo-Noria- Balsa – Acequias de riego. Unidades autónomas de producción independientes con regulación de aguas.
  - Pozo – Noria- acequias de riego. Unidades autónomas de producción
  - Pozo – Motor- Balsa- Acequia de riego
  - Pozo – Motor- Acequia de riego
  - Pantano- canal de conducción- balsa- Acequia de riego. Sistemas comunitarios.
  - Azud- canal- Molino – canal – acequia de riego.
  - Río – Molino Harinero
  - Azud – acequias de riego.
- Paisaje Asociado. Entorno
- Facilidad de acceso
  - Inventario por municipio
  - Importancia relativa del elemento

- Tiempo del recorrido (limitaciones)

- Costos

### 2.3.6. Validación en campo

El proceso de validación en campo básicamente consiste en lograr ubicar el patrimonio previamente identificado o indicios de su desaparición. Una vez localizado se toman las coordenadas del sitio. Es muy importante registrar los elementos encontrados en el recorrido realizado para posteriormente, ver si estos aparecen registrados en los mapas antiguos y fueron omitidos en el proceso de identificación, o por el contrario pudieron ser omitidos en la elaboración del mapa o construidos con posterioridad.

### 2.3.7. Identificación de elementos

El elemento patrimonial básico que identifica en ocasiones a otros elementos asociados (caso de la Noria cuyos elementos en sí mismos son los mecanismos de elevación del agua y que aún sin estar presentes, que es la generalidad de los casos, da el nombre al conjunto) debe identificarse con cada una de sus partes. (Martínez, 2011)

### **2.3.8. Toma de coordenadas**

Las coordenadas se deben tomar en el sitio para posteriormente verificar con mayor precisión, de ser posible, si el elemento realmente corresponde al buscado. Igualmente, esta información es indispensable para establecer las rutas de patrimonio.

### **2.3.9. Descripción de elementos**

La descripción del elemento o conjunto de elementos debe ser tan exhaustiva como lo exija el estudio a realizar, dependiendo del alcance y conocimiento de la persona que realiza el inventario. Es muy importante determinar a qué otro elemento o elementos está asociado, definir su estado actual, que características constructivas tiene, que materiales fueron utilizados en su construcción, si ha sufrido modificaciones a su construcción original, su función y grado de funcionalidad actual, su originalidad etc. De ser posible tomar algunas medidas como área, profundidad (por ejemplo, en el caso de las balsas nos daría una idea del volumen regulador y su importancia en las prácticas de riego), información del pozo si tenemos la posibilidad de hablar con los agricultores etc.

### **2.3.10. Toma de registros fotográficos**

El registro fotográfico es fundamental, es este tipo de trabajos, es la memoria del recorrido efectuado y capta detalles que solo se analizan posteriormente. Todas las percepciones (son subjetivas) no son las mismas, entre otras razones por el tipo de formación profesional y conocimientos que

se tengan del patrimonio específico a evaluar e inventariar. Esta información tiene un valor muy especial en el caso de las rutas virtuales pues el interesado puede formarse su propia opinión sobre el patrimonio histórico y el entorno del mismo.

### **2.3.11. Patrimonio oral**

Este es uno de los aspectos de mayor importancia; existe la tendencia a registrarlo con normas rígidas que hacen difícil que la información fluya en forma natural. El portador de este patrimonio oral debe ser consciente del valor que tienen sus recuerdos para la permanencia histórica de este patrimonio.

### **2.3.12. Equipos y software**

Para el desarrollo de los trabajos se utilizaron equipos como tableta electrónica, cámaras fotográficas y teléfonos celulares inteligentes. La tableta electrónica se utilizó para registrar la ruta y verificar las coordenadas de los sitios visitados en campo, la cámara fotográfica y los teléfonos celulares inteligentes se usaron para obtener los registros fotográficos y como soporte en la localización.

Fundamentalmente se utilizó el programa ArcGis 10.3 para todo el proceso de visualización de mapas antiguos, para el ajuste de planos mediante puntos de control, localización de puntos, líneas y polígonos, y elaboración de mapas del estudio. Para visualización, localización se utilizó la aplicación web Google Earth, destacándose

el uso de imágenes tridimensionales en Google Earth Pro las cuales fueron de gran utilidad particularmente en Onda. El uso de estas imágenes, en caso de disponer de ellas, hará más fácil y preciso el inventario de patrimonio en un futuro cercano.

Para el establecimiento de las rutas y para la georreferenciación se usó además OruxMaps en combinación con Google Earth.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Validación y ajuste de planos antiguos

En la (Figura 9), se puede apreciar el resultado de uno de los procesos de validación utilizando 6 elementos de control.

		Total RMS Error:				Forward:20.2964		
	Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
<input checked="" type="checkbox"/>	1	714490.413032	4439083.248824	714375.319051	4438957.571489	-20.2742	0.561695	20.282
<input checked="" type="checkbox"/>	2	715354.530697	4438060.194530	715282.563887	4437917.054660	19.4515	-17.9147	26.4442
<input checked="" type="checkbox"/>	3	716602.242047	4439687.491118	716475.241793	4439583.774244	-4.04404	23.4768	23.8225
<input checked="" type="checkbox"/>	4	714436.568011	4442095.788556	714302.423992	4441944.314295	-4.49117	-21.9119	22.3674
<input checked="" type="checkbox"/>	5	713358.878251	4442629.758478	713244.578022	4442502.758224	10.8838	3.00625	11.2913
<input checked="" type="checkbox"/>	6	711996.509926	4440869.799541	711904.037866	4440754.705561	-1.52591	12.7819	12.8726

**Figura 9.** Cuadro de validación de ajuste de planos

La (Tabla 4), muestra el resultado de las validaciones de todos los mapas antiguos utilizados las cuales presentan un valor mínimo de error de 10 metros y un máximo de 86 metros. Este último valor se repitió utilizando un mayor número de elementos logrando mejorar el ajuste hasta un valor de 17.8 metros, lo cual muestra la importancia del proceso reiterativo y de cómo aumenta la probabilidad de acertar a medida que se interpreta mejor la información del plano. En general estos valores muestran lo apropiado del proceso de ajuste.

Se determinó el error cuadrático medio (RMS), teniendo en cuenta que el resultado fuera inferior a 40 metros. Se utilizó ArcGIS, tomando el máximo número posible de puntos homólogos, repitiendo el proceso hasta lograr un resultado con un error aceptable o en su defecto descartar la posibilidad de realizar un ajuste razonable. En la (Tabla 4) se puede apreciar el error residual de ajuste de planos. En general, el ajuste fue bueno para las condiciones de los planos utilizados.

**Tabla 4.** Error Residual en el ajuste de planos

<b>Plano No.</b>	<b>No. De elementos de control</b>	<b>RMS (Residual)</b>
120041	6	20.3
120090	10	36.0
120115	8	26.4
120116	8	24.7
120135	5	18.0
120136	37	37.2
120137	4	14.4
120139	7	30.5
120172	9	17.8
120190	13	35.9
120191	5	40.7
120192	11	20.8
120194	4	10.0
120207	10	20.7
120212	6	24.7
120249	7	18.3
120258	5	21.0

### **3.2. Representación espacial de elementos hidráulicos identificados**

Los elementos hidráulicos se representan y distribuyen espacialmente mediante:

- Puntos (noría, pozo, balsa, fuente, molino, manantial, presa, fábrica de

luz, lavadero, sifón, azud, aljibe, túnel, puente, estanque, depósito);

- Líneas (ríos, arroyos, barrancos, acequias, canales
- Polígonos (áreas de cultivo).

### **3.2.1. Mapa de elementos de patrimonio hidráulico puntuales**

En las (Figura 10) y (Figura 11) (Mapa de puntos y mapa comparativo de Norias y Fuentes) se puede visualizar la concentración de Norias en el Municipio de Onda; prácticamente la totalidad de las Norias se encuentra en dicho municipio, lo cual unido a su distribución espacial, (están localizadas hacia la parte sur del municipio en un poco más del 60% del territorio) nos indica condiciones privilegiadas para la explotación de aguas subterráneas a poca profundidad del nivel del suelo ya que las norias tienen un limitante mecánico para extraer agua desde grandes profundidades.

Este recurso de agua subterránea, permitió el desarrollo de una agricultura de regadío en una zona con serias deficiencias hídricas. Socialmente, debió ser muy importante en su momento ya que la distribución de tierras, que todavía hoy día se puede apreciar, se caracteriza por pequeñas parcelas (minifundio). También se puede observar como el 88% de las balsas están en Onda, las cuales en su gran mayoría se encuentran asociadas a las norias, siendo un elemento importante para la regulación de las aguas de riego.

Contrario a lo anterior, al salir de la zona topográficamente plana en dirección al oeste es apreciable como las fuentes principales de

agua la constituyen “nacederos”, manantiales o fuentes de agua (su especial concentración se presenta en los municipios de Cirat, Arañuel y Montanejos) y aguas superficiales provenientes de ríos, arroyos y barrancos.

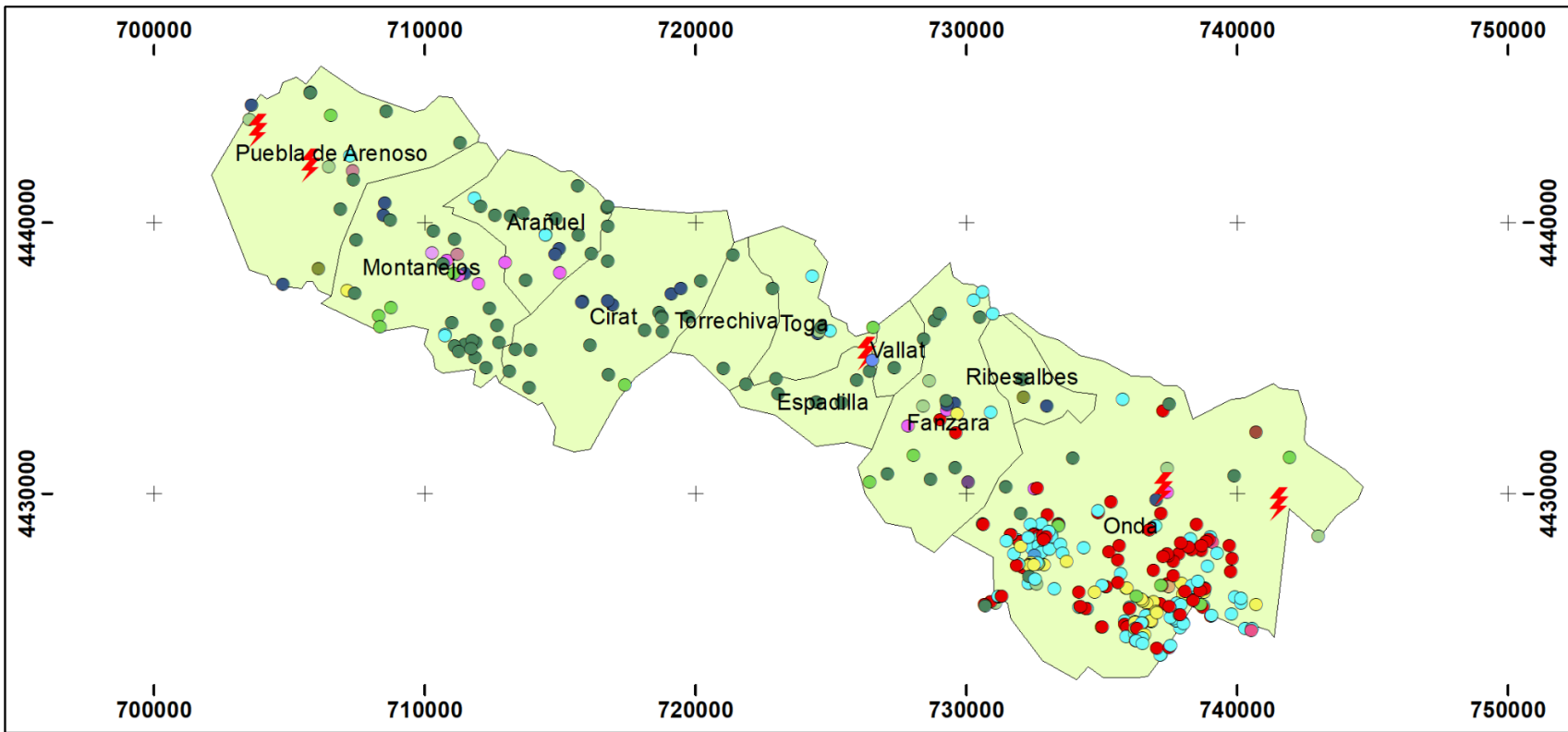
También es posible apreciar como las fábricas de luz, los molinos harineros y textiles (batán) fueron de gran importancia para el desarrollo económico y social de la región (Cirat, Arañuel y Montanejos).

### **3.2.2. Mapas de elementos de patrimonio lineal**

En el mapa de líneas de la (Figura 12), se puede apreciar lo importante de la red hidrográfica de la región la cual es aprovechada con la construcción de importantes represas para la generación de energía como la hidroeléctrica de CIRAT y para el regadío como Campos de Arenoso.

### **3.2.3. Mapas de elementos de patrimonio poligonal**

Con el mapa de puntos y de líneas superpuestos sobre los mapas antiguos se obtuvo el mapa de superficies y cultivos (Figura 13). Su análisis integrado permitió obtener importantes conclusiones, sobre como los antiguos pobladores aprovechaban los recursos hídricos para la irrigación, generación de energía y el uso de la fuerza del agua para mover las ruedas hidráulicas de los molinos industriales.



Tipología	
<span style="background-color: #d9ead3; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Municipios	<span style="color: #556b2f;">●</span> Lavadero
<b>Elementos Hidráulicos Puntuales</b>	
<span style="color: #800000;">●</span> Aljibe	<span style="color: #000080;">●</span> Molino
<span style="color: #00b0f0;">●</span> Balsa	<span style="color: #800080;">●</span> Motor
<span style="color: #808000;">●</span> Balsa y Noria	<span style="color: #ffff00;">●</span> NI
<span style="color: #800080;">●</span> Casa baños	<span style="color: #ff0000;">●</span> Noria
<span style="color: #0000ff;">●</span> Depósito	<span style="color: #008000;">●</span> Pozo
<span style="color: #4b0082;">●</span> Estanque	<span style="color: #90ee90;">●</span> Presa
<span style="color: #ff0000;">⚡</span> Fabrica de Luz	<span style="color: #800080;">●</span> Puente
<span style="color: #000000;">●</span> Fuente	<span style="color: #800080;">●</span> Sifón
	<span style="color: #0000ff;">●</span> Tunel

## Mapa de elementos hidráulicos puntuales



**Sistema de referencia  
ETRS 1989 UTM 30 N**

Figura 10. Mapa de puntos

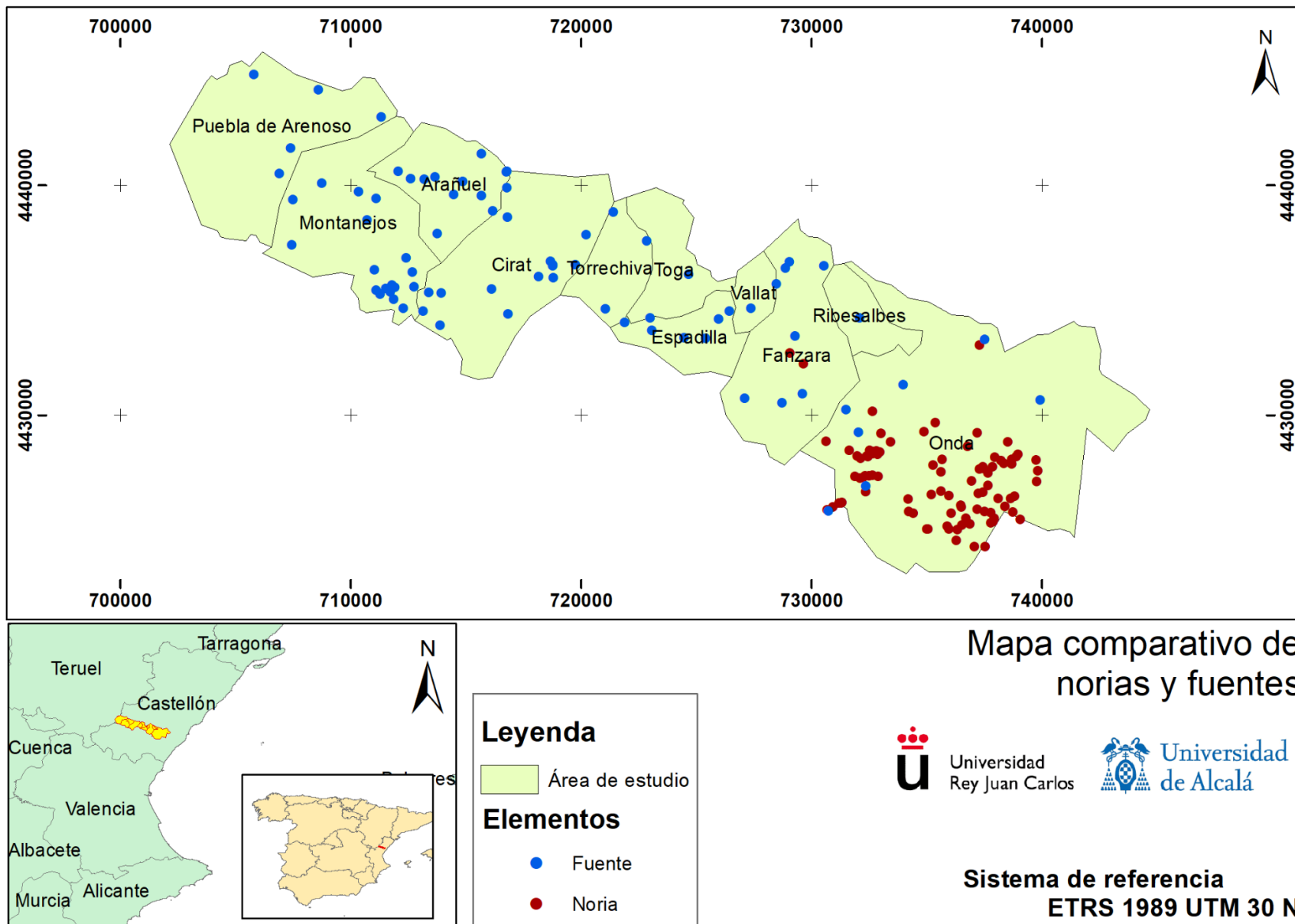


Figura 11. Mapa comparativo Norias y Fuentes



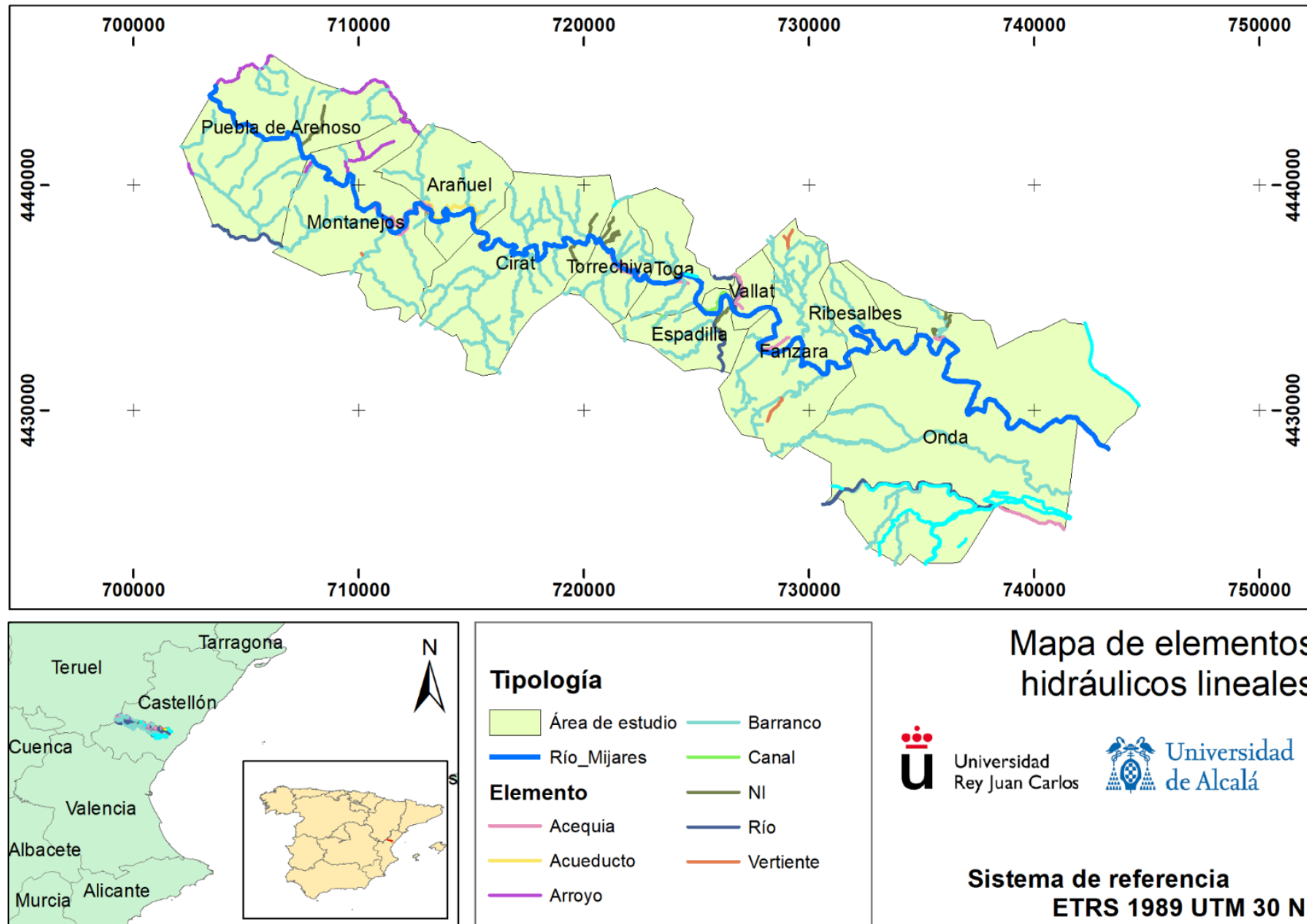


Figura 12. Mapa de elementos hidráulicos lineales

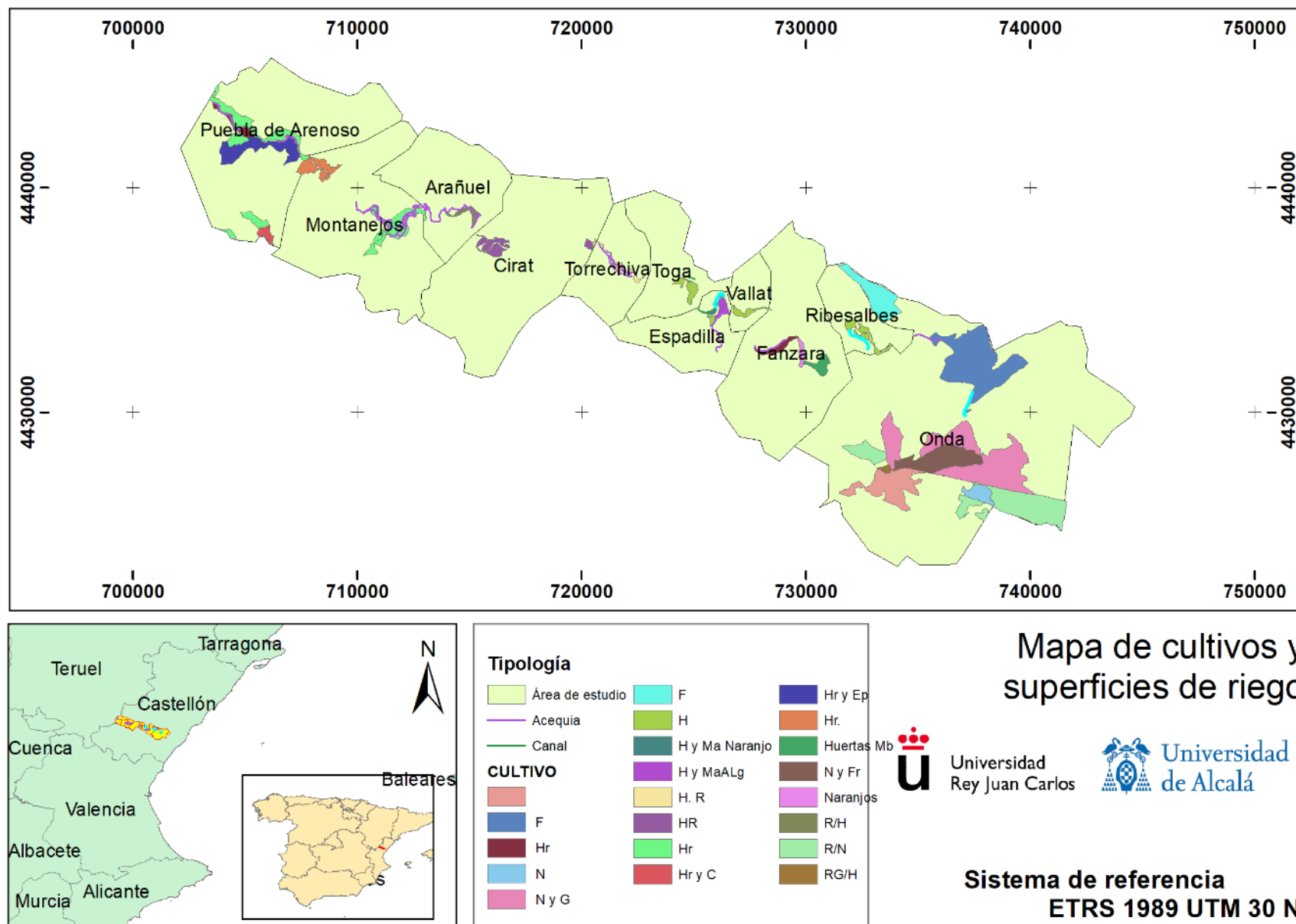


Figura 13. Mapa de cultivos y superficie de riego

### 3.3. Resumen de elementos de patrimonio por municipio

En la (Tabla 5), se puede observar la gran diversidad de patrimonio en un área relativamente pequeña; destacándose las norias y balsas asociadas concentradas prácticamente en su totalidad en el municipio de Onda. Las fuentes, como se dijo antes, se concentran más hacia las partes altas en los municipios de Montanejos, Arañuel y Cirat.

Esta información debe verificarse en su totalidad en campo para tenerla como herramienta en la recuperación y conservación de este importante patrimonio hidráulico. Los elementos que están en minoría como las plantas de luz, los molinos y otros elementos que por sus peculiaridades son de gran interés patrimonial se les debe dar prioridad a fin de proceder lo antes posible a su difusión, reconstrucción y mantenimiento.

**Tabla 5.** Inventario de puntos del Patrimonio Hidráulico en el área de estudio.

Municipio / Tipología	Onda	Ribesalbes	Fanzara	Vallat	Espadilla	Toga	Torrechiva	Cirat	Arañuel	Montanejos	Puebla de Arenoso	Total	Porcentaje (%)
Aljibe	1											1	0
Balsa	99		5			2			2	2	2	112	32
Balsa y Noria	1											1	0
Casa baños										1		1	0
Depósito	1											1	0
Estanque			1									1	0
Fábrica de Luz	2				1						2	5	1
Fuente	7	1	8	1	6	1	3	16	10	18	5	76	22
Lavadero		1									1	2	1
Molino	1	1	2			1		6	2	3	2	18	5

Municipio Tipología	Onda	Ribesalbes	Fanzara	Vallat	Espadilla	Toga	Torrechiva	Cirat	Arañuel	Montanejos	Puebla de Arenoso	Total	Porcentaje (%)
Motor	2											2	1
No identifica do	3									1		4	1
Noria	91		2									93	26
Pozo	5		2	1				1		4	1	14	4
Presa	4		2			1					2	9	3
Puente	2		2						2	3		9	3
sifón										1	1	2	1
Túnel					1							1	0
Total	219	3	24	2	8	5	3	23	16	33	16	352	100
Porcentaj e (%)	62	1	7	1	2	1	1	7	5	9	5	100	

### 3.4. Análisis estadístico

Se hizo un análisis de los elementos inventariados por municipio encontrándose que el 62% de los elementos se encuentran en Onda (Figura 14), representados fundamentalmente por norias y balsas, siguiendo en orden el municipio de

Montanejos con un porcentaje más alto de fuentes, por lo que se sugiere darle prioridad a la recuperación en estos municipios. Elementos especiales como los molinos y fábricas de luz por su número limitado se le debe dar igualmente prioridad.

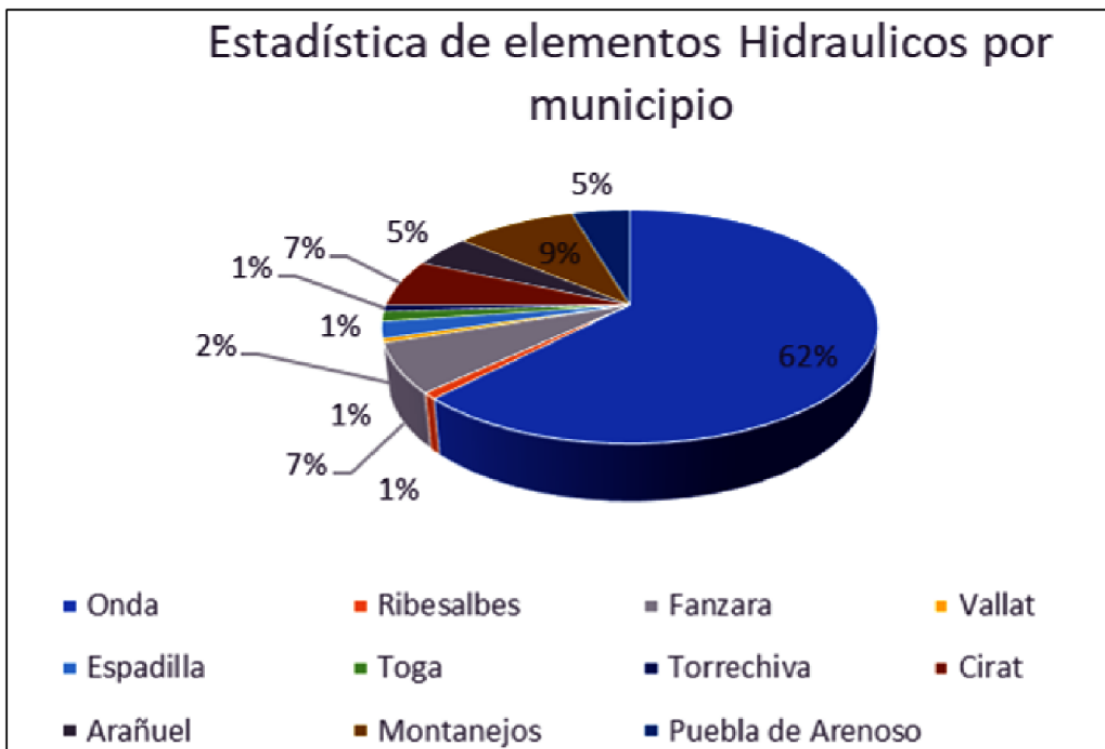
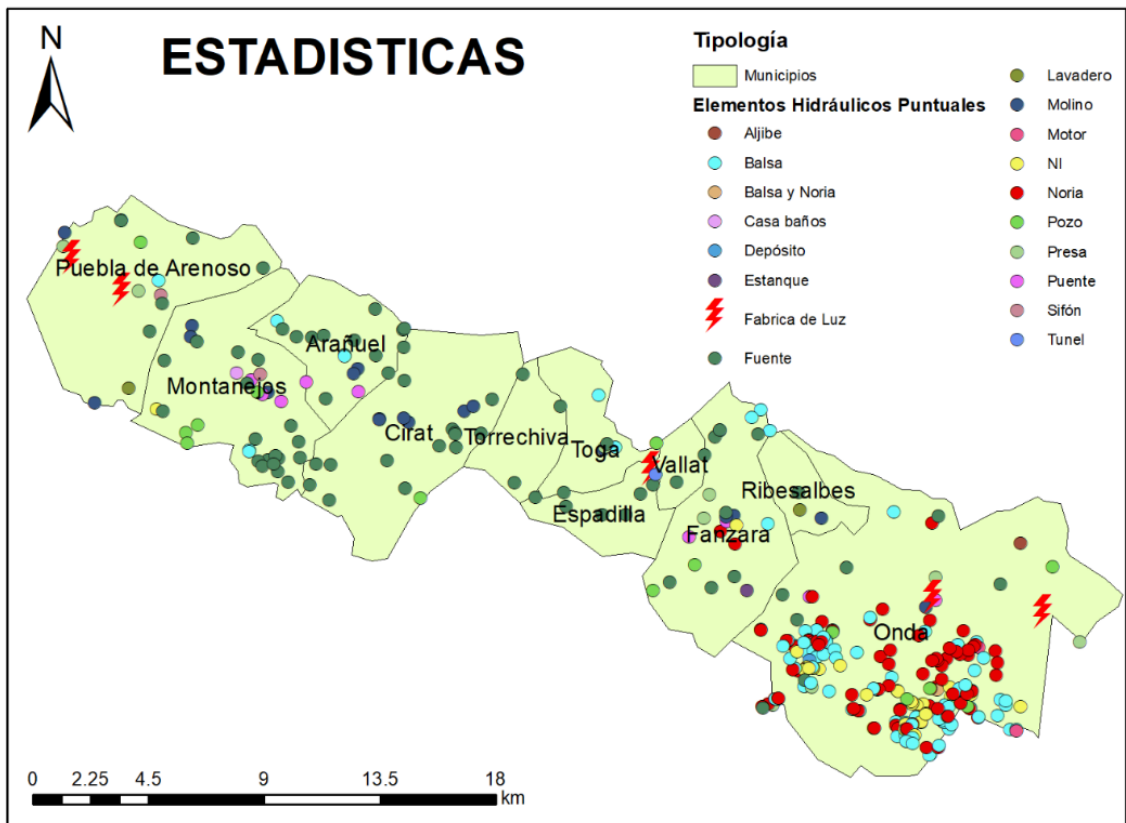


Figura 14. Estadísticas de elementos

### 3.5. Validación de coordenadas de campo vs. coordenadas planos antiguos

Tomando como base las coordenadas registradas durante el recorrido de campo y las coordenadas extraídas de Google Earth, se verificó el error real en distancia respecto a las coordenadas ajustadas de los planos antiguos. Dado que las coordenadas en Google Earth, son tomadas directamente sobre el punto, se consideraron estas más

representativas para el cálculo de la desviación real.

En la **Tabla 6**, se puede apreciar como las distancias entre coordenadas tomadas de los planos antiguos y las coordenadas reales variaron desde un mínimo de 119 metros a un máximo de 181 metros con un promedio de 152 metros.

**Tabla 6.** Validación de Coordenadas de campo Vs. Coordenadas planos antiguos

No.	Elemento	Coordenada antigua		Coordenada Google Earth		Distancia m
		X	Y	X	Y	
964	Motor	740324	4425102	740286	4424997	122
960	Noria	737929	4425615	737931	4425471	124
959	Noria	737047	4425725	736963	4425402	119
958	Noria	736877	4425360	736874	4425297	176
955	Noria	735889	4425265	785872	4425173	143
957	Noria	735961	4425146	735953	4425074	162
963	Balsa	737792	4426043	737709	4426028	180
956	Noria	736270	4425319	735991	4425114	178
657	Fábrica de luz	711438	4438121	703885	4443466	157
652	Molino de los Peiros	703680	4444301	703621	4444431	181
666	Molino de harina	711438	4438121	711493	4438205	131
	Promedio de error	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	152

### 3.6. Fichas técnicas temáticas

Para el presente trabajo, se desarrollaron 27 fichas técnicas las cuales alimentarán la base

de datos para el desarrollo de rutas patrimoniales paisajísticas. Estas fichas contienen fotografías, localización,

descripciones, estado y entorno paisajístico del patrimonio hidráulico de la región. En el anexo que forma parte de este documento se encontrarán los encabezados de dichas fichas.

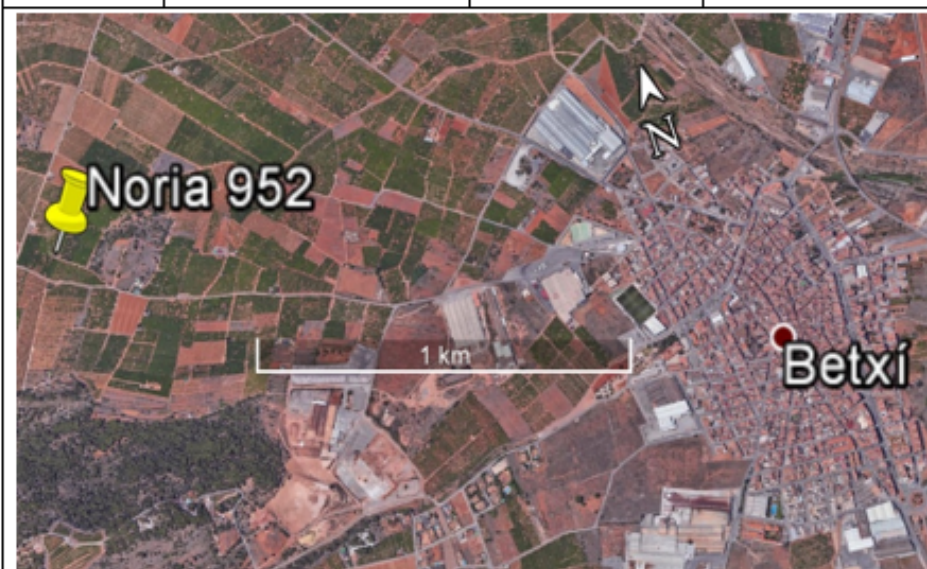
Para la elaboración de las fichas se tuvieron en cuenta varios modelos extrayendo de cada una lo que más se ajustaba a las necesidades la metodología utilizada.

### 1. Identificación

Código del elemento	No.952			
Fecha visita campo	13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N	X	737582.65	Y	4424262.07
Altitud	119 m.s.n.m			
Topónimo	Noria			
Tipo de elemento				
<input checked="" type="checkbox"/> Punto	<input type="checkbox"/> Línea	<input type="checkbox"/> Polígono		

### 3. Localización

Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada
-----------	------	---------------	---------------------



### 2. Elemento



Tipo de elemento	Noria
Asociación	Balsa, pozo
Descripción	Asociación Noria, balsa, acequias, riego. En la foto se puede apreciar la estructura de soporte de la noria en cuya parte central se encuentra el pozo de forma ovalada. El diámetro de la plataforma circular ovalada es de aproximadamente 11 metros, la balsa tiene un área de 117 m <sup>2</sup> . En la foto se pueden apreciar varios elementos de la asociación como: Cintell, balsa, rampa de acceso para los animales, red de acequias y entorno paisajístico (cultivo de cítricos)





**Estado actual de la plataforma de la Noria, se mantiene gran parte de la estructura original, mampostería doble de piedra**



**Descarga directa de la Noria a la acequia**



**Estructuras recientes que muestran el uso de tecnologías actuales (bomba sumergible), la tubería conduce el agua del nuevo pozo a la balsa.**



**Acá se puede apreciar como el sistema original descargaba directamente a la acequia.**



**Balsa construida posteriormente, lo cual se evidencia por la cota de descarga de la tubería.**



**Sistema actual de riego localizado**

#### **4. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES**

La metodología utilizada basada en el uso de planos antiguos dio resultados totalmente satisfactorios. La muestra desarrollada nos indica que el patrimonio se encuentra en franco deterioro, gran parte del mismo está en ruinas.

El sector agrícola, propietario de gran parte de este patrimonio, ha venido abandonándolo en razón al uso de nuevas tecnologías de irrigación. En parcelas donde se encuentran elementos en buen estado como balsas y pozos de antiguas norias, se debe a que continúan prestando su función original; normalmente continúan la explotación del pozo utilizando bombas sumergibles eléctricas y las balsas para regulación de aguas. En este caso, el agricultor invierte en su mantenimiento y conservación porque continúa logrando un beneficio económico.

El riego comunitario a presión (riego localizado por goteo), suministra el agua desde los pantanos directamente al cultivo haciendo innecesario el antiguo uso de los pozos y balsas de regulación. Esto, desafortunadamente contribuye al abandono de los antiguos sistemas de riego. Otro “enemigo” del patrimonio es el desarrollo urbano, en el municipio de Onda se puede apreciar como el avance de la industria de cerámica ha prácticamente “invadido” los terrenos agrícolas y con ello

la puesta en riesgo del patrimonio hidráulico. En el recorrido, se pudo constatar grandes longitudes de acequias de riego pertenecientes a la comunidad de regantes abandonadas en cercanías a la zona de desarrollo industrial.

A las presiones del urbanismo y del uso de tecnologías modernas de riego se le suma la falta de interés de las nuevas generaciones por el campo. Esta es una razón más para continuar con el esfuerzo de difusión de este patrimonio, en especial en las nuevas generaciones lo cual estimularía su vínculo a un pasado del cual todos debemos sentirnos orgullosos y contribuiría a generar un sentido de pertenencia de su patrimonio. Es importante investigar cómo viene evolucionando el tema de la tenencia de tierras ya que es posible que, con la modernización de la agricultura y el interés de las nuevas generaciones de buscar otros horizontes, se esté dando un fenómeno de concentración de tierras haciendo más compleja la recuperación de este patrimonio.

Las ruinas también son patrimonio. Uno de los inconvenientes para la recuperación del patrimonio es obviamente los costos, valdría la pena evaluar como alternativa si conservar las ruinas puede por lo menos frenar su proceso de desaparición y dilatar su reconstrucción total hasta que haya recursos; es el caso del molino de harina localizado en Montanejos, sería importante evaluar las inversiones necesarias para

conservar las ruinas y su entorno paisajístico a orillas del río Mijares, convirtiendo el lugar en un centro de difusión de patrimonio y recreacional turístico en lugar de hacer grandes inversiones en museos de norias como el que se puede apreciar en el área urbana del municipio.

El avance tecnológico en los sistemas de información de imágenes en especial las tridimensionales permiten especular que a corto plazo podremos contar con imágenes prácticamente reales las cuales facilitarán los inventarios y por ende la recuperación y difusión del patrimonio histórico. En nuestro caso se pudo aprovechar el avance de esta tecnología en la región de Onda donde se logró identificar no solo los elementos como balsas, Norias y pozos sino inclusive las acequias de riego, combinando las imágenes Lidar con las imágenes obtenidas por Google Earth mediante la aplicación Street View de imágenes de 360°. Esto permite igualmente visualizar a corto plazo el desarrollo de una metodología basada en estas imágenes para establecer “vuelos virtuales” de reconocimiento y difusión de Patrimonio histórico.

Los estudios de Patrimonio deben ser dinámicos, lo cual nos obliga a investigar a fondo cada uno de sus elementos. En los resultados, fue posible apreciar como la concentración de elementos está directamente relacionada con las

características hidrogeológicas de la región, esto nos obliga investigar cuáles son esas condiciones físicas que facilitaron el desarrollo de estos sistemas y su amplia difusión. Para la ampliación de conocimiento en el caso de las norias de Onda debemos evaluar las características del acuífero explotado, cuál era la capacidad de extracción de agua de las norias, si su volumen podía satisfacer toda la necesidad de agua del cultivo o por el contrario su papel fundamental era de un riego de germinación e implantación de cultivos de secano en la zona y de supervivencia del mismo en épocas de intensa sequía. Sería importante conocer las características hidrogeológicas del acuífero, la evaluación de los pozos y su estado de funcionamiento, profundidades de los mismos, caudales máximos de explotación, calidad de aguas etc., para así evaluar alternativas de puesta en valor como su explotación con energías no convencionales como la energía fotovoltaica generando necesidades de conservación del patrimonio hidráulico.

Durante el desarrollo del trabajo, se tuvo la oportunidad de conversar con personas de edad avanzada que aún conservan intactos su conocimientos y experiencias de este valioso patrimonio. Desafortunadamente el patrimonio oral, está igualmente en seguro riesgo de extinción, las ruinas todavía nos pueden “contar” muchas cosas, pero este patrimonio oral una vez extinguido se hace irrecuperable de allí la urgencia que

instituciones gubernamentales y académicas salgan a rescatar este

patrimonio antes de que sea demasiado tarde.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

Blanco G. A., (2016). Los mapas antiguos y su adecuación como base cartográfica para la valoración del patrimonio hidráulico de la comunidad de Madrid. Alcalá de Henares. Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente.

Guglielmino M. M., (2007). La difusión del patrimonio, actualización y debate. En Revista electrónica de patrimonio histórico difusión/estudios.

Hermosilla P. J., Mayordomo M. S., (2016). Sistema metodológico de evaluación del patrimonio hidráulico. Valencia: MAPAMA, Universidad de Valencia, ESTEPA.

Hermosilla P. J., (2009). Los regadíos históricos del Baix Millars-La Plana. Un patrimonio paisajístico en transformación. Colección Regadíos Históricos Valencianos. Recuperem Patrimoni No. 12. Confederación Hidrográfica del Júcar y Departament de Geografia, Universitat de València. 284 pp.

Hermosilla P. J., (2011). Los regadíos tradicionales del Alto Mijares. Colección Patrimonio Hidráulico, N°1. Confederación Hidrográfica del Júcar y Departament de Geografia, Universitat de València. 260 pp.

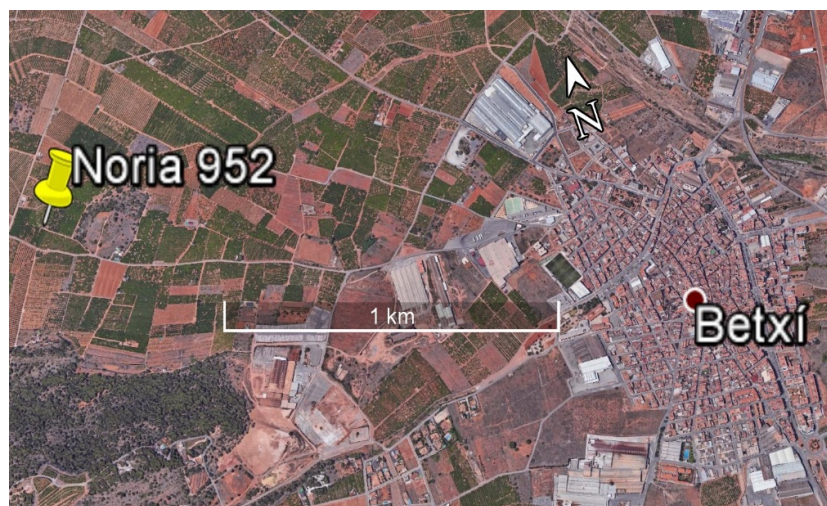
Martínez L. J., (2011). Captación de agua por elevación de sangre. En patrimonio cultural, vol. II. Islas Baleares: Fundación Calvià.

Ginés L. F. (2013). Pluviometrías anuales y mensuales en los municipios de Castellón, Almassora, y Benicassim, extremos y su evolución con el tiempo. 26 pp.

## 6. ANEXO: FICHAS DE CAMPO - FICHA TÉCNICA: FT01

### Identificación

Código del elemento	No.952			
Fecha visita campo	13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N	X	737582.65	Y	4424262.07
Altitud	119 m.s.n.m			
Geometría				
X	Punto		Línea	Polígono
<b>Localización</b>				
Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada	



### Elemento



Elemento	Noria
Asociación	Balsa, pozo

#### Descripción:

Asociación Noria, balsa, acequias, riego. En la foto se puede apreciar la estructura de soporte de la noria en cuya parte central se encuentra el pozo de forma ovalada. El diámetro de la plataforma circular ovalada es de aproximadamente 11 metros, la balsa tiene un área de  $117 \text{ m}^2$ . En la foto se pueden apreciar varios elementos de la asociación como: Cintell, balsa, rampa de acceso para los animales, red de acequias y entorno paisajístico (cultivo de cítricos)

Identificación

Código del elemento		No.			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	737523.68	Y	4424345.8
Altitud	121 m.s.n.m				
Geometría	Asociación Noria, pozo, balsa.				
X	Punto		Línea		Polígono

Localización

Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada
-----------	------	---------------	---------------------



Elemento



Elemento	Noria
Asociación	Balsa, pozo
Descripción	
<p>Asociación Noria, balsa, acequias, riego. El sistema ha ido cambiando con el tiempo adaptándose a los cambios tecnológicos pasando del uso del animal al motor de combustión interna (conserva la estructura de bóveda por dónde escapaban los gases del motor). Actualmente el sistema opera con una bomba sumergible utilizando energía eléctrica. La casa presenta una construcción elaborada para la época (elementos decorativos) y se encuentra en buen estado al igual que la balsa.</p>	

Identificación

Código del elemento		No.953			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	737551.20	Y	4424182.1
Altitud		120 m.s.n.m			
Geometría					
X	Punto		Línea		Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada		



Elemento



Elemento	Molino
Asociación	
<p>Descripción</p> <p>No se encontraron vestigios de su existencia; posiblemente la fuente de agua fue de carácter torrencial como se puede observar en las estructuras de canalización de aguas de drenaje superficial aledañas a la zona.</p>	

Identificación

Código del elemento		No.954			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	737057.59	Y	4424331.4
Altitud	120 m.s.n.m				
Geometría	Asociado				
X	Punto		Línea		Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada		



Elemento

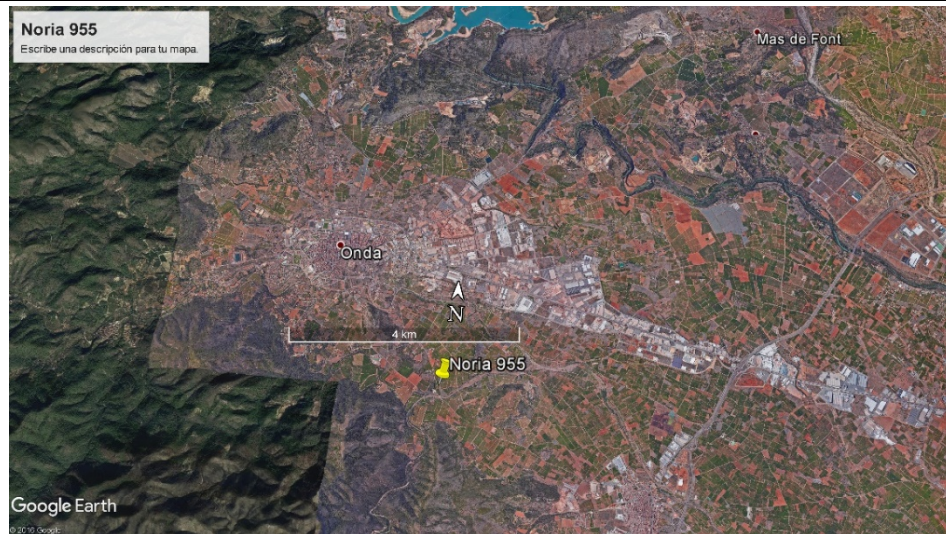


Elemento	Noria
Asociación	Noria, pozo, acequia
Descripción	
<p>Esta fuera de servicio, actualmente el predio cuenta con un nuevo pozo donde se utiliza una bomba sumergible que funciona con energía eléctrica. Tiene elementos originales, pero se encuentra en un estado de deterioro alto.</p>	



Identificación

Código del elemento		No.955			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	735872.00	Y	4425173.0
Altitud		120 m.s.n.m			
Geometría		Asociado			
X	Punto		Línea		Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada		



Elemento



Elemento	Noria
Asociación	Noria, pozo, balsa, acequia

Descripción

Actualmente fuera de uso, se desconocen las condiciones actuales del pozo. Todo el sistema se encuentra abandonado y fue reemplazado por uno más moderno.

Identificación

Código del elemento		No.956			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	735991.80	Y	4425114.4
Altitud		135 m.s.n.m			
Geometría		Asociación			
X	Punto		Línea		Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada		



Elemento



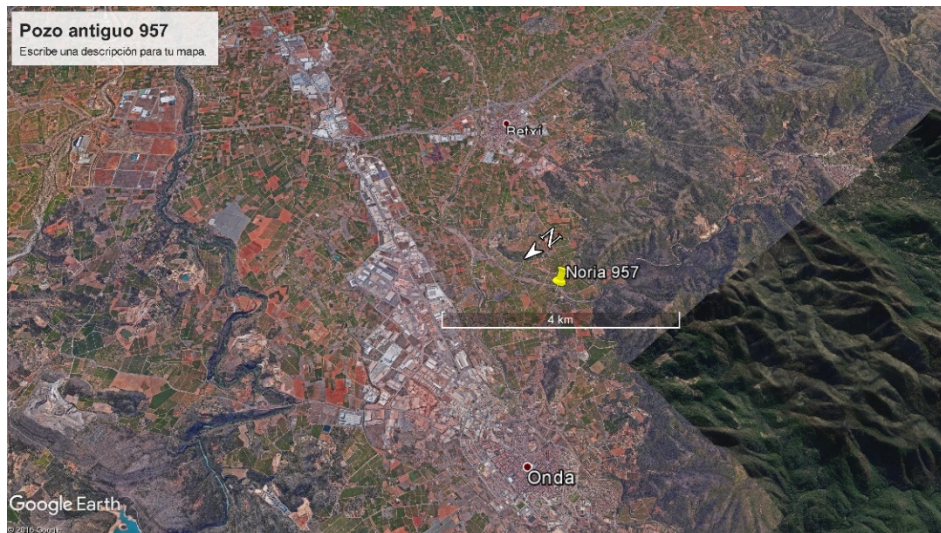
Elemento	Noria
Asociación	Noria, Pozo

Descripción

Sistema abandonado, Pozo elevado, conserva en buen estado la plataforma circular. Se podría recuperar para puesta en valor

Identificación

Código del elemento		No.957			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	735953.53	Y	4425074.3
Altitud		120 m.s.n.m			
Geometría					
X	Punto		Línea		Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada		



Elemento



Elemento	Pozo antiguo
Asociación	
Descripción	
<p>Bombeo moderno con bomba sumergible en pozo antiguo explotado con noria. La parte antigua de alojamiento de motores está en ruinas, la parte moderna ese encuentra en excelentes condiciones de manejo.</p>	

Identificación

Código del elemento		No.958			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	736874.30	Y	4425297.7
Altitud		124 m.s.n.m			
Geometría		asociación			
X	Punto		Línea		Polígono

Localización

Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada
-----------	------	---------------	---------------------



Elemento



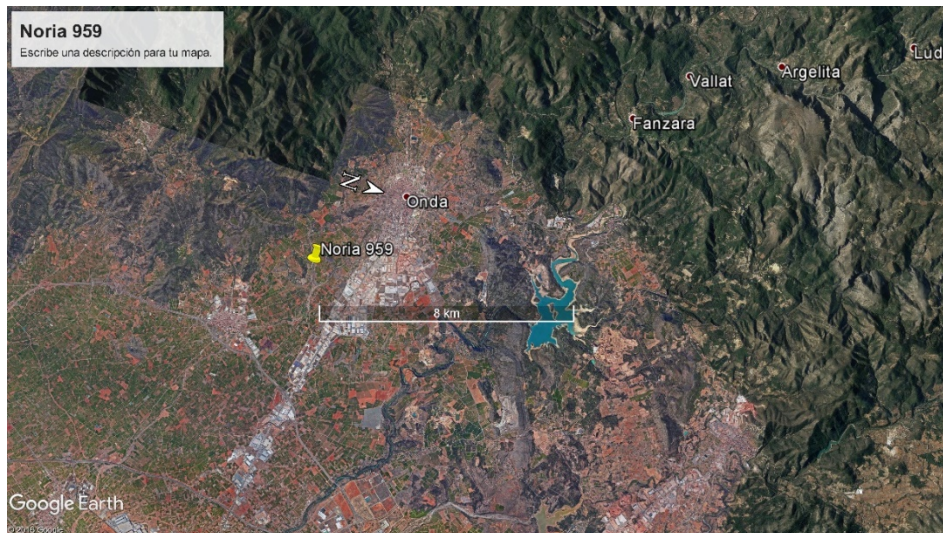
Elemento	Noria
Asociación	Noria, pozo, balsa, riego

Descripción

La plataforma circular requiere mantenimiento. los demás componentes se encuentran en regular a mal estado. El predio cuenta con riego localizado presurizado de la comunidad de regantes, por esta razón el sistema no está en funcionamiento. Área de la balsa 180 m<sup>2</sup>

Identificación

Código del elemento		No.959			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	736963.67	Y	4425402.5
Altitud		124 m.s.n.m			
Geometría		Pozo, balsa			
X	Punto		Línea		Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada		



Elemento



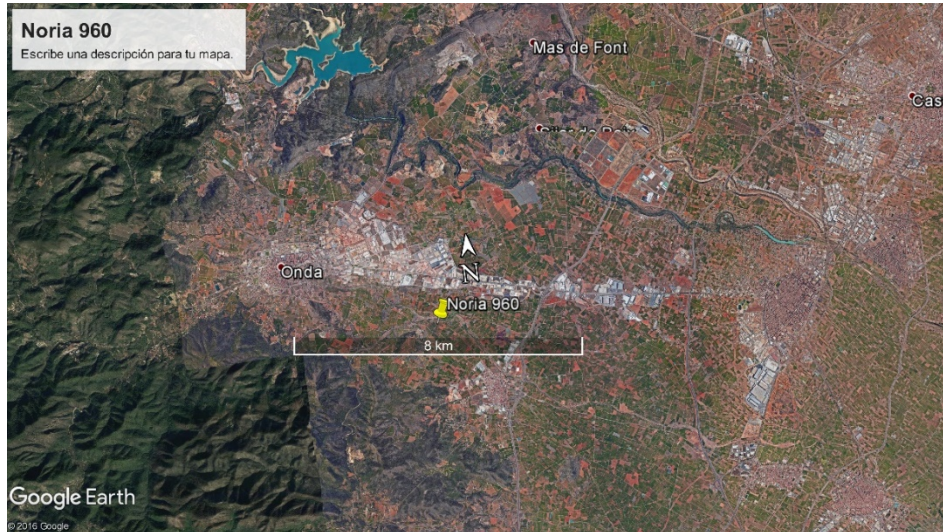
Elemento	Noria
Asociación	Pozo, balsa

Descripción

Se pueden apreciar diferentes fases evolutivas: Noria de sangre, noria a motor de combustión, bomba sumergible, fertiriego abandonado. Pozo con tanque elevado para darle cabeza al sistema. En la actualidad riegan del PANTANO. En la antigüedad se regaban algarrobos, viñas y maíz.

Identificación

Código del elemento	No.960		
Fecha visita campo	13/marzo/2017		
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N	X	737928.94	Y 4425467.9
Altitud	117 m.s.n.m		
Geometría	Asociación		
X	Punto	Línea	Polígono
<b>Localización</b>			
Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada



Elemento



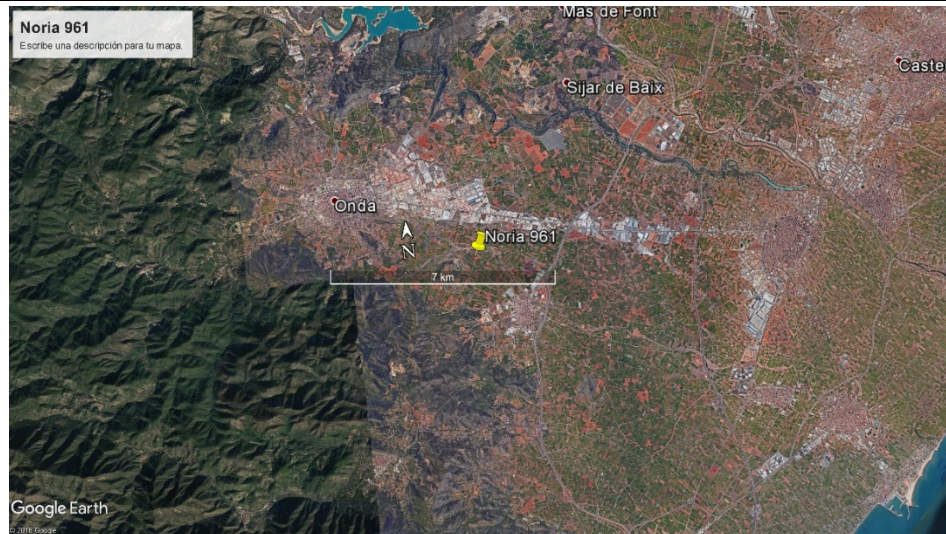
Elemento	Noria
Asociación	pozo
Descripción	Se caracteriza por la ausencia de balsa y por haber evolucionado desde la noria de sangre a el uso de bomba sumergible utilizando energía eléctrica, pasando por el uso de bomba tipo turbina accionada por motor de combustión interna. En la casa de aperos se pueden apreciar elementos como cabezal de descarga de la antigua bomba turbina y en la parte exterior aún se encuentran recipientes antiguos de aceites para motor. El pozo está operativo y se encuentra aparentemente en excelentes condiciones.

Identificación

Código del elemento	No.961				
Fecha visita campo	13/marzo/2017				
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N	X	738008.91	Y	4425396.6	
Altitud	114 m.s.n.m				
Geometría	Asociación				
Punto	Línea		Polígono		

Localización

Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada		
-----------	------	---------------	---------------------	--	--



Elemento



Elemento	Noria
Asociación	Pozo, balsa, acequias

**Descripción**

Esta Noria se encuentra muy modificada tanto en la parte constructiva como en la evolución de fuentes de energía (noria de sangre, motor de combustión interna, bomba sumergible eléctrica). Las instalaciones están muy funcionales y en buen estado de mantenimiento y conservación incluyendo la red de distribución (acequias). En el momento de la visita se pudo ver que el predio está recién resembrado en cítricos, con riego localizado en un área aproximada de 7000 m<sup>2</sup> (0.7 ha ).

Identificación

Código del elemento		No.962 y 963			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	737770.00	Y	4426060.0
Altitud	121 m.s.n.m				
Geometría	asociación				
<input type="checkbox"/>	Punto	<input type="checkbox"/>	Línea	<input checked="" type="checkbox"/>	Polígono

Localización

Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada
-----------	------	---------------	---------------------



Elemento



Elemento	Sistema de riego
Asociación	Canales, Balsas partidores, compuertas etc....

Descripción:

Distrito de riego superficial de la Comunidad de Regantes de Miralcamp (1951), se encuentra en general en muy buenas condiciones a excepción de algunos sectores de canales hacia el final del distrito. Como arquitectura antigua y de especial significado están los partidores los cuales conservan su funcionalidad original.

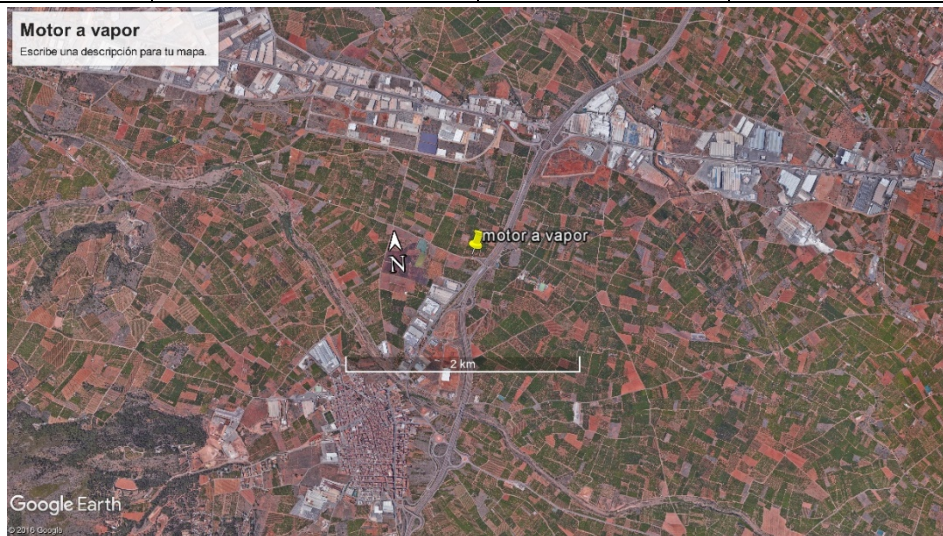


Identificación

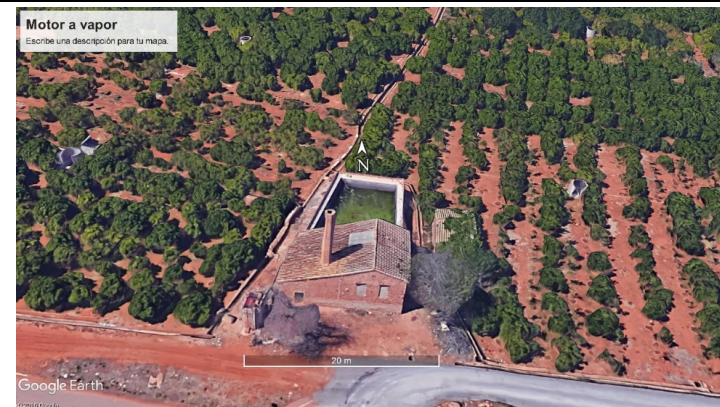
Código del elemento		964			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	740286.97	Y	442997.81
Altitud	90 m.s.n.m.				
Geometría	asociación				
X	Punto		Línea		Polígono

Localización

Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada
-----------	------	---------------	---------------------



Elemento



Elemento	Motor a vapor
----------	---------------

Asociación	balsa
------------	-------

Descripción:

La caseta que aloja el motor a vapor y la balsa se encuentran estructuralmente en perfectas condiciones. Su ubicación y estado actual son ideales para incluirla como un elemento de visita obligada en una puesta en valor de patrimonio hidráulico histórico.

Identificación

Código del elemento		No.965			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	737770.00	Y	4426060.0
Altitud					
Geometría					
X	Punto		Línea		Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada		



Elemento



Elemento Motor a vapor

Asociación Balsa

Descripción:

Se pudo observar que hay sectores donde los canales ya no se utilizan. Por ejemplo, en la foto de Google Earth se está cerca de una zona industrial especializada en cerámicas. Esto hace más prioritario la evaluación del patrimonio histórico ya que las cercanías a zonas de desarrollo industrial ponen en riesgo su desaparición. Otro elemento que contribuye a esto es el uso de tecnologías modernas de riego como el riego presurizado

Identificación

Código del elemento		No.652			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	703680.99	Y	4444301.5
Altitud		602 m.s.n.m.			
Geometría		Molino harinero			
X	Punto		Línea		Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Puebla de Arenoso	Vía de acceso	Carretera asfaltada		



Elemento

	
Elemento	Molino harinero
Asociación	
<p>Descripción:</p> <p>Molino de trigo, maíz y cebada que estuvo funcional hasta hace 50 años. Para acceder al sitio se hace por un sendero, homologado por la CEE, se incluyen una serie de fotografías del sendero por considerar el mismo como una puesta en valor del patrimonio histórico que se puede apreciar durante su recorrido. A su alrededor existen una serie de construcciones como viviendas de propietarios, molineros y bodegas de almacenamientos de productos las cuales están en ruinas pero muestran cómo se originó todo un desarrollo social alrededor del molino.</p>	

Identificación

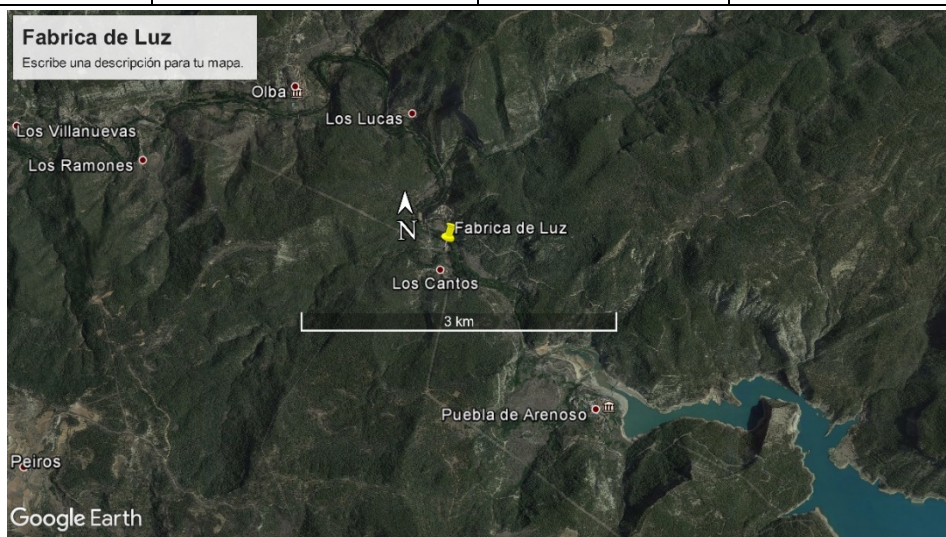
Código del elemento		No. 653			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	703751.27	Y	4443649.8
Altitud	593				
Geometría	Fábrica de luz				
X	Punto		Línea		Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Puebla de Arenoso	Vía de acceso	Carretera asfaltada		

Elemento



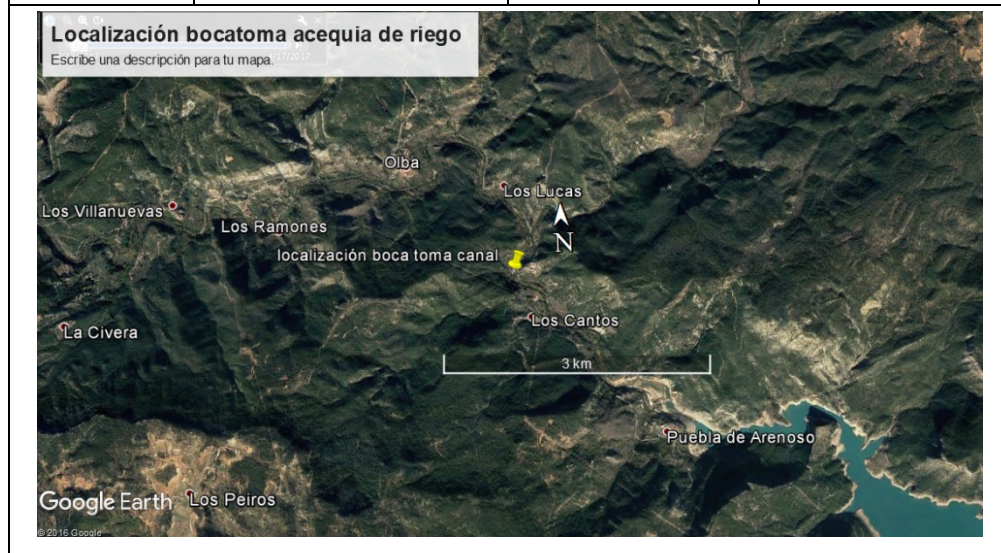
Elemento	Fábrica de Luz
Asociación	

Descripción:  
 Planta hidroeléctrica en condiciones de operación. Opera esporádicamente según información de ciudadanos de la zona

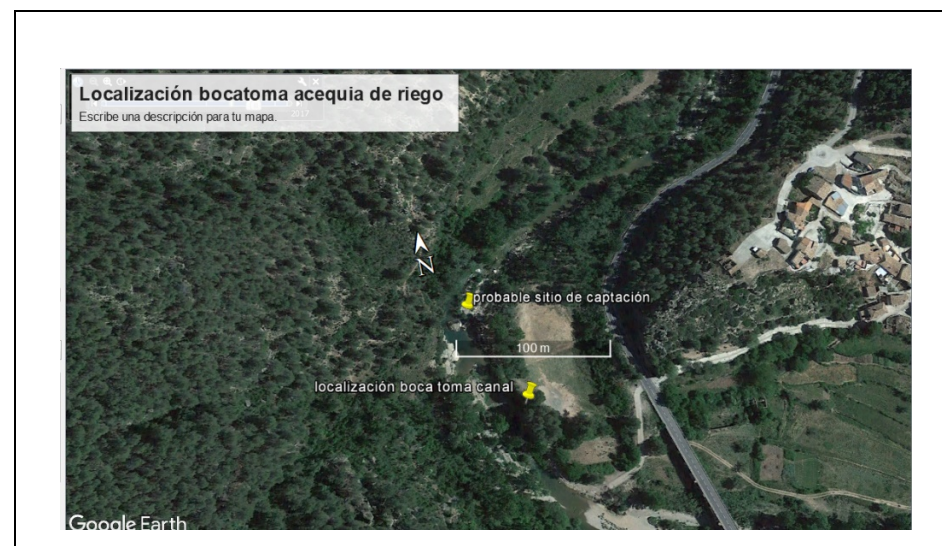


Identificación

Código del elemento		No.			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	703484.04	Y	4443935.3
Altitud	600				
Geometría					
X	Punto		Línea		Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera		



Elemento



Elemento	azud
Asociación	

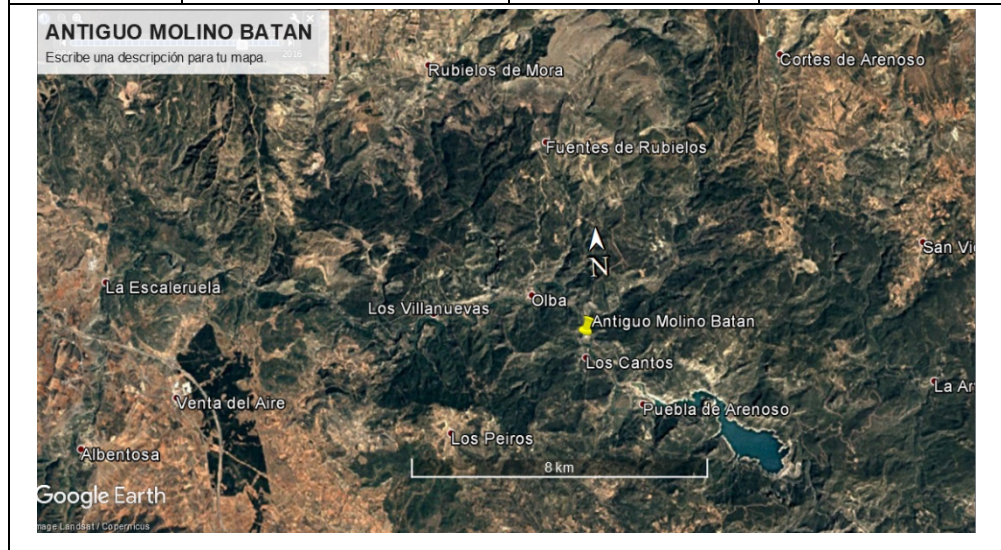
Descripción:

Durante el recorrido no fue posible ubicar el azud, sin embargo, aguas arriba se identificó en Google Earth un posible sitio el cual debe ser verificado en campo.

El lugar está siendo utilizado como camping y formaría parte de un interesante paisaje para puesta en valor

Identificación

Código del elemento		No.655			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	703612.55	Y	4443900.7
Altitud		598 m.s.n.m.			
Geometría		Molino Batan			
X	Punto		Línea		Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Puebla de Arenoso	Vía de acceso	Carretera asfaltada		



Elemento



Elemento	Molino Batan
----------	--------------

Asociación	
------------	--

Descripción:  
 Uno de los aspectos económicos importantes para la región, fue el desarrollo de una industria textil que se terminó a finales del siglo xx. Se producían mantas, edredones, paños y tejidos en lanas de oveja.

Identificación

Código del elemento	No.656		
Fecha visita campo	13/marzo/2017		
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N	X	703597.21	Y 4443782.2
Altitud	611		
Geometría	Acequia de riego		
Punto	X	Línea	Polígono
<b>Localización</b>			
Municipio	Puebla de arenoso	Vía de acceso	Carretera asfaltada



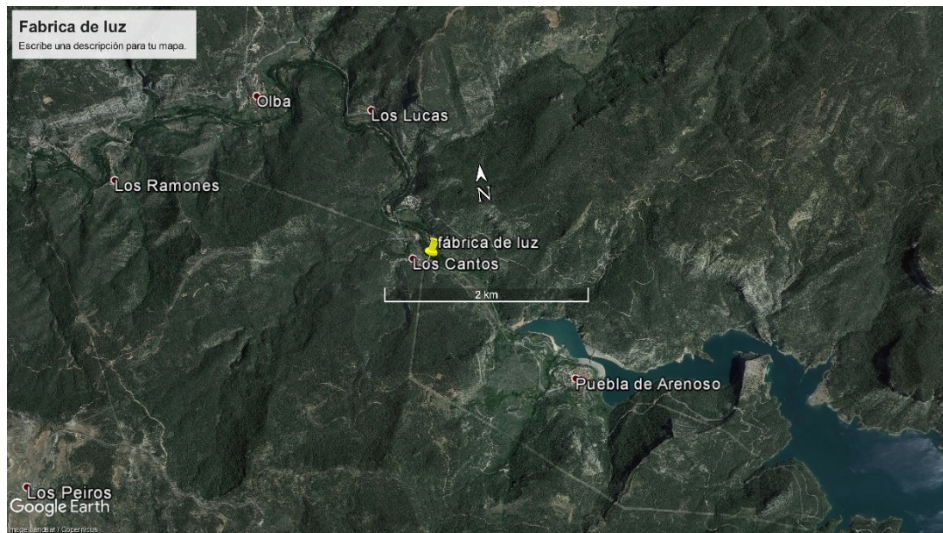
Elemento



Elemento	Acequia de riego
Asociación	
Descripción	Acequia de riego en margen izquierda vía hacia el norte. Parcialmente revestida en concreto

Identificación

Código del elemento		No.657			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	703854.74	Y	4443400.8
Altitud		594 m.s.n.m.			
Geometría		Fábrica de luz			
X	Punto			Línea	Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Onda	Vía de acceso	Carretera asfaltada		



Elemento



Elemento	Fábrica de luz
Asociación	
Descripción: Fábrica muy antigua de luz. Su estado actual en ruinas hace interesante valorar cuánto costaría su reconstrucción, su puesta en valor por su gran significado histórico	

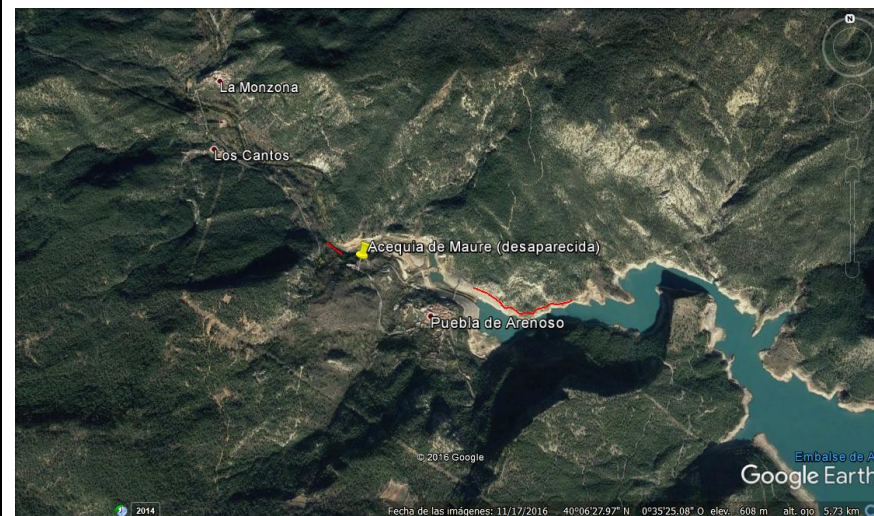


Identificación

Código del elemento	No.658			
Fecha visita campo	13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N	X	704736.40	Y	4442531.5
Altitud	621 m.s.n.m.			
Geometría	acequia			
Punto	X	Línea		Polígono
<b>Localización</b>				
Municipio	Puebla de arenoso	Vía de acceso	Carretera asfaltada	



Elemento



Elemento	Acequia
Asociación	

Descripción:

Con la construcción de la represa desaparecieron varios elementos hidráulicos del patrimonio histórico de Puebla de Arenoso entre ellos la acequia de Maure. En la foto están marcados en rojo vestigios de acequias en margen izquierda y margen derecha del Pantano de Pueblo de Arenosa.

**Identificación**

Código del elemento	No.659		
Fecha visita campo	13/marzo/2017		
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N	X	705777.00	Y 4441817.0
Altitud	638m.s.n.m.		
Geometría	Huerto		
	Punto		Línea X Polígono
<b>Localización</b>			
Municipio	Pueblo de Arenosa	Vía de acceso	Carretera asfaltada



**Elemento**



Elemento	Huerto (desaparecido)
Asociación	
Descripción: Con la construcción de la presa desaparecieron muchos elementos hidráulicos históricos y con ellos las áreas de huertos bajo riego. Se anexan fotos del paisaje actual.	

Identificación

Código del elemento		No.660			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	708963.32	Y	4440141.4
Altitud	599				
Geometría	Presa				
X	Punto		Línea		Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Pueblo de Arenosa	Vía de acceso	Carretera asfaltada		



Elemento



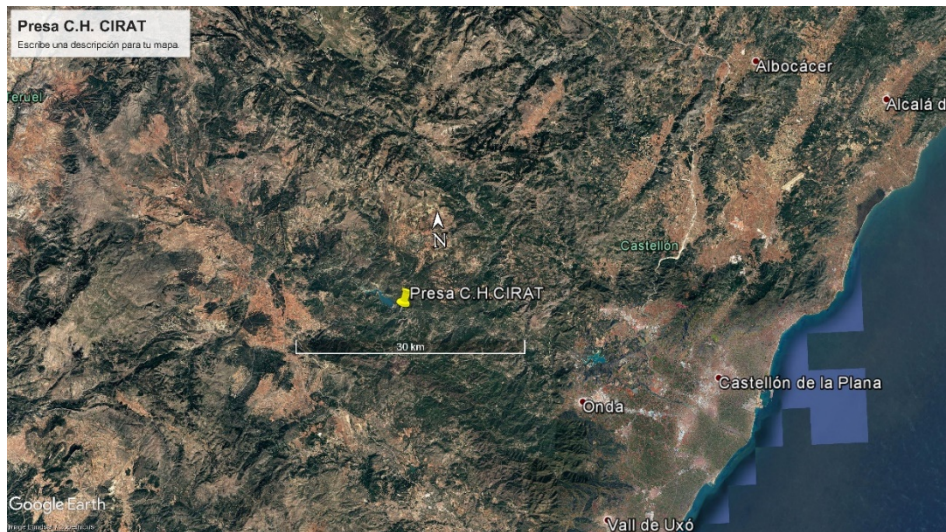
Elemento	Presa embalse de Arenoso
Asociación	

Descripción:

Presa de escollera con núcleo de arcilla, tiene una altura de 109 metros, longitud de corona de 428 metros, superficie de 418 hectáreas, capacidad 130hm<sup>3</sup>. El embalse se construyó para el riego de 27000 has. Bajo sus aguas se encuentra el antiguo municipio campos de Arenoso y tres barrios de Pueblo de Arenosa los cuales tenían una gran extensión en cultivos de regadío

Identificación

Código del elemento		No.661 y 662			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	709923.00	Y	4439300.3
Altitud		479 m.s.n.m (corona)			
Geometría		Presas y Azud			
X	Punto		Línea		Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Montanejos	Vía de acceso	Carretera asfaltada		



Elemento



Elemento	Presas y Azud
Asociación	

Descripción:

Este embalse se construyó en el año 1962 específicamente para la generación de energía, la presa es de gravedad, el embalse tiene una superficie de 2 hectáreas. Conduce el agua mediante un túnel de 8 Km hasta dónde están los generadores. En su construcción se respetó la existencia de dos acequias de riego (una en cada margen del río Mijares), provenientes de un azud aguas arriba las cuales se encuentran actualmente en funcionamiento. Aguas arriba se encuentra el azud que permite dividir el agua en dos acequias para el riego de huertos y frutales de Montanejos y la Alquería. Dada su integración se consideró importante unirlos en la ficha técnica.

**Identificación**

Código del elemento	No.663				
Fecha visita campo	13/marzo/2017				
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N	X	711697.00	Y	4438208.0	
Altitud	470				
Geometría	Huertos acequia margen izquierda				
<input type="checkbox"/>	Punto	<input type="checkbox"/>	Línea	<input checked="" type="checkbox"/>	Polígono

**Localización**

Municipio	Montanejos	Vía de acceso	Carretera asfaltada		
-----------	------------	---------------	---------------------	--	--



**Elemento**



Elemento	Acequia margen izquierdo
Asociación	
Descripción	<p>Está acequia permite el riego de las vegas fértiles del río Mijares en su margen izquierda, entre la presa de Cirat y Montanejos - Alquería. Desafortunadamente gran parte de la misma se encuentra en condiciones de abandono total. En las fotos se puede ver como los huertos en general se encuentran descuidados siendo notoria la falta de riego y de mantenimiento de los cultivos.</p>

Identificación

Código del elemento	No.664				
Fecha visita campo	13/marzo/2017				
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N	X	711327.45	Y	4438132.0	
Altitud	452 m.s.n.m				
Geometría	Acequia de riego margen derecha				
Punto			Línea	X	Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Montanejos	Vía de acceso	Carretera asfaltada		



Elemento



Elemento	Acequia margen derecho
Asociación	

Descripción

Acequia funcional alimenta varios puntos en el municipio de Montanejos como el lavadero, igualmente permite el riego de las vegas de la margen derecha del río Mijares.

Identificación

Código del elemento		No.666			
Fecha visita campo		13/marzo/2017			
Coordenadas: ETRS 1989 UTM Zona 30 N		X	711438.32	Y	4438121.6
Altitud		455			
Geometría		Molino Harinero			
X	Punto		Línea		Polígono
<b>Localización</b>					
Municipio	Montanejos	Vía de acceso	Carretera asfaltada		



Elemento



Elemento	Molino de Harina
Asociación	
Descripción:	
<p>Antiguo Molino de Harina de Montanejos, se encuentra en ruinas, solo existen las paredes exteriores y está totalmente abandonado y cubierto de vegetación. El molino era de tipo hidráulico con rueda horizontal (Rodezno). Actualmente se tiene una réplica del molino en reestructuración para la difusión de su importancia histórica en el desarrollo económico de la región.</p>	

**UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**  
**Y**  
**UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS**



**MASTER OFICIAL EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**PROYECTO DE FIN DE MASTER**

**Impactos de la fracturación hidráulica para la  
extracción de hidrocarburos en las aguas subterráneas y  
las consideraciones para su aplicación en territorio  
colombiano**

**AUTOR:  
Sonia López López**

**DIRECTOR:  
Dr. Javier Lillo (URJC)**

Alcalá de Henares, 05 de Junio de 2017



## ÍNDICE

RESUMEN.....	252
1. INTRODUCCIÓN .....	252
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	253
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS ...	253
2. METODOLOGÍA .....	254
3. PROCESO DE FRACTURACIÓN HIDRÁULICA E IMPACTOS POTENCIALES .....	254
3.1. ADQUISICIÓN DEL AGUA... 257	
3.1.1. AFECCIÓN A LA CANTIDAD DEL RECURSO.....	257
3.1.2. AFECCIÓN A LA CALIDAD DEL RECURSO .....	259
3.2. MEZCLA QUÍMICA .....	259
3.2.1. CARACTERIZACIÓN Y PROPIEDADES DE LOS ADITIVOS.....	260
3.2.2. EFECTOS POTENCIALES ASOCIADOS A DERRAMES .....	261
3.2.3. FACTORES QUE AFECTAN A LA SEVERIDAD DE LOS IMPACTOS .....	262
3.3. INYECCIÓN .....	263
3.3.1. ASPECTOS OPERACIONALES Y POSIBLES RUTAS DE MIGRACIÓN DE FLUIDOS.....	264
3.3.1.1. Revestimiento .....	264
3.3.1.2. Cemento .....	266
3.3.1.3. Orientación.....	266
3.3.1.4. Acondicionamiento o terminación.....	267
3.3.2. ASPECTOS GEOLÓGICOS O FORMACIONALES .....	267
3.4. RETORNO DE FLUJO Y AGUA PRODUCIDA .....	272
3.4.1. VOLUMEN DE AGUA PRODUCIDA.....	272
3.4.2. COMPOSICIÓN DEL AGUA PRODUCIDA.....	274
3.4.3. MANEJO Y DISPOSICIÓN DEL AGUA PRODUCIDA Y POTENCIAL DERRAME .....	274
3.5. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y DISPOSICIÓN DE DESECHOS .....	275
3.5.1. VOLUMEN DE AGUA RESIDUAL POR FRACTURACIÓN HIDRÁULICA ....	276
3.5.2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL.....	276
3.5.3. PRÁCTICAS DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES .....	277
3.5.3.1. Inyección subterránea.....	278
3.5.3.2. Instalación centralizada de tratamiento de residuos (CWT) .....	280
3.5.3.3. Reutilización de agua residual para fracturación hidráulica ...	281
3.5.3.4. Evaporación.....	282
3.5.3.5. Obras públicas de tratamiento (POTW).....	282
3.5.3.6. Otras prácticas de disposición lineal.....	283
4. IMPLEMENTACIÓN DE LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA EN COLOMBIA .....	283
4.1. SITUACIÓN ACTUAL .....	283

4.2. FACTORES A CONSIDERAR PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA EN EL TERRITORIO COLOMBIANO.....	287
5. CONCLUSIONES .....	290
6. BIBLIOGRAFÍA.....	294
7. ANEXOS.....	299

## INDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Principales reservas de yacimientos no convencionales en latinoamérica ..... 284

**Tabla 2.** Bloques adjudicados por la ANH para la exploración y producción de ync en Colombia..... 286

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Etapas de la fracturación hidráulica asociadas al agua.....	256
<b>Figura 2.</b> Distribución de las causas de derrames de químicos y fluidos fracturantes asociados con fracturación hidráulica .....	262
<b>Figura 3.</b> Destino y transporte de un fluido fracturante derramado.....	263
<b>Figura 4.</b> Configuración general de las tuberías en un pozo de hidrocarburos .....	265
<b>Figura 5.</b> Rutas potenciales de migración de fluidos fuera de la zona de producción .....	270
<b>Figura 6.</b> Ectensión vertical, longitud y profundidad de las fracturas por fracturación hidráulica en distintas formaciones productoras de EEUU .....	272
<b>Figura 7.</b> Volumen de agua inyectada vs. volumen de agua producida en Marcellus Shale, Pennsylvania, EEUU. Manejo de aguas residuales.....	273
<b>Figura 8.</b> Estrategias de manejo de aguas residuales.....	278
<b>Figura 9.</b> Cambio en las prácticas de disposición en Pennsylvania (en Marcellus Shale) .....	280
<b>Figura 10.</b> Esquema de las instalaciones del tratamiento en anticlinal Pinedale, EEUU .....	281
<b>Figura 11.</b> Cuencas prospectivas para yacimientos no convencionales en Colombia.....	285

## TABLA DE ABREVIATURAS

ANH: Agencia Nacional de Hidrocarburos
ANLA: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
API: American Petroleum Institute
BOP: Blowout Preventers
CGR: Contraloría General de la República
CBM: Coal Bed Methane
CWT: Centralized Waste Treatment facility
DOE: Department of Energy (U.S.)
EIA: Energy Information Administration (U.S.)
EPA: Environmental Protection Agency (U.S.)
E&P: Exploración y Producción
GAO: Government Accountability Office (U.S.)
GWPC: Ground Water Protection Council (U.S.)
IOGCC: Interstate Oil and Gas Compact Commission (U.S.)
MADS: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MCOR: Marcellus Center for Outreach and Research (U.S.)
MIT: Massachusetts Institute of Technology
MME: Ministerio de Minas y Energía
PMA: Plan de Manejo Ambiental
POTW: Publicly Owned Treatment Works
SCG: Sociedad Colombiana de Geología
SGC: Servicio Geológico Colombiano
TDS: Total Dissolved Solids
TENORM: Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials
UIC: Underground Injection Control

USGS: United States Geological Survey

UPME: Unidad de Planeación Minero

Energética

VOC: Volatile organic compounds

YNC: Yacimientos No Convencionales

## RESUMEN

En el presente trabajo se explica en qué consiste la fracturación hidráulica, se dan a conocer las etapas que se llevan a cabo para su desarrollo, y a partir de los estudios realizados por diferentes entidades, se exponen los riesgos asociados a cada una de estas etapas y los factores que inciden sobre la frecuencia o severidad de los impactos que pueden afectar a los recursos hídricos de agua subterránea, y especialmente, a los de agua potable. De igual manera se refleja el estado actual de la implementación de dicha técnica en el territorio colombiano, evidenciando que los mecanismos para su regulación (normativas y términos de referencia) aún presentan vacíos e imprecisiones, originados por la ausencia de una línea base de conocimientos y estudios previos a las operaciones; de acuerdo a las inconsistencias encontradas, se recomienda fortalecer el conocimiento técnico en las zonas susceptibles de ser explotadas con esta técnica en el territorio colombiano, procurando generar estudios con resultados propios de acuerdo a las particularidades geo-ambientales del país; cabe resaltar que resulta imperativo la obtención de datos pre y post-operaciones en cuanto a la caracterización de los cuerpos de agua y la calidad de la misma, para poder realizar una regulación y/o seguimiento efectivo, y tomar las medidas preventivas o correctivas más adecuadas en pro de mitigar los posibles impactos de la fracturación hidráulica.

## 1. INTRODUCCIÓN

La obtención de hidrocarburos mediante las técnicas de fracturación hidráulica, o *fracking*, (término empleado habitualmente), es una técnica que se ha desarrollado desde hace varias décadas, aunque poco se hablaba o se conocía de dicha actividad industrial a nivel mundial; sin embargo, con la creciente demanda de combustibles fósiles junto con el alto precio que alcanzó a tener el barril del petróleo, se ha ido impulsando el desarrollo de esta tecnología, especialmente durante la última década, aumentando el factor de recobro de casi todos los yacimientos (convencionales y no convencionales).

Los yacimientos no convencionales (en adelante YNC) son iguales a los yacimientos convencionales en génesis y composición, pero reciben su nombre debido a la gran viscosidad de los hidrocarburos, la baja permeabilidad y porosidad de las rocas madre que los contienen, la elevada profundidad a la que se encuentran y al requerimiento de técnicas de extracción más complejas. Estos yacimientos pueden estar contenidos en formaciones que pueden ser gasíferas (el gas albergado en ellas se denomina *tight gas*, literalmente gas apretado) o bituminosas (en este caso, crudo, denominado *tight oil*, literalmente crudo apretado), esquistos, lutitas o pizarras (*shale gas* y *oil shale*), arenas bituminosas (*oil sands*), estratos de carbón (*Coal Bed Methane* o CBM),

con crudo pesado (*heavy oil*), o hidratos de metano.

La explotación de los YNC mediante el *fracking* ha generado un gran debate a nivel mundial sobre los impactos potenciales al medio ambiente y al equilibrio de formaciones en subsuelo. Este debate debe contribuir a la búsqueda continua de regulaciones y normativas que permitan mitigar dichos impactos mediante diferentes mecanismos de prevención, optimización y estandarización de técnicas operacionales y planes de contingencia. En este sentido, el presente trabajo trata de contribuir al debate proporcionando el panorama general de la técnica de fracturación hidráulica y los posibles riesgos asociados en cada etapa de su desarrollo que tengan el potencial de causar afección a los recursos de agua potable. De igual manera se pretende proporcionar los diferentes aspectos a considerar para la aplicación de dicha técnica en Colombia, ya que mediante la fracturación hidráulica se elevaría el volumen de reservas en el país y esto resulta en una apuesta atractiva para las compañías operadoras y un inminente desarrollo del *fracking* en los YNC del territorio colombiano.

La fracturación hidráulica como tecnología de estimulación de yacimientos para la producción de hidrocarburos se ha venido utilizando en Colombia desde hace varias décadas para incrementar el factor de recobro en los

yacimientos convencionales y ha sido implementado en cerca de 16 campos petroleros; sin embargo, solo a partir del 2012 se inició la adjudicación de bloques para exploración y producción de YNC, por lo que actualmente se están buscando y elaborando los mecanismos de regulación que permitan ejercer control y seguimiento con el fin de mitigar los potenciales efectos que tenga dicha práctica en el territorio colombiano.

### **1.1 Objetivo general**

El presente trabajo busca proporcionar un panorama general de la técnica de fracturación hidráulica y los riesgos potenciales que pueden llegar a afectar los recursos de agua subterránea, fundamentalmente de agua potable. De igual manera se pretende reflejar el estado actual de la implementación de dicha técnica en el territorio colombiano, evidenciando los aspectos más relevantes a tener en cuenta para una regulación efectiva en pro de mitigar los riesgos inherentes al desarrollo de la fracturación hidráulica.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Conocer en qué consiste la fracturación hidráulica con las respectivas etapas de desarrollo de esta práctica operacional.
- Identificar los impactos potenciales en las aguas subterráneas, involucrados en cada una de las etapas de desarrollo de las operaciones de fracturación hidráulica.

- Analizar y describir la situación actual de la implementación de la fracturación hidráulica en el territorio colombiano.
- Revisar las consideraciones a tener en cuenta para establecer la reglamentación de dicha práctica con el fin de mitigar los impactos potenciales.

## 2. METODOLOGIA

El presente trabajo se ha realizado a partir de la revisión bibliográfica de los temas asociados a la fracturación hidráulica o “*fracking*”. Para esto se ha requerido de diferentes materiales bibliográficos tales como artículos, libros, revistas, páginas web del sector público y privado, trabajos de fin de grado y fin de master, e información de foros y talleres con expertos.

La revisión se ejecutó en las siguientes etapas:

- a) Revisión bibliográfica de documentos técnicos y académicos sobre los temas de interés, lo que permitió obtener un panorama amplio de dichos temas.
- b) Lectura y análisis del material bibliográfico, resaltando la información relevante y actualizada, lo que permitió seleccionar aquella que se consideró más adecuada para este trabajo.
- c) Planteamiento de la estructura deseada del TFM

- d) Búsqueda de información complementaria para profundizar en temas específicos.
- e) Desarrollo del TFM, con el asesoramiento y acompañamiento del tutor.

## 3. PROCESO DE FRACTURACIÓN HIDRÁULICA E IMPACTOS POTENCIALES

La fracturación hidráulica o *fracking* consiste en una serie de técnicas de perforación avanzadas para acceder a recursos de hidrocarburos que anteriormente resultaban inaccesibles con el objetivo de incrementar la producción, sin embargo, a medida que se incrementa la aplicación de estas técnicas, hay un aumento de la preocupación por los impactos potenciales que están ligados a esta actividad, los cuales pueden afectar al medio ambiente y a la salud humana (U.S. EPA, 2015). Existen quejas que señalan que la calidad del agua se ha visto afectada y que los efectos potenciales inciden directamente en la calidad y la cantidad de los recursos de agua potable.

El *fracking* es una técnica de estimulación para incrementar la producción de gas y petróleo en las formaciones rocosas inyectando un fluido a base de agua, químicos y propelente (agente de sostén); ésta se ha usado desde la década de 1940 y ha evolucionado de acuerdo a la tecnología y los avances en perforación direccional en las formaciones no

convencionales de donde se podría extraer cantidades económicamente rentables de petróleo y gas (USGS, 2017).

El operador bombea el fluido fracturante (una mezcla de agua y propelentes, junto a fluidos especiales de alta viscosidad) dentro del pozo a presiones lo suficientemente elevadas para forzar que el fluido atraviese las formaciones circundantes, expandiendo fracturas preexistentes y creando nuevas fracturas en el proceso. El fluido permanece en la formación para mantener abiertas las fracturas y permitir la liberación de petróleo y gas. Una parte del fluido fracturante inyectado en el pozo, retornará a superficie junto con agua de formación, a la cual se referirá como agua producida. Esta agua producida es llevada a superficie y será colectada por el operador, la cual podrá ser almacenada en compartimentos en el área de operaciones, inyectada en pozos, transportada a una planta de tratamiento de aguas residuales, o reutilizada por el operador de distintas maneras (U.S. GAO, 2012).

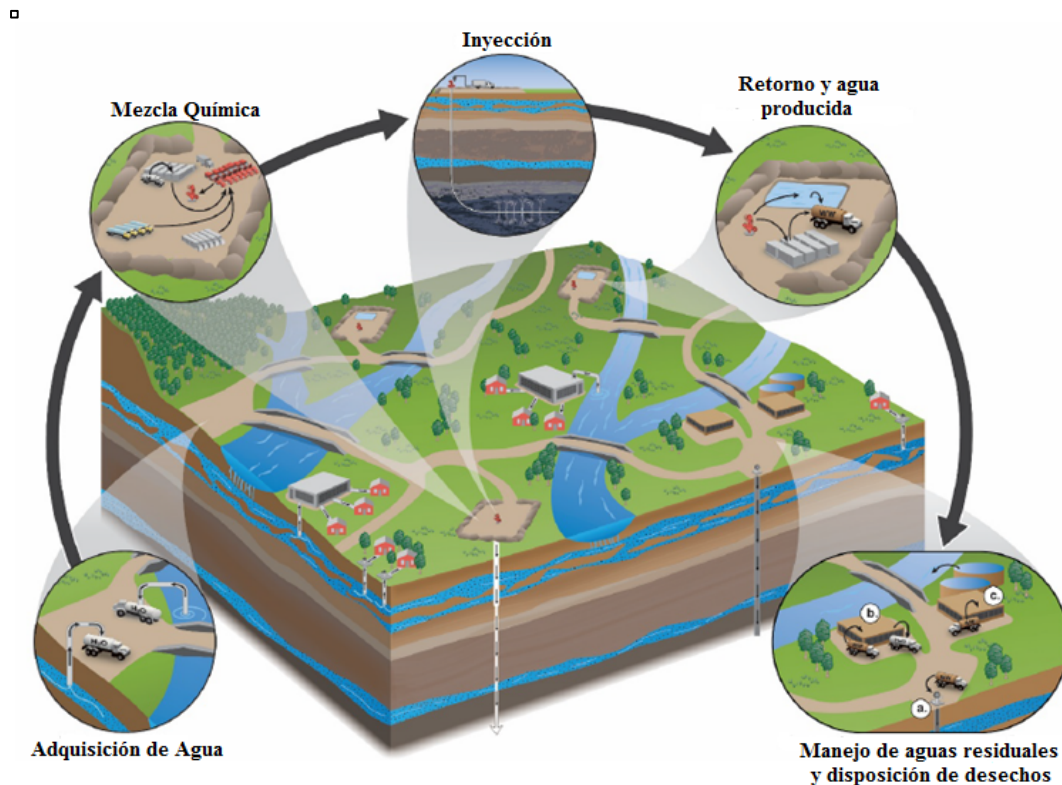
Las etapas de la fracturación hidráulica asociadas al agua de acuerdo a la información

presentada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (en adelante EPA) (U.S. EPA, 2015), como se muestra en la

**Figura 1** son las siguientes:

- Adquisición del agua: corresponde a la extracción de agua subterránea o superficial para los fluidos fracturantes
- Mezcla química: es la elaboración del fluido fracturante mediante la mezcla de agua, químicos y el propelente.
- Inyección en el pozo: es la inyección del fluido fracturante en el pozo para fracturar la formación geológica
- Retorno de flujo y agua producida: son los retornos hacia la superficie del fluido inyectado y el agua de formación producida, la cual se transporta para reutilizar, realizarle tratamiento y/o para disposición final.
- Tratamiento de aguas residuales y disposición de desechos: es la reutilización, tratamiento y vertido o disposición final del agua residual generada en la fracturación hidráulica (incluida el agua producida).





**Figura 1.** Etapas de la fracturación hidráulica asociadas al agua. Modificado de U.S. EPA (2015).

Los principales mecanismos de impacto tanto superficial como subterráneamente, son:

- Extracción de agua en áreas o periodos con poca disponibilidad
- Derrames de los fluidos de la fracturación hidráulica y agua producida
- Fracturación directa en las fuentes de agua potable subterráneas
- Migración de líquidos y gases bajo la superficie
- Tratamiento inadecuado y descarga de aguas residuales

No se tratarán aquí aquellos impactos potenciales muy localizados que no implican

afección sistemática y/o generalizada, así mismo se debe tener en cuenta que existen factores limitantes a la hora de determinar los efectos de esta actividad en los recursos de agua potable, como lo son:

- Insuficiencia de datos pre- y post-fracturación hidráulica relativos a la calidad de los recursos de agua potable
- Escasez de estudios a largo plazo
- Presencia de otros factores contaminantes que impidan vincular de forma directa e inequívoca la fracturación hidráulica con el impacto.

### **3.1. Adquisición del Agua**

El agua es el componente mayoritario de la fracturación hidráulica, corresponde al 90% del fluido fracturante y cada pozo requiere entre miles y millones de litros de agua; por ejemplo, en Estados Unidos se usó un promedio de 167 millones de litros (44 billones de galones) de agua en 2011 y 2012. Son cifras elevadas, aunque esto representa menos del 1% del uso nacional anual del agua, la extracción en sí, puede impactar la calidad y la cantidad del agua en escalas más locales.

Los tipos de agua que se utilizan para fracturación hidráulica son: agua superficial, agua subterránea y agua reutilizada (de agua residual industrial, proveniente de plantas de tratamiento, o reciclada de otras operaciones de fracturación hidráulica), y la proporción varía con la ubicación de los pozos, por ejemplo, continuando con el ejemplo de EEUU, en el sector occidental de Texas la mayoría del agua es subterránea; en EEUU la gran mayoría del agua utilizada para fracturación hidráulica es agua dulce y tan solo el 5% del promedio nacional emplea agua reutilizada con respecto al agua inyectada; esto se debe a que trabajar con aguas reutilizadas de operaciones previas puede presentar altas concentraciones de TDS (total de sólidos disueltos), e incluyen cationes (calcio, magnesio, hierro, bario y estroncio) y aniones (cloruros, bicarbonatos, fosfatos, sulfatos) específicos junto con otros componentes que pueden alterar las

propiedades del fluido fracturante en el pozo, al interferir con ciertos aditivos químicos; por ejemplo, un valor elevado de TDS puede inhibir la efectividad de los reductores de fricción (U.S. EPA, 2015). Debido a estas limitaciones el agua residual para reutilización puede requerir tratamientos adicionales y suele mezclarse con agua dulce para diluir sólidos y otros constituyentes.

En Estados Unidos, el volumen medio nacional de agua por pozo utilizada para fracturación hidráulica es de 5,7 millones de litros (1,5 millones de galones), sin embargo, este volumen varía con la forma del pozo, ya sea horizontal o vertical, la longitud del mismo, la formación geológica y la formulación del fluido fracturante. Debido a que el transporte de agua es costoso, las operadoras suelen utilizar fuentes de agua cercanas al punto de operación de ser posible; autoabasteciéndose generalmente de agua superficial o subterránea directamente, pero también pueden obtener agua a través de sistemas públicos u otros proveedores.

#### **3.1.1. Afección a la cantidad del recurso**

Aunque el consumo en sí mismo no afecta la cantidad global de los recursos de agua potable, el impacto deriva de la combinación del consumo de agua y la disponibilidad del agua a escalas locales. Si bien no existen evidencias de un pozo de agua subterránea o una corriente superficial que se haya agotado por fracturación hidráulica, esto puede reflejar

únicamente la falta de documentación o registro de esta información. De acuerdo a un estudio de investigadores del Massachusetts Institute of Technology (MIT) en el año 2011 (Moniz et al, 2011), la cantidad de agua utilizada para el desarrollo de yacimientos no convencionales es pequeña en comparación con otros usos, como la agricultura y otras actividades industriales. Sin embargo, los efectos acumulativos del uso de agua superficial o subterránea en determinados lugares pueden ser significativos a escala local, particularmente en áreas donde se experimentan condiciones de sequía. Por ejemplo, en el caso de EEUU, en el sur de Texas y Texas occidental se apreció un mayor impacto potencial debido a que los volúmenes utilizados para fracturación hidráulica eran elevados, hay una baja disponibilidad de agua, y además hay periodos de sequía en la zona. En contraste, en zonas donde hay mayor disponibilidad de agua relativa, alta pluviosidad durante el año o gran capacidad de almacenamiento, son menos sensibles a ser afectadas por el consumo de agua para la fracturación hidráulica. Es obvio que la gestión del agua puede alterar ese balance entre consumo y disponibilidad. Ya que el tipo de agua utilizada (fresca, salobre, reusada de fracturación hidráulica, o residual de otras fuentes) es el factor que más puede incidir en los impactos potenciales derivados de su consumo, si se logra reemplazar las fuentes de agua dulce por otro tipo de agua, se puede

reducir la demanda de agua dulce superficial o subterránea y disminuir el impacto potencial.

De acuerdo al informe presentado por la Oficina de Responsabilidad del Gobierno de los Estados Unidos (en adelante GAO) (U.S. GAO, 2012), la extracción de agua de acuíferos someros puede afectar temporalmente los recursos de agua subterránea; dichas extracciones pueden hacer descender los niveles del acuífero y de las corrientes y manantiales a los cuales se encuentre conectado. La extracción de agua de acuíferos más profundos puede tener efectos a largo plazo ya que la recarga de dichos acuíferos a través de la precipitación toma más tiempo; así que la extracción de agua subterránea puede afectar la cantidad de agua disponible para otros usos, incluyendo el suministro para uso público y privado.

Realmente no se sabe a ciencia cierta si la cantidad de agua utilizada en esta actividad represente una pérdida del recurso a largo plazo en una región, ya que es muy difícil determinar los efectos acumulativos en los recursos de agua debido a la escala y la localización de las futuras operaciones donde se desarrollen estas técnicas, así mismo, el volumen total que las operadoras van a extraer de los acuíferos es incierto, así que la cantidad total de agua consumida durante el periodo de vida de la actividad permanece desconocida y el estudio de los efectos potenciales a largo

plazo se ven diezmados por dicha incertidumbre ([U.S. EPA, 2015](#)).

### **3.1.2. Afección a la calidad del recurso**

En cuanto al impacto a la calidad del agua asociado a la extracción de agua para fracturación hidráulica se debe aclarar que cualquier extracción de agua puede alterar la calidad de la misma, ya que si la extracción excede la tasa de recarga, disminuye el almacenamiento en los acuíferos, lo que potencialmente acarrea una movilización de contaminantes o permitiendo una infiltración de agua con calidad inferior desde la superficie o de las formaciones adyacentes, así mismo se puede afectar o disminuir la descarga en las corrientes y afectar la calidad. Se espera un mayor impacto en áreas propensas a sequías o con recarga limitada; a nivel superficial puede alterar la corriente (caudal) disminuyendo la capacidad de dilución de contaminantes.

De acuerdo a lo reportado por la GAO ([U.S. GAO, 2012](#)), la extracción de agua de corrientes superficiales cercanas puede hacer descender el caudal de los ríos volviéndolos más susceptibles a los cambios de temperatura; las temperaturas elevadas pueden afectar la vida acuática de forma adversa, ya que los peces y otros organismos necesitan temperaturas específicas para su reproducción y desarrollo apropiado. Adicionalmente, un descenso en el flujo puede ocasionar daño a la vegetación ribereña y por ende a la calidad.

### **3.2. Mezcla Química**

El fluido fracturante consta de una base fluida (principalmente agua), aditivos para ajustar pH, viscosidad y demás propiedades químicas, y propelente, el cual se encarga de sostener las aberturas de las fracturas generadas. Las funciones específicas del fluido es crear y extender las fracturas, transportar el propelente y ubicarlo en las fracturas. El proceso consta de cuatro fases ([U.S. EPA, 2015](#)), a través de las cuales se puede presentar afección a los recursos de agua potable ya que, durante el almacenamiento, mezcla, bombeo de químicos y fluidos se pueden producir derrames y/o fugas, cuyo impacto depende del tipo de derrame y la toxicidad de los químicos involucrados.

La primera fase del proceso es la adecuación, limpieza y preparación del pozo. Corresponde a la pre-mezcla, un fluido inicial que se circula antes del fluido fracturante; el primer químico introducido es típicamente el ácido (usualmente ácido clorhídrico), el cual tiene una concentración entre el 3% y el 28% ([FracFocus.org](#)) con el objetivo de ajustar el pH, limpiar cualquier residuo de la cementación del revestimiento y disolver cualquier trozo de roca que pudiera quedar en el pozo y bloquear las perforaciones. El ácido se bombea directamente de los contenedores o camiones, sin mezclarse con otros aditivos, aunque también puede involucrar mezcla e inyección de algunos aditivos como biocidas,

inhibidores de corrosión, reductores de fricción e inhibidores de incrustaciones.

En la segunda fase, es el fluido fracturante, comúnmente referenciado como lechada principal, éste se mezcla y se bombea dentro del pozo para crear las fracturas en la formación. Esta lechada es una mezcla de una base fluida (usualmente agua) y aditivos. Este fluido está diseñado para crear y alargar las fracturas a través de canales naturales de la formación cuando se inyecta a presiones elevadas a través de las perforaciones hechas en el revestimiento.

La tercera fase, el propelente (usualmente arena), se mezcla en el fluido fracturante y en algunos casos se utilizan geles para incrementar la viscosidad y transportar el propelente.

La última fase, o lechada de limpieza se bombea después de que se realiza la fracturación, con el objetivo de maximizar la productividad del pozo; refuerza el emplazamiento del propelente en la fractura, ayuda a limpiar los químicos inyectados en las fases anteriores y previene el crecimiento microbiano en las fracturas ([Knappe y Fireline, 2012](#)).

Este conjunto de fases constituye una etapa, y cada etapa se repite varias veces a medida que se desarrolla la fracturación hidráulica; el número de etapas depende de la longitud y la configuración del pozo (por ejemplo, si es

vertical u horizontal). La combinación química de las mezclas varía en cada área de operaciones, y las proporciones utilizadas determinan la capacidad y el tipo de equipamiento necesario para almacenamiento, y, por ende, hay que considerarlo en impacto potencial que pueda ser causado por derrames.

En cuanto a la frecuencia, y severidad de los derrames de los fluidos fracturantes (y sus aditivos) se sabe que existe por lo menos un derrame por cada 100 pozos en Colorado (de acuerdo a datos de la EPA obtenidos en FracFocus ([FracFocus.org](#)) y un promedio entre 0,4 y 12,2 derrames por cada 100 pozos en Pennsylvania, lo que corresponde a un promedio entre 100 y 3700 derrames anuales, asumiendo que se desarrollan entre 25.000 y 30.000 nuevos pozos por año; algunos estudios indican que los volúmenes van desde 19 litros (5 galones) a más de 72.000 litros (19.000 galones), con un volumen medio de 1.600 litros (420 galones) por derrame.

### **3.2.1. Caracterización y propiedades de los aditivos**

Se han identificado una lista de 1076 sustancias químicas ([U.S. EPA, 2015](#)) que se han usado o se usan en el proceso de fracturación hidráulica, dentro de los cuales se encuentran compuestos como ácidos, fenoles, alcoholes, hidrocarburos aromáticos, bases, mezclas de hidrocarburos, polisacáridos, tensioactivos, metanol, destilados del petróleo con hidrógeno y ácido clorhídrico, siendo los tres últimos

aquellos más utilizados (en más del 65% de los pozos). La configuración de la mezcla varía con la formación geológica y preferencias de la operadora. Los principales aditivos que se emplean en la preparación del fluido fracturante son por lo general: ácidos, biocidas, agentes de ruptura, controladores de arcillas, inhibidores de corrosión, agentes reticulantes, emulsificantes, reductores de fricción, controladores de pH, inhibidores de incrustaciones, solventes, surfactantes, entre otros. En el **Anexo 1** se registran los principales aditivos con sus respectivas funciones y compuestos químicos utilizados durante la fracturación hidráulica.

La concentración de dichos compuestos y si se almacenan (y se manipulan) como parte de una mezcla o en estado puro, va a ser un factor determinante a la hora de evaluar la severidad del impacto en caso de producirse un derrame. Igualmente se deben conocer los volúmenes que se utilizan de dichos químicos, ya que eso determinará el tipo de almacenamiento, las características de los contenedores y la cantidad total que podría derramarse.

De acuerdo al informe de la EPA ([U.S. EPA, 2015](#)), actualmente se emplean de 9.800 a 69.000 litros de químicos inyectados por cada pozo con un volumen entre 114 y 14.000 litros para cada compuesto químico utilizado. Otra forma de visualizar el volumen es conociendo que el volumen medio estimado de fluido fracturante es de 5.7 millones de litros, y

asumiendo que cerca del 2% de dicho fluido corresponde a los químicos que se adicionan a la base fluida, se obtiene que se emplean ceca de 114.000 litros de químicos por pozo.

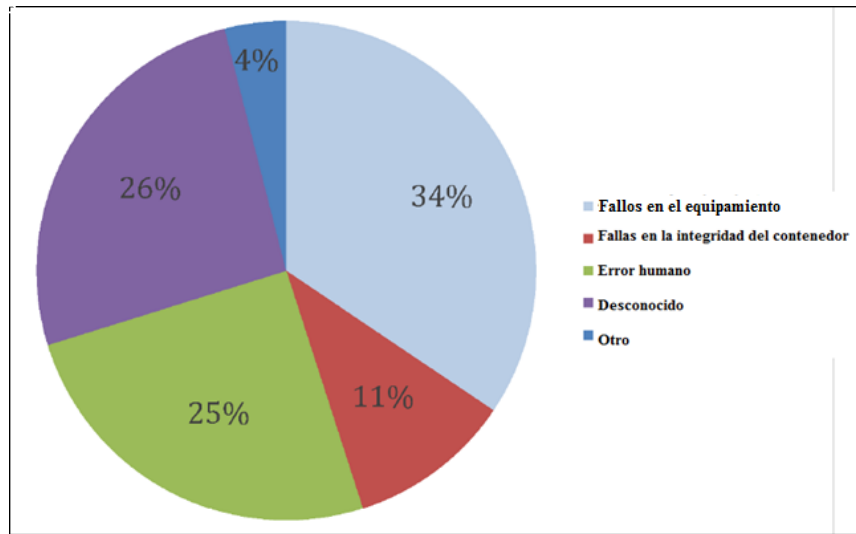
Se debe tener en cuenta características como la movilidad, solubilidad y volatilidad de dichos compuestos; la gran mayoría tienen fuerte asociación con suelos y materia orgánica en general, por lo que pueden persistir a largo plazo en el ambiente, de igual forma la mayoría de estos compuestos se disuelven por completo en el agua, y muy pocos de ellos son volátiles así que tienden a permanecer en el agua, prolongando el impacto potencial en caso de presentarse un derrame.

### **3.2.2. Efectos potenciales asociados a derrames**

Los derrames y fugas pueden ocurrir como resultado de rupturas de tanques de almacenamiento, colapsos del pozo (*blowouts*), fallos del equipamiento, sobrellenado, vandalismo, accidentes, incendios, o simplemente errores operacionales. Por ejemplo, los tanques que almacenan químicos tóxicos, o las mangueras que transportan desechos hacia los tanques pueden presentar fugas, o las balsas donde se almacenan los residuos se pueden derramar como resultado de lluvias torrenciales; de acuerdo a los datos consignados en FracFocus ([FracFocus.org](#)), la EPA evaluó 151 derrames de aditivos químicos o fluidos fracturantes en EEUU y se evidenció que la mayoría de los derrames

fueron por fallos en los equipos y error humano, aunque por lo menos un cuarto de dichos derrames fueron por causas

desconocidas o simplemente no fueron reportados tal como se muestra en la **Figura 2**.



**Figura 2.** Distribución de las causas de derrames de químicos y fluidos fracturantes asociados con fracturación hidráulica. Modificada de U.S. EPA (2015).

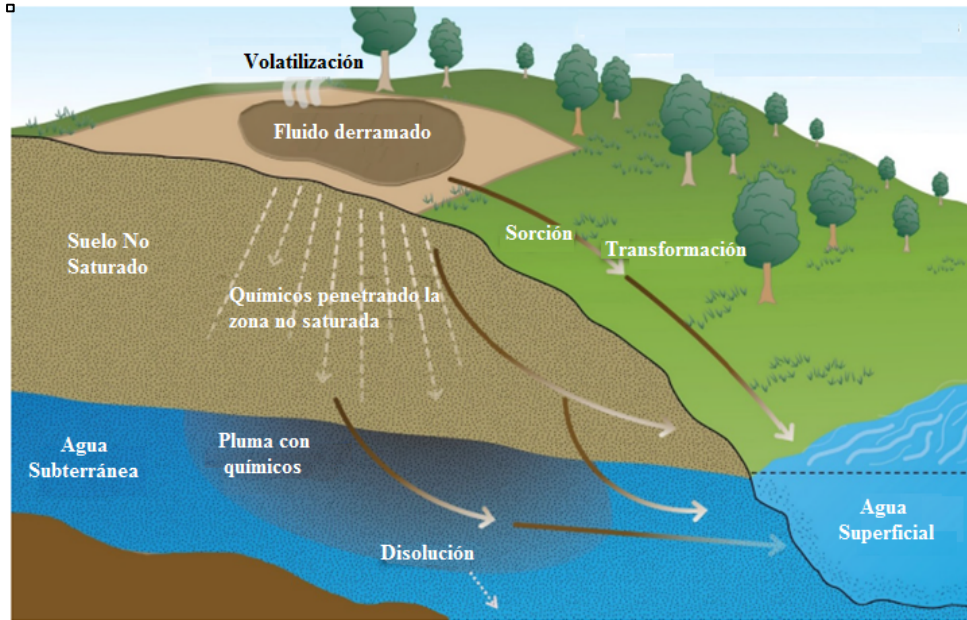
De igual manera en la información presentada por la EPA (U.S. EPA, 2015), en los casos reportados de derrames, se indica que el receptor ambiental dominante fue el suelo y algunos derrames alcanzaron agua superficial. No se reportó ningún evento que haya alcanzado el agua subterránea, pero esto no significa que no haya sucedido, sino que se hicieron pocos análisis posteriores al derrame, y por lo general deben pasar varios años para que el contaminante alcance las masas de agua subterránea y/o se logre detectar la contaminación.

### 3.2.3. Factores que afectan la severidad de los impactos

Como se ha visto hasta el momento, un derrame tiene el potencial de migrar e impactar los recursos de agua mediante diversas modalidades, trayectorias e interacciones, así como se muestra en la **Figura 3**. La severidad del impacto de un derrame va a depender de múltiples factores, como las propiedades químicas del fluido derramado, concentración, volumen, condiciones de localización, condiciones ambientales, manejo de los químicos y el momento en el que ocurra el derrame; también se debe tener en cuenta las dimensiones de la operación, la proximidad a los cuerpos de agua, propiedades del terreno,

entrenamiento y experiencia del personal involucrado en la operación, calidad y mantenimiento de los equipos utilizados y

planes de contingencia para mitigación de impactos.



**Figura 3.** Destino y transporte de un fluido fracturante derramado. Modificada de U.S. EPA (2015).

Otros factores que afectan la severidad de los impactos asociados a los derrames, proviene de la falta de información y/o caracterización química de algunos aditivos, así como la confidencialidad de ciertos aditivos por parte de las empresas y la gran variedad de mezclas que se generan para cada fluido fracturante, ya que no hay una estandarización de la configuración de dicho fluido, por lo que la incertidumbre de las posibles reacciones e interacciones con el medio receptor dificulta la selección de las medidas de contingencia o mitigación realmente efectivo.

Las medidas de contingencia ante derrames van desde revestimientos, zanjas de desviación, bermas, diques, dispositivos de prevención de sobrelLENADOS, y contenedores secundarios hasta medidas de mitigación como remoción de suelos contaminados y uso de materiales absorbentes para atenuar o limitar la severidad de los derrames, su utilización varía entre pozos y áreas de operaciones y no siempre resultan efectivas.

### 3.3. Inyección

Consiste en la inyección del fluido fracturante dentro del pozo bajo presiones elevadas. Este



líquido, sale del pozo y se mueve hacia la formación, donde genera las fracturas en la roca; las fracturas generadas se extienden dentro de la zona de producción con el fin de acceder a la mayor cantidad de crudo o gas posible. Para poder optimizar la producción de hidrocarburos, se deben aislar las formaciones acuíferas de las zonas productoras, y si este aislamiento está correctamente diseñado, construido e instalado, se pueden reducir los impactos potenciales que se pueden generar en los recursos de agua potable; ya que, si fallan los componentes, el diseño, o si las operaciones de fracturación hidráulica no se ejecutan correctamente, se pueden ocasionar efectos adversos en los recursos de agua potable.

Para poder estudiar los impactos potenciales de la inyección se deben tener en cuenta los factores operacionales -construcción del pozo, diseño e ingeniería, componentes, ejecución de operaciones-, y los factores geológicos - litología, tipo de aislamiento por formaciones intermedias entre el acuífero y la zona de interés, estructura geológica del área, geomecánica de las rocas, entre otros-, la interacción entre ambos conjuntos de factores determinará los mecanismos que potencialmente generan impactos en los recursos de agua potable.

### **3.3.1. Aspectos operacionales y posibles rutas de migración de fluidos**

Los fluidos se desplazan a través de las cavidades creadas a partir de los esfuerzos

generados durante la fracturación hidráulica. Los pozos están diseñados y construidos para aislar los fluidos y maximizar la producción de hidrocarburos, sin embargo, se puede presentar una construcción inadecuada o el deterioro ya sea del revestimiento o del cemento, y esto puede permitir el movimiento de fluidos hacia las formaciones acuíferas y modificar la calidad del agua. Así, los problemas asociados con los pozos se relacionan principalmente al revestimiento y al cemento (U.S. EPA, 2015), por deficiencias en el diseño, aplicación, propiedades, etc.:

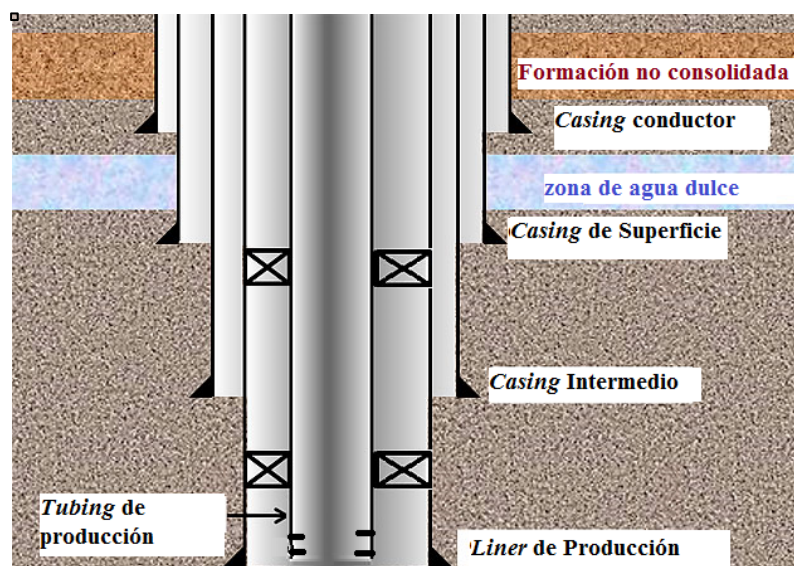
Un pozo es un sistema multi-componente que comúnmente consta de revestimiento, cemento, y un ensamblaje de “completamiento” o acondicionamiento o terminación; puede ser perforado verticalmente, horizontalmente o con una orientación desviada. Estos componentes están configurados de tal manera que deben impedir el movimiento no deseado de fluidos desde, hacia o a través del pozo. La función principal del revestimiento, es actuar como barrera al movimiento lateral de fluidos y la función del cemento es evitar el movimiento vertical de los mismos, por ende, la unión de ambos elementos debe prevenir el movimiento de fluidos hacia los recursos de agua potable.

#### *3.3.1.1 Revestimiento.*

El revestimiento o *casing (s.l.)* es un sistema de tuberías de acero que se ubican dentro del pozo para dar estabilidad a las paredes del pozo, transportar los hidrocarburos hasta superficie y

para prevenir la entrada de otros fluidos hacia el interior del pozo. La configuración del pozo normalmente consta de *casing*, *liner* y *tubing* (Drillingformulas, 2017); el *casing* se sitúa desde superficie hasta el fondo de la zona a proteger (puede aislar y proteger las zonas acuíferas) con el fin de evitar el colapso de las paredes del pozo y se va instalando de diferentes diámetros durante cada fase de la

perforación; los *liners*, también son tuberías de revestimiento, pero que están anclados o suspendidos desde la última sección del *casing* hasta el fondo del pozo y en algún tramo están ranuradas; y el *tubing* (entubado interior), es la tubería que se utiliza para transportar los hidrocarburos desde la zona productora hasta la superficie, tal como se muestra en la **figura 4**.



**Figura 4.** Configuración general de las tuberías en un pozo de hidrocarburos. Modificado de Drillingformulas (2017).

Se debe tener en cuenta que ésta tubería va a estar sometida a múltiples esfuerzos (tensión y compresión) durante su instalación, cementación, durante la ejecución de las operaciones de fracturación hidráulica, la fase de producción y posproducción a lo largo de la vida útil del pozo, así que debe tener una resistencia mecánica mínima, así mismo debe ser resistente a la corrosión ya que estará en

contacto con diferentes fluidos, tanto operacionales (fluidos fracturantes), como formacionales (hidrocarburos, agua de formación) y salmueras.

Las rutas potenciales de migración de fluidos asociadas a la tubería de la construcción del pozo, se deben principalmente a las altas presiones a las que es sometida y la integridad

de la misma se puede ver comprometida ocasionando fallas y roturas y si éstas no se detectan o no se reparan, servirán de ruta de migración de fluidos hacia afuera del revestimiento. De igual manera, se puede presentar que el pozo atraviese una zona geológica estructuralmente débil que deforme el revestimiento (U.S. EPA, 2015). Otra causa para que el revestimiento falle se debe a la corrosión en las secciones no cementadas o en las uniones entre secciones del revestimiento (collares); de hecho, éstas secciones sin cementar son las que se encuentran más susceptibles de permitir migración de fluidos en el espacio anular existente entre el revestimiento y la formación, por ende, si esta sección sin cementar se extiende hasta los recursos de agua potable, puede haber migración hacia los acuíferos. En cualquier caso, la profundidad del revestimiento de superficie debe ser suficiente para abarcar la totalidad del acuífero.

#### *3.3.1.2 Cemento.*

El cemento es uno de los componentes principales del pozo ya que provee aislamiento zonificado y reduce los impactos potenciales en los recursos de agua potable; su función es reforzar la resistencia del revestimiento y protegerlo de la exposición a los fluidos de formación. La longitud y el emplazamiento del cemento varía con la presencia y ubicación de las formaciones sobre-presurizadas, formaciones con presencia de fluidos o

formaciones frágiles (por ejemplo, aquellas que son estructuralmente inestables, o aquellas que han sido sometidas a esfuerzos); se considera que esta cementación es fundamental ya que esto constituye la barrera principal para evitar la contaminación de los acuíferos.

La cementación por lo general se realiza mediante el bombeo de cemento desde el interior del revestimiento en el fondo del pozo hacia el espacio anular (el espacio comprendido entre el revestimiento y la formación).

Las posibles rutas de migración asociadas a la cementación, pueden ser producto de una construcción y/o diseño inadecuado (junto con sus respectivos problemas operacionales), o de una degradación del cemento con el tiempo (corrosión o formación de micro-canales o fisuras), y en caso de no detectarse o no repararse a tiempo, puede ocasionar el colapso del cemento durante las operaciones de fracturación hidráulica (U.S. EPA, 2015). El hecho de que exista una deficiencia en el aislamiento de zonas obtenido mediante la cementación, favorecerá la migración de gas de formación, el cual, debido a su baja densidad migrará hacia superficie y tendrá la posibilidad de entrar en otras formaciones (incluyendo acuíferos).

#### *3.3.1.3 Orientación.*

La orientación del pozo determinará la complejidad de las maniobras operativas para

su perforación, construcción y cementación. Existen tres tipos de orientaciones, en un pozo vertical la totalidad del pozo se construye verticalmente, desde superficie hasta la zona de producción; en un pozo desviado, se perfora verticalmente un segmento hasta un punto a partir del cual la distancia horizontal con respecto a la cabeza del pozo, se incrementa; y en un pozo horizontal, se inicia con un tramo vertical hasta el *Kickoff point*, que es el punto a partir del cual se construye horizontalmente, con una trayectoria paralela a la zona de producción objetivo. De acuerdo a la información reportada en EPA (U.S. EPA, 2015), la cantidad de pozos horizontales para fracturación hidráulica se ha incrementado, ya que en el 2003 solo el 4% de los pozos eran horizontales, y en el 2012 la cifra ascendía al 63.7%.

#### 3.3.1.4 Acondicionamiento o terminación.

El acondicionamiento o terminación de pozo es la manera en que se finaliza la fase de perforación del pozo a ser fracturado y se instalan los elementos de control de pozo en la zona de producción (tuberías y válvulas), y es un aspecto importante ya que incluye la instalación de un sistema de barreras que debe permanecer intacto para que sea totalmente funcional (U.S. EPA, 2015). Antes de dar inicio a las operaciones de fracturación hidráulica se realiza una serie de perforaciones que atraviesan el revestimiento junto al cemento hacia el interior de la zona de

producción y es allí donde se lleva a cabo la fracturación.

#### 3.3.2. Aspectos geológicos o formacionales

El fluido puede desplazarse a través de las fracturas inducidas u también por otras vías, propias de las formaciones. A pesar de que las operaciones de fracturación hidráulica están diseñadas para que las fracturas permanezcan dentro de la zona de producción, es posible que, durante la ejecución de dicha operación, las fracturas se propaguen más allá de la extensión de diseño. De acuerdo a U.S. EPA, 2015, existen cuatro escenarios asociados a las fracturas inducidas que pueden contribuir a la migración de fluidos con comunicación entre zonas:

- Movimiento de fluidos inyectados y/o desplazados a través de los espacios porosos en las formaciones rocosas fuera de la zona de producción debido a las diferencias de presión y al efecto de flotabilidad por diferencia de densidades.
- Fracturas que se extienden fuera de las formaciones productivas hacia las zonas donde se encuentran los recursos de agua potable.
- Fracturas que intersectan estructuras artificiales, incluyendo pozos abandonados o activos (comunicación de pozos) o minas.

- Fracturas que intersectan estructuras geológicas que pueden actuar como conductos, o vías de circulación de fluidos, tales como fallas y fracturas pre-existentes.

Las rutas de migración potenciales están dadas por el mecanismo de interacción entre las fracturas inducidas (durante el proceso de fracturación hidráulica) y las características de las formaciones geológicas involucradas; de tal forma que la migración potencial hacia los recursos de agua potable dependerá de estas rutas, el fluido inyectado, y los fluidos formacionales.

Últimamente se ha incrementado la preocupación sobre la presencia de gas en el agua, en zonas cercanas a bases de operaciones de fracturación hidráulica, como el caso del Noreste de Pennsylvania (*Jackson et al., 2013*), donde se analizaron 141 muestras de agua de pozos y se examinaron las concentraciones de gas natural y firmas isotópicas en áreas próximas a los pozos de *shale gas*; allí se encontró que la concentración de metano, etano y propano eran muy elevadas en las áreas más cercanas a dichos pozos y sugieren que en las viviendas situadas a una distancia inferior a 1km de los pozos presentan agua contaminada con gases errantes<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Los gases errantes hacen referencia a un fenómeno donde el gas natural (principalmente metano) migra hacia los recursos de agua potable someros, hacia pozos de agua o hacia la superficie. Este se puede originar a partir de reservorios de gas natural

Esta migración de gases es un fenómeno técnicamente muy complejo, debido a que hay muchas rutas potenciales de migración de gas hacia los acuíferos, ya sea por conductos naturales, o artificialmente creados, y es complicado determinar la fuente del gas natural y si la movilización está o no relacionada con las actividades de producción de hidrocarburos.

### 3.3.2.1. Generación y propagación de fracturas

Las fracturas se propagan en dirección del esfuerzo principal máximo, el cual es perpendicular a la dirección del esfuerzo principal mínimo. En profundidad, el esfuerzo principal ocurre por lo general (y en ausencia de esfuerzos tectónicos significativos) en dirección vertical debido a la carga litostática (la cual es originada por el peso de las rocas suprayacentes), mientras que el esfuerzo mínimo es tiene lugar el plano horizontal, de forma que la orientación principal de las fracturas se tenderá a ser vertical. En contraste, en las formaciones más someras la carga litostática es menor, por lo que la propagación de las fracturas tiende a darse de forma horizontal (*U.S. EPA, 2015*).

Adicionales a tales esfuerzos, existen otros factores que interfieren en la creación, la

---

convencional y no convencional, así como en minas de carbón, vertederos, fugas de gasoductos, entre otros.

geometría y la propagación de las fracturas; como son las características del reservorio y los factores operacionales. Tales factores adicionales pueden estar relacionados con la presión inicial del reservorio, su saturación, las características del fluido inyectado, la tasa de inyección, o la heterogeneidad de la formación, las propiedades geomecánicas, y la permeabilidad de la misma, entre otros (Kim y Moridis, 2015).

Para que exista migración de fluido debe existir una ruta, ya sea natural o inducida con suficiente permeabilidad para permitir el flujo, por lo que se expondrán las posibles rutas a continuación.

#### 3.3.2.2. *Flujo hacia afuera de la zona de producción*

Una de las rutas potenciales de migración de fluido desde la zona de producción hacia los recursos de agua potable es el movimiento de los fluidos inyectados (o el desplazamiento de los fluidos formacionales a causa de la inyección) a través de la matriz de la formación durante o después de las operaciones de fracturación hidráulica. Sin embargo, al tratarse de una zona de producción ubicada a gran profundidad, en formaciones geológicas principalmente de baja permeabilidad, se considera que ésta es una ruta de migración poco probable (Jackson *et al.*, 2013); a pesar de esto, hay poca información disponible con respecto al destino de los fluidos inyectados que no retornan a superficie o de los fluidos

formacionales desplazados en las áreas donde las operaciones de fracturación hidráulica se ejecutan en cercanías de los recursos de agua potable (U.S. EPA, 2015); Por otra parte, aunque el volumen del fluido (que potencialmente se puede perder dentro de la formación) es elevado, el movimiento del mismo está relativamente controlado y/o limitado por procesos de inhibición por las fuerzas de capilaridad y adsorción inherentes a los minerales de arcilla (Dutta *et al.*, 2014).

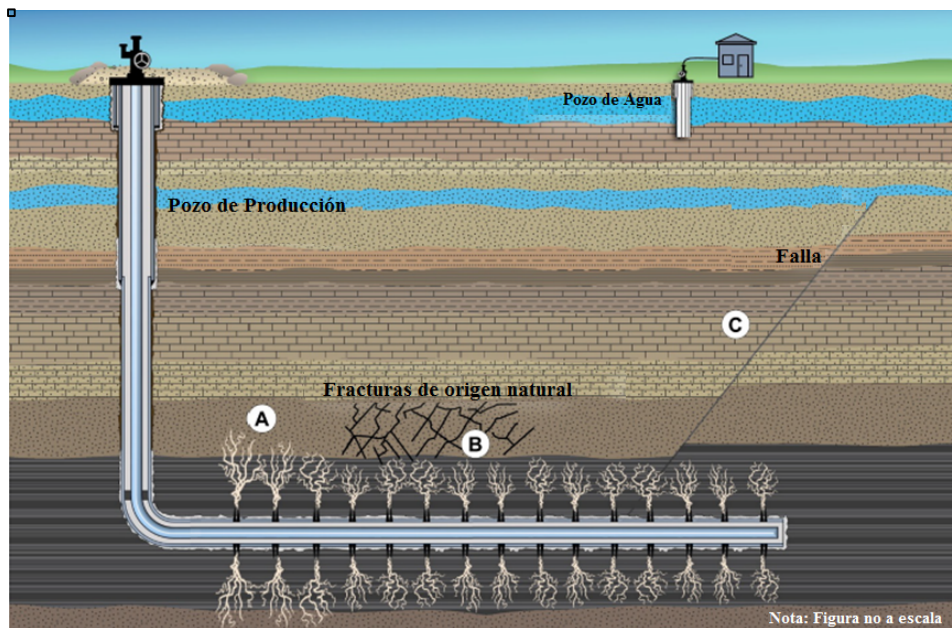
Algunos estudios (Myers, 2012; Flewelling y Sharma, 2014) indican que la migración de fluidos (inyectados o formacionales desplazados) puede ser posible en casos donde haya un gradiente hidráulico vertical significativo, permeabilidad suficiente y flotabilidad generada por diferencias de densidad (por ejemplo, en el caso del gas, se genera un flujo ascendente). Existen condiciones naturales que crean ese gradiente hidráulico ascendente en ausencia de cualquier efecto por fracturación hidráulica, sin embargo, las velocidades son demasiado bajas y adicionalmente gran parte del fluido quedará retenido en cercanías de la red de fracturas debido a la tensión capilar (Engelder, 2012). Las operaciones de fracturación hidráulica pueden favorecer la sobre-presurización en las inmediaciones de la actividad a gran escala, lo que podría generar este gradiente hidráulico ascendente y desencadenar la migración de fluidos (Myers, 2012), sin embargo no existen pruebas contundentes ni modelos que soporten

del todo éste planteamiento, además se esperaría que esa sobre-presurización localizada se vea contrarrestada por la despresurización ocasionada por la extracción de los hidrocarburos, conduciendo los fluidos principalmente por la red de fracturas generadas (Flewelling y Sharma, 2014).

Las fracturas que se extienden o propagan más allá de la zona de producción deseada, pueden representar rutas de migración de fluidos hacia los recursos de agua potable (Jackson *et al.*, 2013). Esta migración se puede dar a través de las fracturas mismas o por la conexión con otros rasgos geológicos permeables, lo cual es un escenario indeseado y puede ser resultado de una caracterización inadecuada del reservorio o del diseño de fracturas (Eisner *et*

*al.*, 2006). Adicionalmente, las fracturas generadas pueden interceptar fracturas naturales preexistentes (Figura 5) o pozos activos (o abandonados)

cercanos. Para predecir la geometría más ajustada de la red de fracturación generada por la inyección hidráulica, se necesita predecir el resultado de cada interacción entre fracturas naturales y fracturas inducidas hidráulicamente (Chuprakov *et al.*, 2013). El resultado de la interacción depende de los esfuerzos in situ, propiedades geomecánicas como la fricción y la cohesión, y las propiedades de permeabilidad de las fracturas naturales, así como también de las propiedades reológicas del fluido de inyección y de la velocidad de dicha inyección.



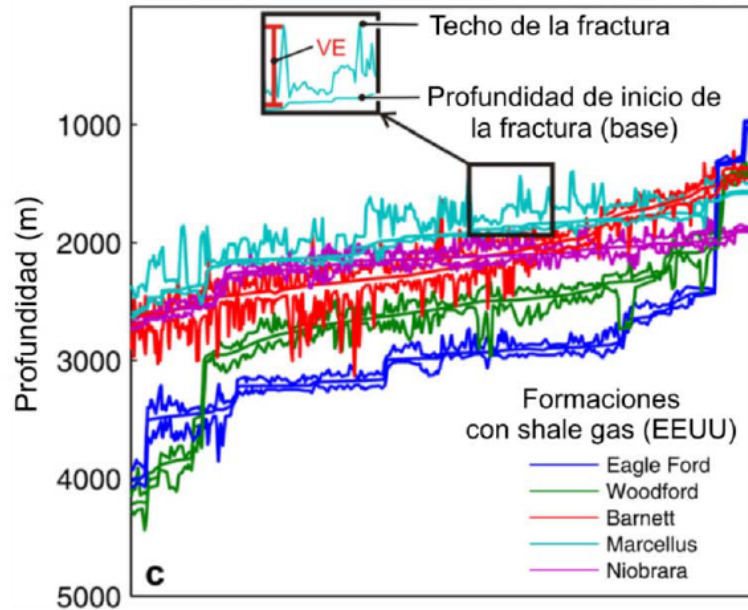
**Figura 5.** Rutas potenciales de migración de fluidos fuera de la zona de producción: (a) sobrecrecimiento de fracturas hacia las capas supra o infrayacentes, (b) fracturas inducidas intersectando fracturas naturales, (c) fracturas inducidas intersectando fallas. Modificado de U.S. EPA (2015).

La longitud vertical de las fracturas creadas durante las operaciones de fracturación hidráulica se ha medido en diferentes yacimientos en Estados Unidos utilizando microsísmica y técnicas de monitoreo de microdeformación de campo (Fisher y Warpinski, 2012). Estos datos indican longitudes verticales que se extienden desde decenas a cientos de metros, y se encontró que la longitud máxima era de 588 metros y que solo el 1% de las fracturas alcanzan longitudes superiores a los 350 metros. Los resultados sugieren que no siempre las fracturas generadas permanecen dentro de la zona de producción, como en el caso de algunas fracturas en el yacimiento de Marcellus, en EEUU, donde se encontraron longitudes hasta de 477 metros, cuando el máximo espesor de la formación es generalmente de 107 metros o menos (MCOR, 2012), sin embargo, en ese caso la mayoría de

las fracturas tenían menos de 100 metros de longitud, lo que indica una posibilidad limitada para el sobre-desarrollo de fracturas hacia los acuíferos someros (Davies et al, 2012).

Los estudios realizados por Fisher y Warpinski para la AAPG (Fisher y Warpinski, 2012) muestran que las fracturas hidráulicamente generadas están confinadas verticalmente mejor de lo que los modelos preexistentes predecían; realizó una cartografía a partir de extensas bases de datos y evidenció que incluso en áreas donde se registraban las mayores longitudes verticales de fracturas (como en Marcellus), las terminaciones de las fracturas están miles de metros por debajo de los acuíferos más profundos (**Figura 6**), por lo que éstas fracturas no tienen el potencial de alcanzar los recursos de agua potable y por consiguiente no podrían inducir a su contaminación o pérdida de la calidad.





**Figura 6.** Extensión vertical, longitud y profundidad de las fracturas por fracturación hidráulica en distintas formaciones productoras de shale gas en EE.UU. Modificado de Davies et al., (2012).

El movimiento de fluidos desde la zona de producción hacia los recursos de agua potable subterránea también puede ocurrir por la intersección de los pozos de producción con otros pozos en cercanías a las operaciones de fracturación hidráulica. Las fracturas generadas pueden intersectar pozos antiguos activos o inactivos (U.S. EPA, 2015) – incluyendo pozos de petróleo y gas, pozos de inyección o pozos de agua – lo que puede generar rutas de migración de fluidos. Se ha encontrado que los pozos más antiguos son más propensos a ser afectados negativamente por los esfuerzos aplicados durante la fracturación hidráulica.

### 3.4. Retorno de flujo y agua producida

El agua es un subproducto de la producción de petróleo y gas; una vez finalizada la

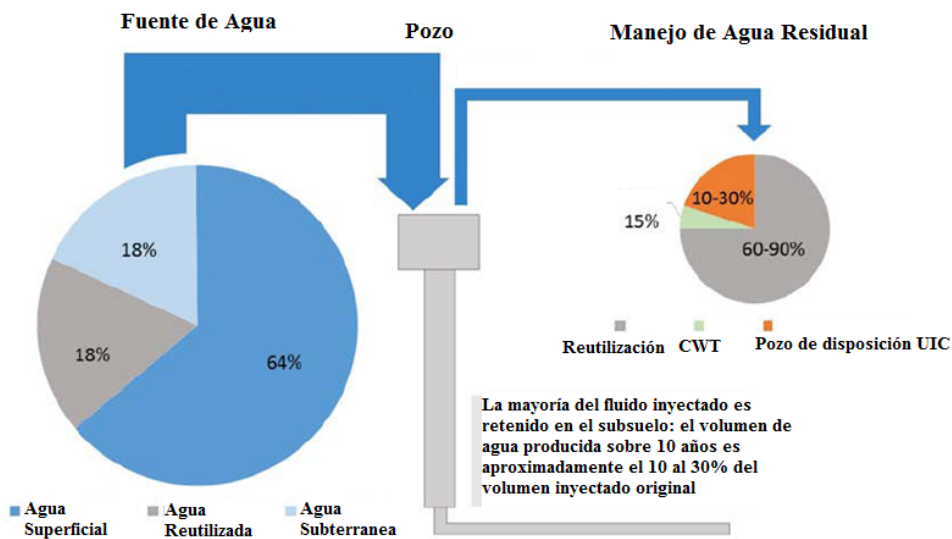
fracturación hidráulica, la presión de inyección es liberada y el agua fluye ascendiendo por el pozo. Inicialmente esta agua es similar al fluido fracturante, pero a medida que pasa el tiempo su composición se ve afectada por las características de las formaciones con las que interactúa y las posibles reacciones entre sí (U.S. EPA, 2015). Esta agua subproducto se denomina agua producida (API, 2010) y puede contener químicos inyectados como parte del fluido fracturante, químicos característicos de la formación, e hidrocarburos.

#### 3.4.1. Volumen de agua producida

La cantidad de agua producida varía, pero comúnmente se encuentra en un promedio entre el 10% y el 25% de los volúmenes inyectados (Figura 7). Sin embargo, hay

excepciones, por ejemplo, en Barnett Shale en Texas, donde el volumen total de agua producida puede igualar o exceder el volumen

inyectado durante la fracturación hidráulica (U.S. EPA, 2015).



**Figura 7.** Volumen de Agua inyectada Vs. Volumen de agua producida en Marcellus Shale, Pennsylvania, EEUU. Manejo de aguas residuales. Modificado de U.S. EPA (2015).

Por lo general, como se ha indicado, el fluido que retorna a superficie inicialmente consta de una mezcla del fluido fracturante inyectado, sus productos de transformación y agua de formación natural; en algunos casos el volumen de este retorno es superior al volumen inyectado a causa del agua adicional proveniente de la formación (Nicot *et al.*, 2014).

Los datos provenientes de 271 pozos en Marcellus Shale en West Virginia (Hansen *et al.*, 2013) evidencian la variabilidad de la recuperación (porcentaje de retorno) en pozos ubicados en la misma formación ya que se encontraron retornos de menos del 15% hasta retornos del 80%. De igual manera, la cantidad de agua producida varía de acuerdo al tiempo

transcurrido a partir de las operaciones de fracturación hidráulica, y ésta a su vez varía de formación a formación (U.S. EPA, 2015).

De acuerdo a Andrew *et al.*, 2017, el volumen medio estimado está entre 1.7 y 14.3 millones de litros de agua producida por pozo durante los primeros 5 a 10 años de producción; a partir de análisis de salinidad y cálculos de balance de masa estimaron que solo el 4 al 8% del agua que retorna a superficie está compuesta por fluido fracturante, mientras que el 92 al 96% restante se deriva de las salmueras de formación que son extraídas junto con los hidrocarburos producidos.

### 3.4.2. Composición del agua producida

El agua producida puede contener cierto rango de componentes, pero en proporciones ampliamente variadas (U.S. EPA, 2015); por lo general serán:

- a) **Sales:** en orden de abundancia relativa, los iones inorgánicos que se encuentran comúnmente en el agua producida son: sodio, cloruro, calcio, magnesio, sulfato, bromuro, estroncio, bicarbonato y yoduro (Lee y Neff, 2011).
- b) **Metales:** incluye bario, manganeso, hierro y estroncio, también puede contener niveles bajos de metales pesados como cromo, cobre, níquel, zinc, cadmio, plomo, arsénico y mercurio (Hayes, 2009).
- c) **Materiales radioactivos:** Los materiales radioactivos comúnmente presentes en los ambientes sedimentarios (lutitas y areniscas) incluyen uranio, torio, radio y sus productos de decaimiento, éstos se denominan Materiales Radiactivos de Origen Natural (NORM por sus siglas del término en inglés *Naturally Occurring Radioactive Materials*) y están presentes en la mayoría del agua producida (U.S. EPA, 2015).
- d) **Compuestos orgánicos:** pueden ser compuestos orgánicos volátiles como el benceno y el tolueno, compuestos orgánicos semi-volátiles como los fenoles o compuestos orgánicos no volátiles como la materia orgánica natural macromolecular (Hayes, 2009).

- e) **Productos de reacciones intra-formacionales:** se presenta por la interacción entre el fluido fracturante y la formación objetivo, y se da por procesos físicos y geoquímicos que pueden movilizar trazas o constituyentes mayores a la solución; por ejemplo los elementos potencialmente susceptibles a ser movilizados desde los materiales al ser expuestos por fracturación hidráulica son el calcio, magnesio, manganeso, estroncio, plata, cromo, cobre, molibdeno, niobio, vanadio, zinc y fracciones orgánicas; la exposición o liberación de dichos elementos es variable y no se ha estudiado del todo debido a la gran cantidad de interacciones posibles que pueden ocurrir en los diferentes ambientes (U.S. EPA, 2015) entre el material rocoso y el fluido fracturante, y la evolución de estas en el tiempo.

Se debe tener en cuenta que la caracterización química varía no solo entre formaciones, sino que de igual manera varía dependiendo el tiempo transcurrido con respecto al inicio de la fracturación hidráulica como se mencionó anteriormente, por esta razón se presenta una gran variabilidad en los datos reportados (U.S. EPA, 2015).

### 3.4.3. Manejo y disposición del agua producida y potencial de derrame

El agua producida se transporta generalmente desde la embocadura del pozo a través de una

serie de tuberías o líneas de flujo hasta las unidades de tratamiento o almacenamiento *in-situ* (GWPC e IOGCC, 2014); las conexiones defectuosas, fugas o rupturas en estos conductos puede resultar en derrames.

Los fluidos recuperados pueden ser transferidos a embalses superficiales para almacenamiento a largo plazo y evaporación; éstos también pueden tener derrames a causa de un diseño defectuoso y/o por eventos climáticas (U.S. EPA, 2015).

El agua producida que será tratada o cuya disposición se hará fuera del área de operaciones, es almacenada en tanques que posteriormente serán transportados por camiones; dichos tanques reciben el agua producida mediante tuberías que se interconectan entre si desde la embocadura del pozo (GWPC e IOGCC, 2014), por lo que los fallos en las conexiones durante el proceso de transferencia, o la avería en uno de los tanques de almacenamiento pueden implicar una liberación de fluidos en superficie (U.S. EPA, 2015).

Los derrames en superficie de agua producida en algunos casos han causado impactos en los recursos de agua potable; los fluidos liberados, de no ser contenidos *in-situ*, pueden fluir hacia fuentes de agua superficial cercanas o se pueden infiltrar hacia el agua subterránea por percolación a través del suelo (U.S. EPA, 2015). Las causas que se han identificado para estos derrames son: fallas o averías en los

equipos y contenedores, error humano, comunicación entre pozos, arremetidas<sup>2</sup>, fugas en tuberías y vertederos ilegales. La severidad del impacto ocasionado por dichos derrames dependerá del volumen, duración y composición, así como de la superficie topográfica, la localización de los recursos de agua potable y la ubicación de los pozos (USGS, 2017).

### **3.5. Tratamiento de aguas residuales y disposición de desechos**

La fracturación hidráulica genera grandes volúmenes de agua producida (con componentes potencialmente problemáticos desde el punto de vista ambiental) que requieren manejo; en este apartado se referirá al agua producida y a cualquier otra agua generada en el área de operaciones con el término de “agua residual”.

Las técnicas de tratamiento y disposición varían en cada región y con el tiempo, ya que a medida que la actividad de fracturación hidráulica va siendo más madura, los costos de las diferentes prácticas disposición pueden cambiar debido a factores como regulaciones, infraestructura disponible, factibilidad y costos de prácticas de reutilización, etc. (U.S. EPA, 2015).

---

<sup>2</sup> Una arremetida o *blowout* sucede cuando no se puede controlar en superficie el flujo de fluidos de formación.

Los impactos potenciales en los recursos de agua potable pueden ocurrir si el agua residual de fracturación hidráulica es tratada inadecuadamente y vertida en agua superficial. Así, el agua residual tratada inadecuadamente puede incrementar las concentraciones de sólidos disueltos totales (TDS), bromuros, cloruros y yoduros en las aguas receptoras. De igual forma, se puede encontrar radionucleidos, y componentes como bario, boro y metales pesados en las aguas tratadas inadecuadamente (U.S. EPA, 2015).

### 3.5.1. Volumen de agua residual por fracturación hidráulica

La cantidad de agua residual<sup>3</sup> generada en una región particular varía ampliamente dependiendo del volumen generado por pozo y del número de pozos presentes en el área. Estimar un volumen a nivel nacional (en Estados Unidos, por ejemplo) es difícil de obtener de manera confiable; por lo que la estimación anual puede variar de cientos de millones a billones de litros de agua residual generada por estado o región y por año. Sin embargo, se puede afirmar que el volumen de agua residual generado está directamente relacionado con el volumen de la producción de petróleo y gas; es decir, a medida que las operadoras incrementan la producción de

---

<sup>3</sup> El término “agua producida” corresponde al fluido que retorna a superficie tan pronto termina el proceso de fracturación hidráulica, mientras que el término “agua residual” corresponde al fluido fracturante y adicionalmente el fluido proveniente de las formaciones perforadas, los cuales retornan en conjunto a la superficie.

hidrocarburos, así mismo habrá un correspondiente incremento en los volúmenes de agua residual a ser manejados (U.S. EPA, 2015). En un estudio realizado en 2007 (Clark y Veil, 2009) se estimó que aproximadamente un millón de pozos activos de petróleo y gas en los Estados Unidos, generaban 9.1 billones de litros por día de agua residual; aunque no hay una manera confiable de estimar cual porción de este volumen total corresponde a pozos hidráulicamente fracturados.

### 3.5.2. Características del agua residual

Conocer las características del agua residual es importante para comprender los impactos potenciales en los recursos de agua potable, y su caracterización se debe tener en cuenta para el planeamiento del manejo y disposición final (U.S. EPA, 2015). Los componentes encontrados son:

- a) **Sólidos disueltos totales (TDS) e inorgánicos:** por lo general presentan valores elevados de TDS, especialmente aquellas aguas provenientes de lutitas y formaciones de arenisca apretada, con valores entre menos de 1.000 mg/L hasta cientos de miles de mg/L; principalmente de sodio y cloruros, también presenta concentraciones elevadas de bromuros, bicarbonatos, sulfatos, calcio, magnesio, bario, estroncio, radio y metales pesados (Chapman *et al*, 2012).
- b) **Orgánicos:** los compuestos orgánicos pueden variar con base en los aditivos

químicos utilizados y de la formación, pero generalmente constan de polímeros, grasas y aceites, compuestos orgánicos volátiles y compuestos orgánicos semi-volátiles; otros componentes detectados son alcoholes, naftaleno, acetona y disulfuro de carbono (U.S. EPA, 2015)

- c) **Radionucleidos:** Estudios reportados por Rowan et al, 2011 indican que el radio-226 y radio-228 son los radionucleidos predominantes en las aguas residuales de Marcellus Shale, cabe anotar que no hay mucha información acerca de estos compuestos en aguas residuales de otras formaciones, sin embargo, la información existente sobre materiales radioactivos de origen natural (NORM) en las formaciones, especialmente uranio y torio, puede indicar elevados niveles de radionucleidos en el agua producida, especialmente donde las concentraciones de sólidos disueltos (TDS) son igualmente elevadas (U.S. EPA, 2015).

### 3.5.3. Prácticas de manejo de aguas residuales

El agua residual proveniente de la fracturación hidráulica se maneja utilizando diferentes opciones (**Figura 8**), las cuales pueden ser: disposición en pozos UIC (Clase IID)<sup>4</sup>, estanques de evaporación, tratamiento en

---

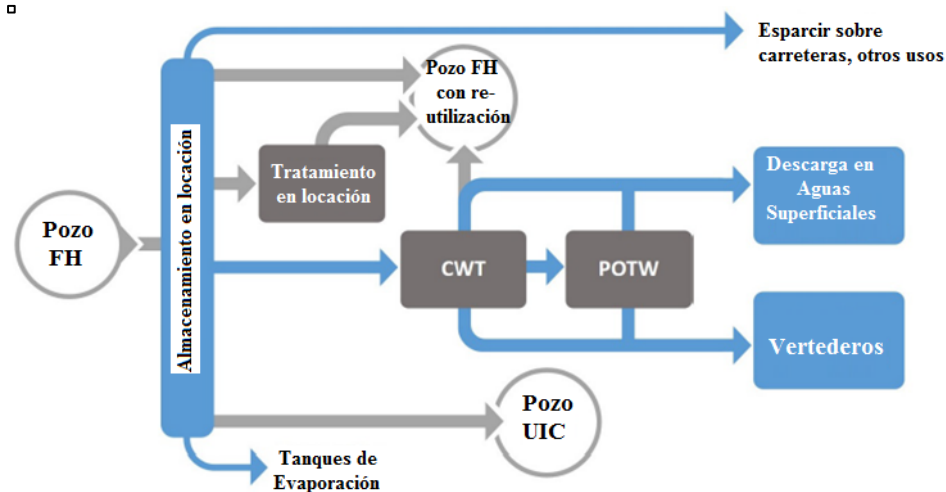
<sup>4</sup> Pozo de Control de Inyección Subterránea (UIC por sus siglas en inglés “Underground Injection Control”)

CWT<sup>5</sup>, reutilización o descarga ya sea hacia aguas superficiales o POTW<sup>6</sup>, reutilización con tratamiento mínimo o nulo, e irrigación (según normativa local) o esparcimiento en carreteras (U.S. EPA, 2015).

---

<sup>5</sup> Instalación centralizada de tratamiento de residuos (CWT por sus siglas en inglés “Centralized Waste Treatment Facility”)

<sup>6</sup> Obras Públicas de Tratamiento (POTW por sus siglas en inglés “Public Owned Treatment Works”)



**Figura 8.** Estrategias de manejo de Aguas residuales. Estrategias de manejo de Aguas residuales. CWT: Instalación centralizada de tratamiento de residuos; UIC: Pozo de control de inyección subterránea; POTW: Obras Públicas de Tratamiento. Modificado de U.S. EPA (2015).

Cada una de estas estrategias de manejo de aguas residuales tiene el potencial de implicar un impacto en los recursos de agua potable durante alguna fase de su ejecución; tales impactos pueden ser: liberaciones accidentales durante su transporte, descargas de aguas residuales tratadas de CWTs o POTWs donde el tratamiento de algunos componentes ha sido inadecuado, migración de ciertos elementos en aguas residuales que han sido utilizadas para irrigación, fugas en los tanques de almacenamiento o manejo inapropiado de componentes residuales (U.S. EPA, 2015).

La elección de la estrategia de manejo está influenciada por los costos (transporte, almacenamiento y disposición) y otros factores, tales como las propiedades del agua residual, el volumen, duración y tasa de flujo en la que se ésta es generada, la factibilidad logística de las

diversas opciones, la disponibilidad de la infraestructura necesaria, las regulaciones federales, estatales y locales, y por discreción de la operadora (U.S. GAO, 2012). De igual manera se ha visto un cambio a nivel regional a lo largo del tiempo, asociado al cambio en el desarrollo de la producción de hidrocarburos tal como se ve en la **Figura 9**, donde se evidencia un cambio en las prácticas de disposición en Pennsylvania durante los últimos años en Marcellus Shale (por ejemplo, la reutilización en la misma área de operaciones se ha incrementado) (U.S. EPA, 2015).

### 3.5.3.1. Inyección subterránea

En muchas partes de Estados Unidos se hace disposición de aguas residuales de fracturación

hidráulica por reinyección en el subsuelo mediante inyección con pozos profundos utilizando los pozos de disposición Clase II<sup>7</sup>; el programa UIC define los pozos Clase II como aquellos que inyectan fluidos asociados a la producción de hidrocarburos, principalmente salmueras. Estos pozos deben estar ubicados (acondicionados y terminados) en formaciones que estén aisladas de aguas subterráneas de calidad utilizable y sellados por encima y por debajo por formaciones rocosas impermeables (Price y Adams, 2016). Los criterios utilizados para identificar zonas adecuadas para la inyección de aguas residuales provenientes de fracturación hidráulica son:

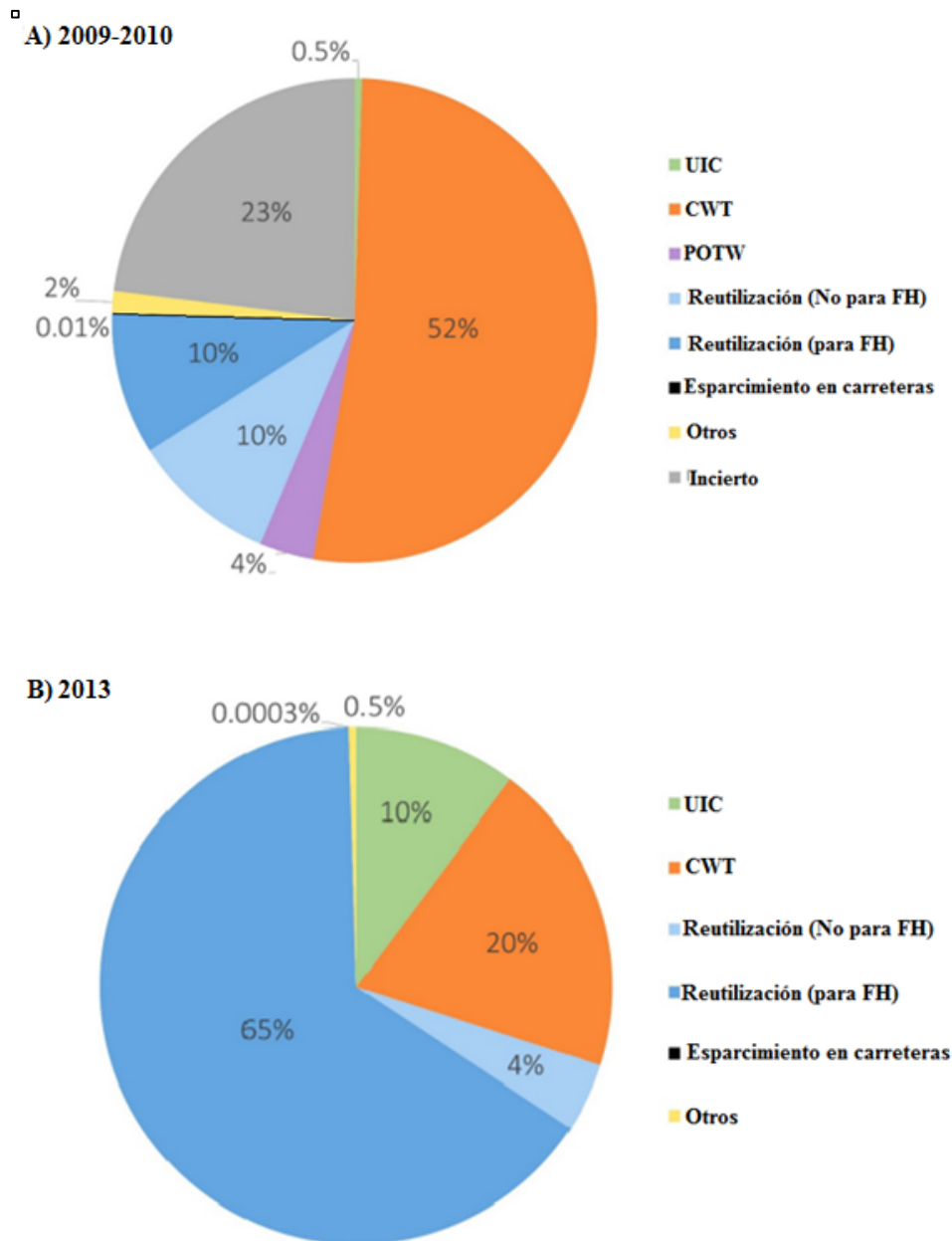
- La presencia de unidades confinantes de gran espesor ubicadas sobre las formaciones rocosas donde será inyectada el agua residual
- La presencia de una estructura geológica simple, libre de fallas o fracturas que puedan permitir la migración de fluidos desechados.
- La zona de inyección debe contener agua salada (no acuíferos de agua dulce)
- Debe estar situado en un área de bajo riesgo sísmico.

- Movimiento de agua subterránea insignificante o bajo en la zona de inyección.

---

<sup>7</sup> Los cuales son regulados bajo el programa de control de inyección, bajo la ley de seguridad del agua potable (SWDA por sus siglas en inglés *Safe Drinking Water Act* en EE.UU). Los pozos *Clase II* incluyen aquellos utilizados para recuperación mejorada (IIR), los de disposición de desechos (IID) y los de almacenamiento de hidrocarburos (IIH)





**Figura 9.** Cambio en las prácticas de disposición en Pennsylvania (en Marcellus Shale). Modificado de EPA 2015.

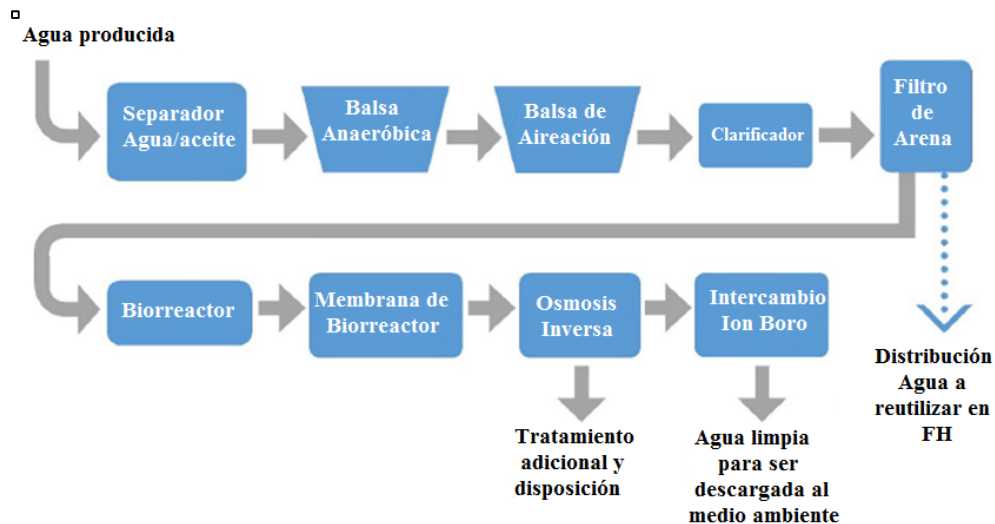
### 3.5.3.2. Instalación Centralizada de Tratamiento de Residuos (CWT)

La instalación centralizada de tratamiento de residuos (CWT) se define generalmente como aquella instalación que acepta materiales

industriales (peligrosos, no peligrosos, sólidos o líquidos) para tratamiento y/o recuperación (U.S. EPA, 2000). En la fracturación hidráulica, las CWT que aceptan aguas residuales ofrecen una variedad de tratamientos

y configuraciones, de igual manera, el destino del efluente tratado también varía y puede ser reutilizado en futuras operaciones de fracturación hidráulica, o llevado a descarga directa (a una fuente de agua superficial de acuerdo a las normativas de vertido vigentes), o a descarga indirecta (hacia una POTW) o una combinación de éstas (U.S. EPA, 2000). Así, de acuerdo con la calidad del agua deseada para cada destino, se requieren diversos tratamientos y se plantean diferentes configuraciones para cada tren de tratamiento

(combinación de procesos); la **Figura 10** muestra el esquema de las instalaciones del tratamiento en Anticlinal Pinedale (U.S. EPA, 2015), el cual incluye un pretratamiento para aceite disperso, compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y metales pesados, tratamiento avanzado para remoción de TDS, orgánicos disueltos y boro; ésta CWT puede descargar directamente en aguas superficiales o proveer el agua residual tratada a las compañías operadoras para su reutilización.



**Figura 10.** Esquema de las instalaciones del tratamiento en el Anticlinal Pinedale, EE.UU. Modificado de U.S. EPA (2015).

### 3.5.3.3. Reutilización de agua residual para fracturación hidráulica

La reutilización de agua en operaciones de fracturación hidráulica se ha incrementado en los últimos años, al poder ser reutilizada después de algún tipo de tratamiento (en ocasiones simplemente decantación), y

dependiendo de los requerimientos de calidad del agua a reutilizar (U.S. EPA, 2015).

La reutilización de aguas residuales de fracturación hidráulica reduce los costos asociados con otras formas de manejo de aguas residuales, así que por los beneficios económicos y la viabilidad de la reutilización

se esperaría que figure en las decisiones de manejo de aguas residuales; sin embargo, a pesar del beneficio económico derivado, esto puede representar una acumulación de sólidos disueltos totales (por ejemplo sales y TENORMs<sup>8</sup>), por lo que dichos residuos requerirán un manejo apropiado para evitar los impactos potenciales en los recursos de agua potable (U.S. EPA, 2015); además, la presencia de ciertos compuestos como por ejemplo el boro, el bario, el estroncio y el hierro, puede generar limitaciones operacionales debido a problemas de incrustaciones, taponamiento, reticulación no deseada al romper geles, entre otros, por lo que se podría ver afectado el rendimiento del fluido fracturante en las subsecuentes operaciones de fracturación hidráulica (Price y Adams, 2016).

#### 3.5.3.4. Evaporación

La evaporación es ampliamente practicada en áreas áridas, donde la tasa de evaporación excede la tasa de precipitación (Price y Adams, 2016). La tasa de evaporación depende de la calidad del agua, del tamaño, la profundidad y la localización del embalse y de factores ambientales tales como la humedad local, la temperatura, y el viento. La salmuera residual (o sólidos) pueden ser dispuestos en pozos de

---

<sup>8</sup> Por sus siglas en inglés *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials* (TENORM), corresponde a una serie de materiales, por lo general desechos industriales o subproductos enriquecidos con elementos naturales encontrados en el ambiente, tales como uranio, torio y potasio y cualquiera de sus productos de decaimiento tales como radio y radón.

inyección subterránea o vertederos (U.S. EPA, 2015). La desviación del agua residual de fracturación hidráulica hacia grandes embalses para evaporación se utiliza principalmente en el occidente de Estados Unidos y Australia; y a pesar de que ésta alternativa es efectiva para eliminar la fase líquida de las aguas residuales, puede acarrear inconvenientes significativos (Price y Adams, 2016); por ejemplo, se pueden generar impactos en los recursos de agua potable, si el embalse se rompe por condiciones climáticas extremas u otros factores que afecten la infraestructura del mismo, y si el agua derramada alcanza un cuerpo de agua superficial (U.S. EPA, 2015).

#### 3.5.3.5. Obras Públicas de Tratamiento (POTW)

Antes de que se generara el desarrollo de recursos no convencionales, las Obras Públicas de Tratamiento (POWT) se utilizaban para tratar las aguas residuales y otros residuos de las operaciones convencionales de hidrocarburos en algunos estados orientales de los Estados Unidos (U.S. EPA, 2015); la gran mayoría de tratamientos en las POTWs y las instalaciones de disposición de aguas residuales comerciales incluyen: tratamiento primario (desarenadores y clarificadores primarios para eliminación de sólidos en suspensión), tratamiento secundario (tratamiento biológico de fangos activados para la remoción de compuestos orgánicos y amoníaco) y desinfección. Algunos POTWs

también incluyen tratamiento terciario; sin embargo, las grandes cantidades de sales inorgánicas presentes en las aguas residuales provenientes de fracturación hidráulica son esencialmente diluidas y no removidas, y por esta razón, esta práctica ha sido prohibida en muchos estados en Estados Unidos (Price y Adams, 2016) o se regula el volumen pre-tratado y la calidad que puede ser aceptada por estas instalaciones (U.S. EPA, 2015).

#### *3.5.3.6. Otras prácticas de disposición final.*

Las estrategias adicionales para el manejo de las aguas residuales en algunos estados incluyen la descarga en aguas superficiales y aplicaciones sobre el terreno. Esparcir sobre las carreteras se utiliza para control de polvo o deshielo; esta práctica está regulada a nivel estatal y es prohibida en algunos estados debido a la presencia de elementos como bario, estroncio, y radio (U.S. EPA, 2015) y la posible contaminación por escorrentía en las aguas superficiales o la migración de las mismas hacia los acuíferos.

Otros usos potenciales documentados para las aguas residuales en la parte occidental de los Estados Unidos son, por ejemplo, riego para ganadería, irrigación, caudal suplementario, protección contra-incendios, y usos industriales, cada uno de los cuales con sus propios requerimientos de calidad y aplicabilidad (Guerra et al, 2011).

## **4. IMPLEMENTACIÓN DE LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA EN COLOMBIA**

### **4.1. Situación actual.**

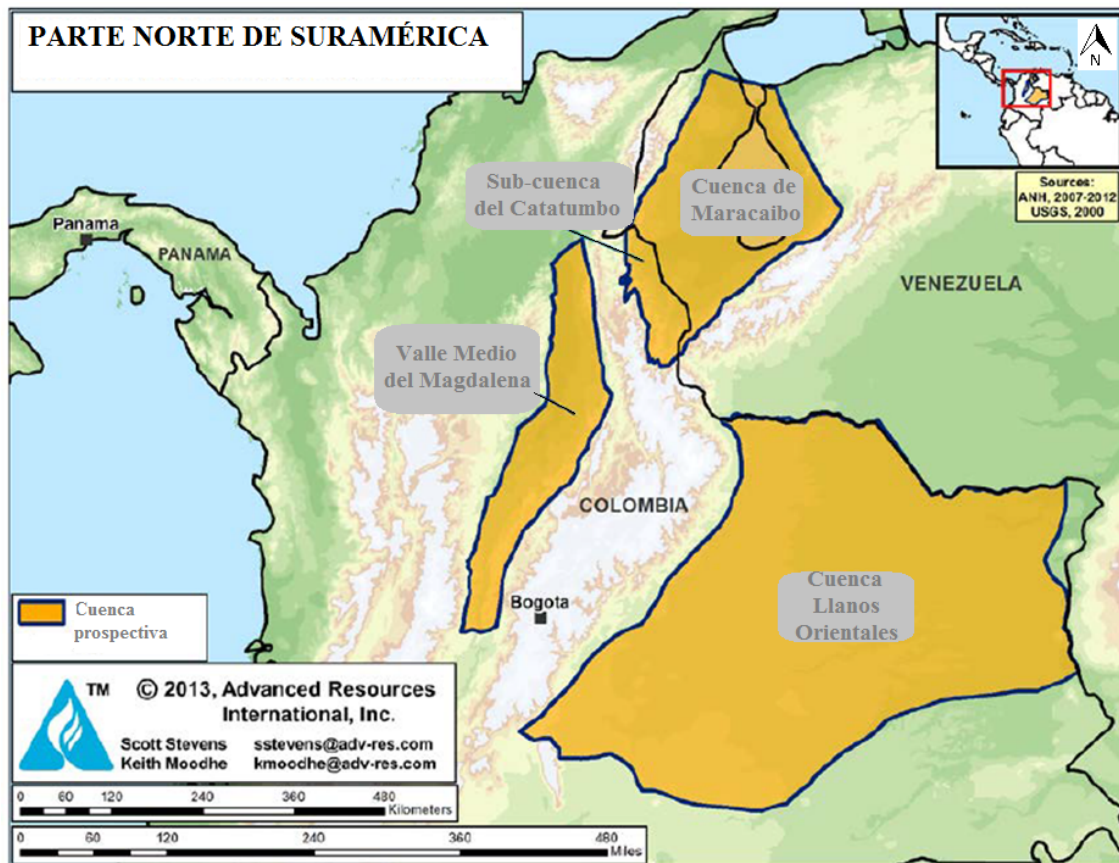
A nivel regional, en Sur América se encuentran grandes yacimientos no convencionales, dentro de los cuales resaltan los pertenecientes a Argentina, al poseer  $2.26 \cdot 10^{13} \text{ m}^3$  (801.5 *trillion cubic feet*) de recursos técnicamente recuperables de gas de lutita, y  $4.29 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  (27.0 *oil barrels*) técnicamente recuperables de petróleo según los datos proporcionados por la Agencia de Energía de Estados Unidos (EIA 2015); El yacimiento de gas de lutita de Vaca Muerta sería considerado uno de los mayores yacimientos fuera de América del Norte y situaría a Argentina entre los principales productores de hidrocarburos no convencionales durante las próximas décadas (Abellán, 2014). Igualmente, Brasil posee grandes reservas de gas de lutita y le siguen de cerca Venezuela, Paraguay y **Colombia** tal como se muestra en la **Tabla 1** (EIA 2015).

**Tabla 1.** Principales Reservas de Yacimientos No Convencionales en Latinoamérica. Elaboración propia a partir de datos reportados por EIA 2013

<b>País</b>	<b><i>Wet shale gas</i> (Gas Húmedo de Lutita) - m<sup>3</sup></b>	<b><i>Thigt oil</i> -m<sup>3</sup></b>
Argentina	2.26 X 10 <sup>13</sup>	4.29 X 10 <sup>9</sup>
Brasil	6.93 X 10 <sup>12</sup>	8.42 X 10 <sup>8</sup>
Venezuela	4.73 X 10 <sup>12</sup>	2.13 X 10 <sup>9</sup>
Paraguay	2.13 X 10 <sup>12</sup>	5.88 X 10 <sup>8</sup>
Colombia	1.54 X 10 <sup>12</sup>	1.08 X 10 <sup>9</sup>
Chile	1.37 X 10 <sup>12</sup>	3.65 X 10 <sup>8</sup>

En Colombia, los cinturones de roca productiva más conocidos (potencialmente prospectivos para operaciones de fracturación hidráulica) fueron depositadas en ambientes marinos en condiciones de poca circulación (anóxicas) y alta acumulación de materia orgánica (Vargas, 2012). Algunas de las formaciones presentes en las cuencas **Valle Medio del Magdalena, Llanos Orientales, Catatumbo**, Putumayo y Cesar-Ranchería, fueron depositadas durante el Cretácico, están asociadas a eventos que

favorecieron su enriquecimiento en materia orgánica, y son consideradas como las fuentes de hidrocarburos más prolíficas del país (West, 1996), siendo las tres primeras las principales zonas prospectivas para el estudio conducido por la EIA, 2015 como se muestra en la **Figura 11**; cabe resaltar que la Cuenca del Putumayo en la parte sur de Colombia, también tiene potencial de yacimientos no convencionales pero no ha sido estudiado por la escases de datos (EIA, 2015).



**Figura 11.** Cuencas prospectivas para Yacimientos No Convencionales en Colombia. Modificado de EIA (2015).

Desde el año 2012 la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) dio inicio a la adjudicación de diferentes áreas para llevar a cabo la exploración y producción de YNC y **Tabla 2.** Uno de los bloques más adelantados de YNC es el bloque VMM3 en la zona de San Martín (Cesar) de la operadora ConocoPhillips. Otra operadora con operaciones próximas a ejecutarse es Parex, con el bloque VMM9; se están realizando los estudios de impacto ambiental con el fin de armar el Plan de

actualmente se tienen 15 bloques adjudicados a las compañías operadoras como se observa en la

Manejo Ambiental (PMA); sin embargo, aún no ha sido avalada la licencia ambiental.

**Tabla 2.** Bloques adjudicados por la ANH para exploración y producción de YNC en Colombia. Elaboración Propia según los datos registrados en la ANH.

<b>Compañía Operadora</b>	<b>Bloque</b>	<b>Proceso de adjudicación</b>
<i>Exxon Mobil</i>	VMM2	Mini Ronda 2008
<i>Patriot</i>	VMM 37	Ronda Colombia 2010
<i>Ecopetrol - Exxon Mobil</i>	COR 62	Ronda Colombia 2012
<i>Ecopetrol - Exxon Mobil</i>	VMM 29	Ronda Colombia 2012
<i>Ecopetrol - Exxon Mobil</i>	COR 46	Ronda Colombia 2012
<i>Ecopetrol</i>	VMM 5	Ronda Colombia 2012
<i>Ecopetrol</i>	VMM 16	Ronda Colombia 2012
<i>Ecopetrol</i>	CAT 3	Ronda Colombia 2012
<i>Shell</i>	VMM 27	Ronda Colombia 2010
<i>Shell</i>	VMM 28	Ronda Colombia 2010
<i>ConocoPhilips</i>	VMM 3	Mini Ronda 2008
<i>Nexen</i>	Barbosa	Contratación directa
<i>Nexen</i>	Chiquinquira	Contratación directa
<i>Canacol Energy</i>	Santa Isabel	Contratación directa
<i>Parex</i>	VMM 9	Ronda Colombia 2014

Los bloques anteriormente mencionados se encuentran ubicados en cuencas sedimentarias que cuentan con los ecosistemas biológicos más diversos del mundo y con gran potencial hídrico –como el Caribe, el Pacífico, los Andes, la Orinoquía y el Amazonas- lo que representa una alta sensibilidad ambiental que se debe tener en cuenta en las actividades de exploración y producción de recursos energéticos con el fin de velar por la preservación del entorno natural (Borbón, 2015). Varias cuencas limitan con áreas donde se encuentran parques nacionales<sup>9</sup> y reservas,

por lo que las actividades de exploración y producción (E&P) que puedan afectar a estos parques probablemente influirán indirectamente en la sensibilidad ambiental de la cuenca (UPME, 2012) y en consecuencia, se evidencia una amplia necesidad de aumentar el conocimiento del impacto potencial de las actividades de E&P tanto de los recursos convencionales como los no convencionales (susceptibles a ser explotados por fracturación hidráulica).

Por lo anterior, actualmente se está realizando una evaluación de la sensibilidad ambiental en

<sup>9</sup> Colombia tiene 56 áreas que conforman el Sistema de Parques Nacionales, ocupando el 9.98% del territorio terrestre y el 1.30% del territorio marino con un área total de 12.602.321 hectáreas, las cuales

han sido excluidas de las áreas prospectivas en el momento del cálculo de las reservas.

cada una de las cuencas incluyendo (UPME, 2012):

- Parques nacionales/regionales, áreas naturales, bosques, comunidades indígenas, santuarios y áreas privadas para la conservación.
- Recursos acuíferos (humedales, pantanos, reservorios de agua y lagos, ríos y sus principales afluentes).
- Biodiversidad de flora y fauna.
- Área de acción de ONGs e instituciones gubernamentales focalizadas en el mantenimiento de la biodiversidad.
- Regulación ambiental

Así mismo, en enero del 2014 la ANH firmó un convenio con la SCG (Sociedad Colombiana de Geología) para recopilar información relacionada a la sismicidad y la geología estructural en las zonas de los 43 bloques destinados a yacimientos no convencionales (Portafolio, 2017), con el fin de consolidar una línea base de conocimiento para ejecutar operaciones de fracturación hidráulica con el menor impacto ambiental posible.

Actualmente la *Resolución 90341 del Ministerio de Minas y Energía* (MME, 2014) contiene los lineamientos técnicos para la aplicación del fracking en territorio colombiano y ya han sido emitidos los *Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para Proyectos de Perforación Exploratoria de Hidrocarburos en Yacimientos no*

*Convencionales*, estipulado en el *Anexo No. 3* del documento *Términos de Referencia* (MME, 2014; MADS y ANLA, 2014).

#### **4.2. Factores a considerar para la implementación de la Fracturación Hidráulica en el territorio colombiano.**

Países como Estados Unidos, han avanzado considerablemente en la identificación de los principales impactos negativos que se pueden generar al emplear Fracturación Hidráulica en la fase de explotación de YNC como se mencionó en los apartados anteriores; mientras que en Colombia, la generación de conocimiento geoambiental es aún muy deficiente y no se cuenta con la suficiente información que permita hacer seguimiento y mitigar los posibles impactos que conllevan las diferentes fases de dicha operación.

En los talleres con expertos que se han realizado por la ANH durante las Rondas Colombia 2012 y 2014 han surgido una serie de consideraciones que se deben tomar en cuenta para la implementación de las prácticas de Fracturación Hidráulica en el territorio Colombiano, las cuales han servido de base para establecer los términos de referencia y la normativa base, sin embargo, la Contraloría General de la República (CGR), grupos de investigación geoambientales como Terrae, y diferentes ponentes como Fierro (Fierro, 2013) han expuesto algunos aspectos que presentan falencias y/o debilidades que deberían



reforzarse para regular dicha actividad, dentro de los cuales cabe resaltar los siguientes:

- a) **Cartografía y consolidación de información técnica:** Desde su fundación, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha levantado la cartografía geológica a diversas escalas, con una cobertura actual del 100% del área cartografiable del país. Sin embargo, *no toda esta área cumple con los estándares de esta escala de trabajo (1:100.000) y tiene vacíos de información geológica* que obligan a hacer planes de revisión y complementación (SGC, 2014). Cabe resaltar de que a pesar de que se han planteado convenios con el SGC y Colciencias para promover la generación del conocimiento geológico y ambiental de las regiones del país con potencial para el desarrollo de actividades de exploración y explotación de YNC, aún no se han finalizado ni se han obtenido los productos técnicos y científicos base (Fierro, 2013). Lo cual implica que las entidades competentes -Ministerio de Minas y Energía (MME), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y Autoridad de Licencias Ambientales (ANLA)- a la fecha *no cuentan con suficiente información geológica propia sobre aguas subterráneas, neotectónica y sobre los ecosistemas potencialmente afectables por las técnicas de Fracturación Hidráulica.*

De acuerdo al Informe de actuación especial emitido por la Contraloría General de la República (CGR, 2014), haciendo referencia al *Principio de Precaución y Desarrollo Sostenible*, se estima que en Colombia **no se cuenta con las líneas base ambientales** previas al inicio de las operaciones de explotación; lo cual podría impedir o limitar el control y seguimiento de tipo ambiental.

- b) **Información hidrogeológica:** En 1977, Ingeominas publicó el primer Mapa hidrogeológico a nivel nacional a escala 1:3.000.000, y en 1994 el Departamento Nacional de Planeación publicó el Mapa Hidrogeológico General de Colombia, en planchas 1:500.000. En 1989, Ingeominas elaboró el Mapa Hidrogeológico de Colombia a escala 1:2.500.000 y siete años después inició la elaboración del Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia (escala 1:500.000), el cual tiene una *cobertura aproximada del 30 % del territorio nacional*, correspondiente a ocho de las 26 hojas a escala 1:500.000 (SGC, 2014).

“A pesar de algunos esfuerzos realizados con el fin de conocer el potencial de aguas subterráneas del país, el Estado no ha logrado tener los avances requeridos por los diferentes actores socioeconómicos que demandan el conocimiento del recurso hídrico subterráneo para la toma de decisiones de los respectivos sectores. La

falta de información y conocimiento pueden deberse a la insuficiencia de profesionales competentes (calificados y con experiencia) en el tema de aguas subterráneas, falta de inversión, incapacidad para articular un programa de investigación a largo plazo, entre otras causas, produciendo un pasivo en la información generada en las últimas décadas” (SGC, 2014)

c) **Regulación y normativa:** A partir del 2012 se ha iniciado con la adjudicación de bloques por parte de la ANH y así mismo se ha ido desarrollando la reglamentación de las prácticas de fracturación hidráulica mediante talleres con expertos, convenios de gestión de conocimiento, contratación de consultores y expertos internacionales, entre otros mecanismos; en el *Anexo No.1* se relacionan los diferentes actos administrativos emitidos por los órganos creadores y aplicadores de normas para la exploración y explotación de YNC en el territorio Colombiano.

A la fecha, los lineamientos técnicos para la aplicación la Fracturación Hidráulica en territorio colombiano están especificados en la Resolución No. 90341 del 27 de marzo de 2014; sin embargo, una vez evaluada dicha documentación por parte de la Contraloría General de la República (CGR), se presentaron algunas observaciones que podrían representar vulnerabilidad medioambiental de acuerdo

al *principio de precaución* que debe manejarse; tales observaciones y/o hallazgos son los siguientes (CGR, 2014):

- No refleja criterios de prevención y precaución, evidenciados por la **falta de información y conocimiento específico** en materia a la explotación de YNC.
- Aborda la generación de la línea base ambiental en aspectos como hidrogeología y sismo-tectónica de una manera general, a escalas inadecuadas y mapas que datan de 1977 y 1989, lo cual **no permite realizar un adecuado control frente a posibles daños ambientales asociados por la explotación de YNC.**
- La información técnica que sirvió como soporte para la generación de la Resolución, se soportó fundamentalmente en el conocimiento de condiciones geológicas y campos de producción de extracción de YNC localizados en otros países, es decir **no consideraron las condiciones del medio ambiente colombiano.**
- La resolución **no incluye la obligación para las operadoras**, que van a desarrollar proyectos de exploración y producción de YNC, de **presentación de informes sobre la extracción del hidrocarburo ni las captaciones de agua** para este tipo de explotaciones.
- En el área de hidrogeología requieren mapas en escala 1:25.000 o mayor, por lo que los **acuíferos locales no son**

**caracterizados.** Adicionalmente “**No existen requerimientos de caracterización de fracturas** en las eventuales unidades hidrogeológicas que pudieren ser afectadas, a pesar de que este es uno de los ítems identificados como claves en los talleres realizados por las instituciones de gobierno **ni información de manantiales o pozos**”.

- Existe un documento de términos de referencia de los Estudios de Impacto Ambiental para la perforación exploratoria de YNC (MADS y ANLA, 2014), **pero no existen términos de referencia** para la elaboración de estudios ambientales previos ni la normativa ambiental que defina el marco de la licencia ambiental **específica en la fase de explotación de YNC**, teniendo en cuenta las particularidades de este tipo de explotación en cuanto a riesgos ambientales, uso de recursos naturales, en especial del recurso agua, afectación a formaciones geológicas en el subsuelo por la fracturación secundaria, contaminación de aguas superficiales y subterráneas, generación y disposición final de residuos peligrosos en el proceso, generación de sismicidad y riesgos por reactivación de zonas tectónica activas, reinyección de aguas contaminadas o no tratadas en el subsuelo.

## 5. CONCLUSIONES

La explotación de recursos de petróleo y gas - ya sean convencionales o no convencionales- presenta riesgos medioambientales inherentes; en el caso de los YNC, cuya extracción depende de las técnicas de fracturación hidráulica, se encuentra un mayor potencial de impacto ambiental, en especial, la posible afección a los recursos de agua potable; esto se debe a los grandes volúmenes de agua requerida, a las características y las propiedades físico-químicas de los compuestos utilizados para la elaboración del fluido fracturante, a los riesgos asociados a los derrames que se puedan presentar en las diferentes etapas de desarrollo de dicha técnica, a los factores propiamente operacionales (magnitud de la operación, diseño de los pozos, ubicación, geología de la zona, etapas a desarrollar de fracturación hidráulica, mezcla química específica, condiciones de emplazamiento e integridad del revestimiento, calidad de la cementación, idoneidad de los materiales utilizados, etc.), al manejo de aguas residuales y a la necesidad de mecanismos de control y seguimiento especializados. Adicionalmente, cabe resaltar que el riesgo asociado con el desarrollo de fracturación hidráulica para YCN es indeterminado, en parte, debido a que en los estudios evaluados hasta la fecha no se han tenido en cuenta los efectos potenciales a largo plazo, es decir, los efectos acumulativos.

Se ha mostrado que el volumen de agua requerido para ejecutar las operaciones de fracturación hidráulica es elevado, y se ha generado preocupación por el tema de esta gran demanda; sin embargo, de acuerdo a la información consultada, el consumo de agua como tal no afecta la cantidad de los recursos de agua potable, sino que el impacto corresponde a la combinación del consumo de agua y la disponibilidad del agua a escalas locales; por lo que se espera un mayor impacto en áreas propensas a sequías o con recarga limitada. En este aspecto la gestión eficaz del agua puede ser fundamental para mediar la dinámica entre uso y disponibilidad. Adicionalmente, tal como se ha mostrado durante el desarrollo del tema, las técnicas del manejo de las aguas residuales provenientes de la fracturación hidráulica han ido cambiando a medida que evoluciona la industria, y cada vez se emplea más la reutilización (cuando las condiciones lo permiten). Se podría sugerir que, si se incentiva la reutilización como mecanismo principal de disposición de aguas residuales provenientes de fracturación hidráulica (o de otras industrias), se fomentaría la optimización de las instalaciones de tratamiento de estas aguas, se podría reducir en parte la demanda de agua dulce y se disminuiría proporcionalmente el volumen de agua para disposición final (ya sea inyección en pozos, vertederos o descargas en aguas superficiales), lo que se reflejaría en una atenuación del impacto potencial.

La fracturación hidráulica de yacimientos no convencionales supone un riesgo a la calidad del recurso hídrico por contaminación del agua superficial y/o subterránea, en gran medida por los derrames, fugas y vertidos (del agua producida o del fluido fracturante, o de los químicos que lo componen). Estos derrames y fugas se pueden producir en cualquiera de las fases que se llevan a cabo durante la fracturación hidráulica, y a diferentes escalas, por lo que su impacto depende del tipo de fuga o derrame, de la toxicidad de los químicos involucrados, el volumen derramado y los planes de contingencia existentes. Teniendo en cuenta que a lo largo de la ejecución de la actividad se presentan diversos mecanismos que pueden dar origen a la contaminación o afección a los recursos de agua potable (asociados a los derrames), lograr asociar la contaminación a una causa específica requiere una gran cantidad de datos, los cuales deben ser obtenidos antes y después de las operaciones de fracturación hidráulica, para poder apreciar los cambios relativos de la calidad del agua a raíz de los derrames. Desafortunadamente, en la mayoría de los casos donde se detecta una contaminación del agua por estas operaciones, la información es insuficiente; por lo que se resalta la importancia de la obtención de datos pre y post-operaciones en cuanto a la caracterización de los cuerpos de agua y la calidad de la misma, para poder realizar un seguimiento efectivo, y tomar las medidas preventivas o de

contingencia más adecuadas que permitan mitigar la severidad los impactos en caso de presentarse un derrame, vertido, o fuga de fluido . De igual manera, se debe tener en cuenta que aunque no se registren cambios en los parámetros de calidad de los cuerpos de agua (acuíferos por ejemplo) inmediatamente después de los eventos de derrames o fugas, esto no significa que no se vaya a presentar contaminación, ya que ésta se puede manifestar años después dependiendo de las propiedades del terreno; por lo que se sugiere una continuidad temporal prolongada en los estudios que se realicen en las áreas susceptibles de sufrir los impactos a causa de derrames.

El desarrollo de la fracturación hidráulica en el territorio colombiano es inminente ya que cuenta con áreas prospectivas de gran interés y con esta técnica se favorecería un incremento considerable en las reservas del país. En los últimos años se han venido desarrollando las diferentes medidas de regulación, como los términos de referencia para la elaboración de estudios de impacto ambiental, las especificaciones técnicas operacionales, y las normativas ambientales aplicables a la explotación de YNC; simultáneamente se han adjudicado algunos bloques con contrato de exploración y producción mientras se continúa con la optimización de los mecanismos de control para la explotación de estos recursos. Sin embargo, se ha evidenciado que el país no tiene una línea base geo-ambiental de

conocimiento que sirva para establecer las directrices adecuadas para la implementación de la fracturación hidráulica (bajo el principio de prevención), ya que se presentan inconsistencias en la información técnica disponible sobre hidrogeología, tectónica activa, geología detallada a nivel local, identificación y caracterización de ecosistemas de las áreas a ser intervenidas mediante esta técnica.

Los datos existentes sobre la fracturación hidráulica son provenientes de estudios que no han sido realizados en el territorio colombiano (principalmente son de origen norteamericano), y sumado a la inconsistencia de la información propia disponible, se estima que Colombia aún no se encuentra preparada para la ejecución de operaciones de fracturación hidráulica ya que el desconocimiento y los vacíos o ambigüedades existentes en las normativas vigentes, incrementan la severidad de los posibles impactos ambientales, especialmente la afección a los recursos de agua potable, en las áreas donde se desarrolle dicha actividad. Por lo que se recomienda fortalecer el conocimiento técnico en las zonas susceptibles de ser explotadas con esta técnica, porque de acuerdo a la amplitud de dicho conocimiento, se podrán establecer mecanismos de regulación efectivos que procuren garantizar la protección de los recursos naturales, en especial del recurso hídrico; de igual manera se sugiere continuar con los talleres de expertos (nacionales e internacionales), no extrapolando

los hallazgos de otros países, sino procurando generar estudios con resultados propios de acuerdo a las particularidades geo-ambientales del país; así mismo se sugiere empezar por regulaciones simples, y buscar un mejoramiento continuo a medida que avancen los conocimientos de la operación y de los impactos, y con esto ir ajustando la normativa existente con el fin de velar siempre por la protección de los recursos naturales.

En resumen:

- Aunque la explotación hidrocarburos (ya sean convencionales o no convencionales) presenta riesgos medioambientales inherentes al desarrollo de las prácticas operacionales, el riesgo asociado a la fracturación hidráulica para la explotación de yacimientos no convencionales es elevado debido a una mayor magnitud y complejidad de las operaciones.
- El consumo de agua de por sí, no tiene por qué afectar a la disponibilidad global de los recursos de agua potable; el impacto dependerá del balance entre consumo de agua y la disponibilidad del agua que se debe evaluar a escalas locales.
- La gestión eficaz del agua puede ser fundamental para modular la dinámica entre uso y disponibilidad y mitigar los posibles impactos sobre los recursos de agua potable.
- Se sugiere sustituir (en la medida de lo posible) el uso agua dulce para las

operaciones de fracturación hidráulica, procurando fomentar e incentivar la reutilización de agua como fuente de la base fluida del fluido fracturante.

- La fracturación hidráulica supone un riesgo a la calidad del recurso hídrico por contaminación del agua superficial y/o subterránea, en gran medida por derrames, fugas y vertidos; por lo que se deben establecer medidas de contingencia rigurosas durante el desarrollo de la actividad.
- Se requiere una continuidad temporal prolongada de los estudios que se realicen en las áreas susceptibles de sufrir impactos a causa de derrames, fugas y vertidos.
- Resulta imperativo la obtención datos pre y post-operaciones en cuanto a la caracterización de los cuerpos de agua y la calidad de la misma, para poder realizar un seguimiento efectivo, y tomar las medidas preventivas o de contingencia más adecuadas que permitan mitigar la severidad los impactos en caso de producirse contaminación.
- Se recomienda fortalecer el conocimiento técnico en las zonas susceptibles de ser explotadas con esta técnica en el territorio colombiano, procurando generar estudios con resultados propios de acuerdo a las particularidades geo-ambientales del país.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Abellán, A. (2014). Recursos No Convencionales Susceptibles de Ser Explotados Mediante Fracking; Trabajo fin de grado en Ciencias Ambientales. Facultad de Biología, Universidad de Murcia.
- American Petroleum Institute - API, (2010). Water management associated with hydraulic fracturing. Washington, D.C.: API Publishing Services.
- Andrew J. Kondash, Elizabeth Albright, Avner Vengosh, (2017). Quantity of flowback and produced waters from unconventional oil and gas exploration, *Science of The Total Environment*, vol 574, p 314-321.
- Borbón, C. (2015). Identificación de los posibles impactos ambientales por el fracturamiento hidráulico (fracking) de yacimientos no convencionales, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá D.C.
- Contraloría General de la República - CGR, (2014). Principio de Precaución y Desarrollo Sostenible, posibles riesgos Hidrocarburos No Convencionales, Informe de actuación especial AT No. 31 Seguimiento función de advertencia, Bogotá, D.C.
- Chapman, EC; Capo, RC; Stewart, BW; Kirby, CS; Hammack, RW; Schroeder, KT; Edenborn, HM, (2012). Geochemical and strontium isotope characterization of produced waters from Marcellus Shale natural gas extraction. *Environmental Science and Technology*, vol 46, p 3545-3553.
- Chuprakov, D; Melchaeva, O; Prioul, R., (2013). Hydraulic Fracture Propagation Across a Weak Discontinuity Controlled by Fluid Injection, Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing, Dr. Rob Jeffrey (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/55941.
- Clark, CE; Veil, JA., (2009). Produced water volumes and management practices in the United States.: Argonne National Laboratory, Argonne, IL, (ANL/EVS/R-09/1) (pp. 64).
- Davies, RJ; Mathias, SA; Moss, J; Hustoft, S; Newport, L., (2012). Hydraulic fractures: ¿How far can they go? *Marine and Petroleum Geology*, vol 37, pp 1-6.
- DrillingFormulas. Basic Understanding of Oil Well Casing and Tubing. En: <http://www.drillingformulas.com/basic-understanding-of-oil-well-casing-and-tubing/> . Consultado en Mayo de 2017.
- Dutta, R; Lee, C, -H; Odumabo, S; Ye, P; Walker, SC; Karpyn, ZT; Ayala, LF., (2014). Experimental investigation of fracturing-fluid migration caused by spontaneous imbibition in fractured low-permeability sands. *SPE Reservoir*

- Evaluation & Engineering, vol 17, pp 74-81.
- EIA, Energy Information Administration, (2015). Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States. Energy Information Administration. 2015. En: <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/> consultado en abril de 2017.
- Eisner, L; Fischer, T; Le Calvez, JH., (2006). Detection of repeated hydraulic fracturing (out-of-zone growth) by microseismic monitoring. The Leading Edge, Tulsa, vol 25, p 548-554.
- Engelder, T., (2012). Capillary tension and imbibition sequester frack fluid in Marcellus gas shale [Letter]. PNAS 109: E3625.
- Fierro, J. (2013). Riesgos e Incertidumbres del Fracturamiento Hidráulico de Yacimientos No Convencionales. Ponencia en los Talleres con expertos de la ANH, Bogotá, D.C.
- Fisher, M; Warpinski, N., (2013). Hydraulic fracture height growth: Real data. S P E Production & Operations ISSN: 1930-1855, vol 27, pp 8-19.
- Flewelling, SA; Sharma, M., (2014). Constraints on upward migration of hydraulic fracturing fluid and brine. Ground Water, vol 52, pp 9-19.
- FracFocus, Ground Water Protection Council and Interstate Oil and Gas Compact Commission, Chemical Disclosure Registry. En: [www.fracfocus.org](http://www.fracfocus.org), consultada en febrero de 2017.
- GWPC and IOGCC, Ground Water Protection Council and Interstate Oil and Gas Compact Commission. Fracturing fluid management. <http://fracfocus.org/hydraulic-fracturing-how-it-works/drilling-risks-safeguards> Consultada en enero de 2017.
- Guerra, K; Dahm, K; Dundorf, S., (2011). Oil and gas produced water management and beneficial use in the western United States. (Science and Technology Program Report No. 157). Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver, CO, U.S.
- Hansen, E; Mulvaney, D; Betcher, M., (2013). Water resource reporting and water footprint from Marcellus Shale development in West Virginia and Pennsylvania. Earthworks Oil & Gas Accountability Project. Durango, CO, U.S.
- Hayes, T., (2009). Sampling and analysis of water streams associated with the development of Marcellus shale gas. Des Plaines, IL: Marcellus Shale Coalition.
- Interstate Oil and Gas Compact Commission – IOGCC, (2008). Protecting our



- country's resources: The states' case, orphaned well plugging initiative. Oklahoma City, U.S.
- Jackson, RB; Vengosh, A; Darrah, TH; Warner, NR; Down, A; Poreda, RJ; Osborn, SG; Zhao, K; Karr, JD., (2013). Increased stray gas abundance in a subset of drinking water wells near Marcellus shale gas extraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110: 11250-11255.
- Jackson, RE; Gorody, AW; Mayer, B; Roy, JW; Ryan, MC; Van Stempvoort, DR., (2013). Groundwater protection and unconventional gas extraction: the critical need for field-based hydrogeological research, vol 51, is 4, pp 488-510.
- Kim, J; Moridis, GJ., (2015). Numerical analysis of fracture propagation during hydraulic fracturing operations in shale gas systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol 76, pp 127-137.
- Knappe, D; Fireline, JL. (2012). Fracking 101: Shale gas extraction using horizontal drilling and hydraulic fracturing. Presentation presented at NCAWWA-WEA Annual Conference, November 14, 2012, Raleigh, NC.
- Lee, K; Neff, J. (2011). Produced water: Environmental risks and advances in mitigation technologies. Springer, New York, NY.
- MADS y ANLA Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, (2014). Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental en proyectos de perforación exploratoria de hidrocarburos. Bogotá, D.C.
- MCOR, Marcellus Center for Outreach and Research, (2012). Extent and thickness of Marcellus Shale. University Park, PA: Pennsylvania State University. U.S.
- MME, Ministerio de Minas y Energía, (2014). Resolución 90341 de 2014. Por la cual se establecen requerimientos técnicos y procedimientos para la exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos no convencionales. *Diario Oficial* No. 49.106 de 28 de marzo de 2014.
- Moniz, E., H. Jacoby, A. Meggs, R. Armstrong, D. Cohn, J. Deutch, G. Kaufman, M. Kenderdine, F. O'Sullivan, S. Paltsev, J. Parsons, I. Perez-Arriaga, J. Reilly and M. Webster. (2011). *The Future of Natural Gas: An Interdisciplinary MIT Study*. Massachusetts Institute of Technology, MIT Energy Initiative. U.S.
- Nicot, JP; Scanlon, BR; Reedy, RC; Costley, RA., (2014). Source and fate of

- hydraulic fracturing water in the Barnett Shale: a historical perspective. *Environ Sci Technol*, vol 48, pp 2464-2471.
- Myers, T., (2012). Potential contaminant pathways from hydraulically fractured shale to aquifers. *Ground Water*, vol 50, pp 872-882.
- Portafolio. Precios del petróleo reviven la posibilidad de iniciar producción con fracking. En: <http://www.portafolio.co/economia/colombia-esta-cerca-de-implementar-el-uso-del-fracking-para-producir-crudo-502958> Consultado en enero de 2017.
- Price,D; Adams, C., (2016). Chapter 5 - Water Use and Wastewater Management: Interrelated Issues with Unique Problems and Solutions, In *Environmental and Health Issues in Unconventional Oil and Gas Development*, edited by Debra Kaden and Tracie Rose, pp 61-79.
- Rahm, BG; Bates, JT; Bertoia, LR; Galford, AE; Yoxtheimer, DA; Riha, SJ., (2013). Wastewater management and Marcellus Shale gas development: trends, drivers, and planning implications. *J Environ Manage*, vol 120, pp 105-113.
- Rowan, EL; Engle, MA; Kirby, CS; Kraemer, TF., (2011). Radium content of oil- and gas-field produced waters in the northern Appalachian Basin (USA): Summary and discussion of data. (Scientific Investigations Report 20115135). Reston, VA: U.S. Geological Survey.
- SGCy MME, Servicio Geológico Colombiano y Ministerio de Minas y Energía, (2014). Plan estratégico del conocimiento geológico del territorio colombiano 2014-2023. Colección administración, gestión y desarrollo. Bogotá D.C.
- UPME, Unidad de Planeación Minero Energética, (2012). Escenarios de Oferta y Demanda de Hidrocarburos en Colombia, La Imprenta Editores S.A., Bogotá, D.C.
- USGS, United States Geological Survey, Fracturación hidráulica y sismicidad inducida, en: <https://energy.usgs.gov/OilGas/UnconventionalOilGas/HydraulicFracturing.aspx#3892235-overview>, consultada en marzo de 2017.
- U.S. EPA., (2015). Assessment of the Potential Impacts of Hydraulic Fracturing for Oil and Gas on Drinking Water Resources (External Review Draft). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-15/047.
- U.S. EPA., (2000). Development document for effluent limitations guidelines and standards for the centralized waste treatment industry. U.S. Environmental

- Protection Agency, technical report 821R00020, Washington, DC.
- U.S. EPA., (2015). Review of well operator files for hydraulically fractured oil and gas production wells: Well design and construction. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/601/R-14/002.
- U.S. GAO., (2012). Information on Shale Resources, Development, and Environmental and Public Health Risks. United States Government Accountability Office (GAO), Washington, DC, GAO-12-732.
- Vargas, C. A., (2012). Evaluating total Yet-to-Find hydrocarbon volume in Colombia. Earth Science. Research Journal, vol. 16, Special Issue, pp 1-246.
- West, J. (1996). International Petroleum Encyclopedia. Tulsa, Pennwell Publishing Co.

## ANEXOS

**Anexo 1.** Listado de los principales compuestos químicos y su función utilizados para la fracturación hidráulica de acuerdo a los datos consignados en FracFocus. Elaboración propia

<i>Aditivos</i>	<i>Químicos frecuentes</i>	<i>Función</i>
<i>Acido</i>	Ácido clorhídrico	Disuelve el cemento, minerales y arcillas para reducir la obstrucción del espacio poroso
<i>Biocidas</i>	Glutaraldehido	Controla o elimina bacterias presentes en la base fluida
<i>Agente de ruptura</i>	Sales de ácido peroxodisulfúrico	Reduce la viscosidad en tratamiento especializado de fluidos como geles y espumas
<i>Controlador de arcillas</i>	Cloruro de colina	Previene el hinchamiento de las arcillas de formación cuando reaccionan con fluidos con base acuosa
<i>Inhibidor de corrosión</i>	Metanol, alcohol propargílico, isopropanol	Protege los componentes y equipos del pozo de hierro y acero de los fluidos corrosivos
<i>Agente reticulante</i>	Etilenglicol, hidróxido de potasio, hidróxido de sodio	Incrementa la viscosidad de los fluidos de base tipo gel al conectar polímeros de moléculas
<i>Emulsificante</i>	2-Butoxietanol, éter de polioxietileno nonilfenol, metanol	Facilita la dispersión de un fluido inmisible en otro, reduciendo la tensión interfacial entre los dos líquidos para alcanzar estabilidad
<i>Reductor de fricción</i>	Destilados de petróleo ligero hidrotratados	Reduce las presiones de fricción existentes durante el bombeo de fluidos a través de las herramientas y tubulares en el pozo
<i>Agente gelificante</i>	Destilados de petróleo ligero hidrotratados, goma guar	Incrementa la viscosidad del fluido fracturante, permitiendo que pueda cargar/transportar más propelente dentro de las fracturas y reducir las pérdidas de fluido en el reservorio
<i>Agente de control de hierro</i>	Ácido cítrico	Controla la precipitación de hierro de la solución
<i>Agente de no emulsificación</i>	Metanol, isopropanol, etoxilato de nonilfenol	Separa las emulsiones problemáticas generadas dentro de la formación.

**Anexo 1 Continuación.** Listado de los principales compuestos químicos y su función utilizados para la fracturación hidráulica de acuerdo a los datos consignados en FracFocus. Elaboración propia.

<i>Aditivos</i>	<i>Químicos frecuentes</i>	<i>Función</i>
<i>Controlador de pH</i>	Acido carbónico, sales dipotásicas, hidróxido de potasio, hidróxido de sodio, ácido acético	Modifica el pH de la solución ya sea induciendo un cambio o estabilizando y resistiendo al cambio para alcanzar las propiedades óptimas para optimizar el desempeño del fluido
<i>Agente de curado de resinas</i>	Metanol, etoxilato de nonilfenol, isopropanol, alcoholes	Disminuye la temperatura de activación de la resina del propelente cuando la temperatura en fondo de pozo es muy baja para activar el enlace térmicamente
<i>Inhibidor de incrustaciones</i>	Etilenglicol, metanol	Controla o previene las incrustaciones en los conductos
<i>Solvente</i>	Ácido hidrociorhídrico	Controla la humectabilidad de las superficies de contacto o previene o rompe emulsiones
<i>Surfactante</i>	Etanol, naftaleno, metanol, alcohol isopropílico	Tensioactivos, disminuyen la tensión superficial o la tensión interfacial entre los fluidos

**Anexo 2.** Relación de documentos emitidos a la fecha para la regulación de las actividades de fracturación hidráulica en el territorio colombiano

<b>Fecha</b>	<b>Entidad Origen</b>	<b>Entidad Destino</b>	<b>Tipo de documento</b>	<b>Descripción</b>
4-may-12	ANH	Empresas operadoras de Hidrocarburos	Acuerdo No.4	Por el cual se establecen criterios de administración y asignación de áreas para la explotación de los hidrocarburos propiedad de la Nación: se expide el reglamento de contratación correspondiente, y se fijan reglas para la gestión y seguimiento de los respectivos contratos.
16-may-12	MME	Empresas operadoras de Hidrocarburos	Resolución 180742	Por la cual se establecen los procedimientos para la exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos no convencionales
7-sep-12	CGR	MADS, MME, ANLA, ANH	Oficio 2012EE0060874	Función de advertencia. Principio de precaución y desarrollo sostenibles, posibles riesgos hidrocarburos no convencionales.
26-dic-13	MME	Empresas operadoras de Hidrocarburos	Decreto 3004	Por el cual se establecen los criterios y procedimientos para la exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos no convencionales.
20-mar-14	MADS	Empresas operadoras de Hidrocarburos	Resolución No. 0421	Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del estudio de Impacto Ambiental para los proyectos de perforación exploratoria de hidrocarburos y se toman otras determinaciones.
26-mar-14	ANH	Empresas operadoras de Hidrocarburos	Acuerdo No.3	Por el cual se adiciona el Acuerdo No. 4 de 2012, con el objeto de incorporar al Reglamento de contratación para Exploración y Explotación de Hidrocarburos parámetros y normas aplicables al desarrollo de Yacimientos No Convencionales, y se dictan disposiciones complementarias.
27-mar-14	MME	Empresas operadoras de Hidrocarburos	Resolución No. 90341	Por la cual se deroga la Resolución No. 180742 de mayo de 2012 y por la cual se establecen los requerimientos técnicos y procedimientos para la exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos no convencionales.
2-may-14	ANH	Empresas operadoras de Hidrocarburos	Resolución No. 390	Por la cual se modifica la Resolución No. 187 del 19 de febrero de 2014, de asignación de bloques a la ronda 2014



editores

**Universidad de Alcalá**  
**Universidad Rey Juan Carlos**

diseño y maquetación

**IMDEA Agua**

ISBN

**978-84-697-9514-9**