

Trabajo Fin de Grado

Integrando un ecosistema acuático lagunar en
la restauración ecológica de un vertedero de
yesos de desulfuración.

Autor

Jorge Aznar Mor

Director

José Miguel Castillejo Moreno

Escuela Politécnica Superior de Huesca

2016

Índice

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	MATERIAL Y MÉTODOS	5
2.1.	ÁREA DE ESTUDIO	5
2.1.1.	Climatología	6
2.1.2.	Geología.....	6
2.1.3.	Vegetación	7
2.1.4.	Características de la mina y la laguna	7
2.2.	Metodología de restauración	7
2.2.1.	Características de los materiales	7
2.2.2.	Restauración terrestre	9
2.3.	Diseño experimental	12
2.4.	Análisis de las muestras	14
2.5.	Análisis estadístico	16
3.	RESULTADOS.....	18
3.1.	Datos meteorológicos	18
3.1.1.	PCA de datos meteorológicos 15 días antes de recoger la muestra.	18
3.1.2.	PCA de datos meteorológicos 90 días antes de recoger la muestra.	19
3.1.3.	PCA de datos meteorológicos 170 días antes de recoger la muestra.	21
3.2.	Datos Físico-químicos	23
3.2.1.	Datos numéricos.....	23
3.2.2.	Series temporales.....	24
3.2.3.	PCA de datos físico-químicos.....	27
4.	DISCUSIÓN	28
5.	CONCLUSIONES	38
6.	AGRARDECIMIENTOS.....	40
7.	BIBLIOGRAFÍA	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Humedad (%), pH y Conductividad (dS/m) de los materiales de relleno.

Tabla 2: Granulometría (%) de los materiales de relleno.

Tabla 3: Elementos totales de las muestras (mg/kg)

Tabla 4: Variables meteorológicas recogidas de la estación de Calanda.

Tabla 5: Parámetros físico-químicos utilizados en el estudio.

Tabla 6: Parámetros válidos comunes en las cuatro muestras.

Tabla 7: Valores de los ejes y varianza total del Análisis de Componentes Principales para las variables meteorológicas recogidas 15 días antes de tomar la muestra.

Tabla 8: Valores de los ejes y varianza total del Análisis de Componentes Principales para las variables meteorológicas recogidas 90 días antes de tomar la muestra.

Tabla 9: Valores de los ejes y varianza total del Análisis de Componentes Principales para las variables meteorológicas recogidas 170 días antes de tomar la muestra.

Tabla 10: Datos físico-químicos de las muestras

Tabla 11: Valores de los ejes y varianza total del Análisis de Componentes Principales para las variables físico-químicas.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Climograma de la estación climatológica de Andorra, Teruel.

Figura 2: Representación 3D de la restauración terrestre y acuática lagunar.

Figura 3: Análisis de Componentes Principales para las variables meteorológicas recogidas 15 días antes de tomar la muestra.

Figura 4: Análisis de Componentes Principales para las variables meteorológicas recogidas 90 días antes de tomar la muestra.

Figura 5: Análisis de Componentes Principales para las variables meteorológicas recogidas 170 días antes de tomar la muestra.

Figura 6: Variación temporal del pH.

Figura 7: Variación temporal de la conductividad.

Figura 8: Variación temporal de la alcalinidad TAC.

Figura 9: Variación temporal de la concentración de nitratos.

Figura 10: Variación temporal de la concentración de cloruros.

Figura 11: Variación temporal de la concentración de fluoruros.

Figura 12: Variación temporal de la concentración de sulfatos.

Figura 13: Análisis de Componentes Principales para las variables físico-químicas.

Figura 14: vista aérea de la mina.

Figura 15: Granulometría de los yesos de desulfuración y laguna.

Figura 16: Laguna, donde se puede observar el color del agua.

Figura 17: Orilla por donde se accede a la laguna.

Figura 18: Montones de material de relleno.

Figura 19: Grafico de una red trófica en un ecosistema lagunar.

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I: Comparación de las propiedades físico-químicas entre una laguna de yesos natural y una laguna de yesos de desulfuración.

Anexo II: Imágenes

RESUMEN

La restauración de un ecosistema acuático lagunar artificial lleva implicados el estudio de muchos factores, tales como variables meteorológicas, parámetros físico-químicos del agua de este ecosistema o el entorno en el que se encuentra. En nuestro caso se integra este ecosistema acuático lagunar en la restauración terrestre. En el trabajo se han estudiado diversos parámetros meteorológicos y se ha visto que el efecto del viento y la pluviometría son importantes y afectan a la cantidad de elementos que se encuentran en el agua. El principal problema que se abarca en este estudio es la alta carga de elementos disueltos que contiene la laguna. Esta alta carga de nutrientes deriva principalmente de dos problemas. El primero se debe a la alta carga de sulfatos en el agua, debido al material de relleno de la mina, yesos de desulfuración, cenizas y escorias, que están en continuo contacto con el agua por lo que se produce la disolución de los mismos y se liberan. Los altos niveles de nitratos también perjudican la calidad del agua. Ambos casos se estudian y se dan unas recomendaciones para actuar en la reducción de estos y crear un ecosistema acuático lagunar funcional.

Palabras clave: Yesos de desulfuración, sulfatos, nitratos, laguna de yesos artificiales, restauración.

ABSTRACT

The restoration of an artificial lagoon ecosystem involves the study of many factors, such as meteorological variables, physical-chemical parameters of the water or the environment in which it is set. In our case, this lagoon ecosystem is integrated into a terrestrial restoration. My work examines various meteorological parameters and it aims to demonstrate that the effect of the wind and rainfall is substantial in that they affect the amount of chemical elements found in water. The main issue on this study was the high chemical elements loading that the lagoon contains. This high chemical element loading stems mainly from two problems. The first one is the high sulfate concentration in the water, due to the impact of the mine filling materials, desulfurization gypsum, bottom ashes and coal flying ashes, which are constantly in contact with the water itself, causing the dissolution of these materials which are consequently released. The second problem is the high levels of nitrates which also impairs water quality. Both problems are examined on this study which also provides suggestions concerning the courses of action to be taken in order to tackle these problems and create a functional lagoon ecosystem.

Keywords: Flue gas desulfurization FGD gypsum, sulfates, nitrates, artificial gypsum lagoon, restoration.

1. INTRODUCCIÓN

La minería de superficie modifica totalmente el paisaje de la zona donde se realiza la explotación. Según Jorba et al. (2002) el aspecto paisajístico ha sido hasta la fecha el más ampliamente valorado y frecuentemente suele asimilarse a la presencia de vegetación que disminuye el impacto visual de estas zonas. No por esto se quiere decir que sea el único impacto que sufre este tipo de explotaciones, existen muchos más como por ejemplo la pérdida de biodiversidad. Esta modificación del paisaje se puede dar a causa de la creación de huecos que restan volumen, o por la generación de escombreras que aportan nuevos volúmenes (Álvarez-Campana y Ramos, 2007).

Para que este impacto se minimice se debe llevar a cabo una restauración. Es preciso recordar que el *Real Decreto 2994/1982*, del 15 de octubre, empezó a regular la restauración de espacios naturales afectados por las actividades mineras e incorpora en su articulado la necesidad de realizar un proyecto de almacenamiento de los residuos que fueran a ser generados por dichas actividades, incluido en la *Ley 22/1973*, de 21 de julio, de Minas.

El *RD 975/2009*, de 12 de Junio, sobre Gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección de la rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras, pretende unificar y mejorar la legislación hasta entonces existente relacionada con las restauraciones ambientales mineras, principalmente el *Real Decreto 2994/ 1982* sobre restauración del espacio natural afectado por actividades mineras y el *Real Decreto 1116/ 1984* relativo a explotaciones de carbón a cielo abierto (parcialmente vigente). El contenido de esta normativa está destinado a quienes realicen actividades de investigación y aprovechamientos mineros (regulados por la *Ley 22/1973*), los cuáles están obligados a efectuar con sus medios, los trabajos de rehabilitación del espacio natural afectado por las labores mineras como por sus servicios e instalaciones anejas, incluyéndose aquellas donde se tengan que depositar los residuos mineros (Preámbulo II RD 975/2009).

En el ámbito político también queda reflejado este interés. En Europa surge la Directiva Marco del Agua (DMA) (Directiva 2000/60/CE del 23 de octubre de 2000). Mediante esta directiva, la Unión Europea, organiza la

gestión de las aguas superficiales, continentales, de transición, aguas costeras y subterráneas, con el fin de prevenir y reducir su contaminación, fomentar su uso sostenible, proteger el medio acuático, mejorar la situación de los ecosistemas acuáticos y paliar los efectos de las inundaciones y de las sequías.

Según esta normativa, los Estados miembros de la Unión Europea deben especificar todas las cuencas hidrológicas situadas en su territorio y presentar un plan de gestión y un programa de medidas en cada demarcación hidrográfica. Dichas medidas tendrán como objetivos prevenir el deterioro, mejorar y restaurar el estado de las masas de agua superficiales, lograr que estén en buen estado químico y ecológico y reducir la contaminación debida a los vertidos y emisiones de sustancias peligrosas, entre otros. Para ello da un plazo de 15 años desde su aprobación, por lo que a día de hoy estos objetivos ya deberían estar cumplidos. Por desgracia, todavía queda mucho trabajo por hacer.

La restauración ecológica es el proceso de reparación del daño causado por los humanos a la diversidad y a la dinámica de los ecosistemas indígenas (Jackson et al. 1995).

Según la Society for Ecological Restoration International (SER), la restauración ecológica es el proceso de ayudar al restablecimiento de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido.

La SER también establece una lista de cuatro bases para saber cuándo la restauración ha sido realizada. Estas bases se pueden resumir. (1) Cuando contiene suficientes recursos bióticos y abióticos para continuar su desarrollo sin ayuda, (2) cuando se sustente por sí mismo tanto funcionalmente como estructuralmente, (3) cuando demuestre resiliencia a un rango normal de estrés y perturbaciones, (4) cuando interactúe con ecosistemas contiguos en términos de flujos bióticos y abióticos y de interacciones culturales.

Cuando se habla de restauración hay que tener claros también otros conceptos, como reclamación y rehabilitación. Estos dos términos son tipos de restauraciones ecológicas terrestres. El primer término se puede definir como la restauración del terreno inicial con otra funcionalidad distinta a la inicial, es decir, a la hora de hacer la restauración no volver al mismo punto donde se encontraba el ecosistema antes de que se degradara. La rehabilitación hace

referencia a la acción de restaurar un sistema a una condición o estado previo. Esto no implica que la restauración lleve al sistema al mismo punto en el que se encontraba inicialmente (Bradshaw, 1996). Estos términos no los podemos aplicar a nuestro caso pero son interesantes.

En muchas minas a cielo abierto se suele dar un tipo de restauración que consiste en llenar el hueco explotado con agua. Esta acción se puede llevar a cabo de forma activa, o permitiendo las condiciones adecuadas para que pueda llenarse de manera asistida. En el proceso de transición entre lo que era el medio terrestre y el deseado ecosistema acuático pueden aparecer varios problemas, como niveles de eutrofización muy avanzados, afloramiento de cianobacterias, pobreza en la cadena trófica, problemas de turbidez, contaminación de iones, metales pesados, etc..., ocasionando en muchos casos mala calidad del agua, toxicidad para la vida acuática o la contaminación de aguas subterráneas y cualquier tipo de ecosistema acuático interconectado. Esto es debido, según McCullough y Etten (2011), entre otras cosas, a que no se fijan objetivos realistas para un proceso real de restauración ecológica, sino que se suele tratar como remedio auxiliar en los casos en los que hay escasez de material de relleno y tierra vegetal para establecer un ecosistema terrestre. Además, muy pocas veces se realiza un seguimiento o este resulta insuficiente.

Según Callahan (1984), la investigación ecológica, desde hace muchos años, se financia por cortos periodos de tiempo y se realiza en sitios individuales, condiciones que no conducen a proyectos que abordan una escala mayor de tiempo y geográfica. A partir de esta idea se fundaron los Long-Term Ecological Research (LTER).

Los LTER son un conjunto de estudios científicos que se basan en los procesos ecológicos en escalas temporales y espaciales prolongados. Las observaciones a largo plazo de conjuntos completos de variables ecológicas han dado como resultado una comprensión más rica de la dinámica ecológica a lo largo del tiempo, siendo así necesarios para descubrir importantes relaciones ecológicas (Kratz et al. 2003). Estos experimentos a largo plazo han proporcionado ideas únicas sobre patrones y procesos ecológicos, han influido en decisiones de gestión y políticas y han evolucionado en plataformas de investigación donde se apoyan a los estudios y la participación entre investigadores (Knapp et al. 2012).

Un monitoreo continuado en el tiempo, permite modelar y extrapolar a futuros casos, detectar cuales han sido los problemas ambientales, y actuar convenientemente con el programa de gestión adecuado (Redman et al. 2004).

Hay factores a tener cuenta en un ecosistema lacustre como son, la química, la geomorfología, la meteorología, el biológico y el físico. Según Álvarez-Cobelas et al. (2006) el efecto de la precipitación acumulada hace que se recargue el acuífero donde se encuentra la laguna, lo que a su vez produce una mayor descarga aguas abajo del acuífero. Esto afecta a la renovación del agua del lago sobre variables limnológicas, dependiendo de su geología, de tal manera que produce cambios en la transparencia, salinidad, nitrógeno total, fosforo total, y la masa de fitoplancton emergente. Depende de si hay varias lagunas sobre un mismo acuífero, el tiempo de recarga de agua para cada una de ellas es diferente.

El factor geomorfológico también juega un papel muy importante tanto en la caracterización de la laguna como en su restauración. Según Crisman et al. (2005) hay dos categorías generales de administrar una laguna, agua – sedimento (horizontal) e interacciones en la columna de agua (vertical). Las prácticas que se centran en las interacciones del agua – sedimento buscan reducir la liberación de nutrientes para aumentar el almacenamiento permanente y la disponibilidad de nutrientes en la columna de agua para aumentar la producción biótica, reduciendo el tiempo que tarda entre la acción de la medida y una respuesta positiva del ecosistema. Los lagos pocos profundos, están más controlados por la memoria del sistema (sedimentos) y las interacciones con la columna de agua, que los lagos profundos, debido a la falta de su estratificación térmica.

Como objetivo general se pretende crear una propuesta de integración de un ecosistema acuático lagunar en la restauración ecológica terrestre de la mina ``Corta Barrasa``.

Esto se quiere llevar a cabo a partir de los siguientes objetivos específicos:

- Analizar y justificar los factores a tratar para mejorar el estado de la laguna con el objetivo de que sea viable su integración en la restauración ecológica.
- Estudiar la relación entre el agua, los materiales inertes y las condiciones meteorológicas y conocer cómo afecta al ecosistema lacustre.
- Comparar la calidad del agua con otras similares y anotar diferencias.
- Elaborar recomendaciones a seguir para involucrar la laguna en la restauración ecológica.

En el presente trabajo se sigue un seguimiento de tres años con datos físico-químicos obtenidos de la laguna y datos meteorológicos.

Hipótesis nulas a desarrollar

La calidad del agua de la laguna se prevé que supere los límites para soportar algún tipo de ecosistema, debido a la posible alta carga de nutrientes que contiene esta agua, por la composición de los materiales con los que está en contacto el agua.

Los factores meteorológicos, pueden ser factores importantes y pueden afectar a la cantidad de algunos nutrientes que se encuentren diluidos en el agua.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

La laguna se encuentra situada en la explotación superficial de lignito, llamada mina Corta Barrasa. Se sitúa en Andorra (Teruel), con coordenadas UTM huso 30, X: 712.401; Y: 4.451.165. La actividad minera fue desarrollada desde el año 1986 hasta el 2002. Tras su cese de actividad, se comenzó a utilizar como vertedero de los residuos inertes, principalmente de los residuos derivados de la combustión del carbón en la central térmica (yesos de desulfuración, cenizas volantes y escorias), propiedad de Endesa. La funcionalidad actual de esta laguna es regar los caminos de la mina por donde circulan camiones para evitar el levantamiento de polvo.

2.1.1. CLIMATOLOGÍA

Andorra se caracteriza por un clima mediterráneo seco, con fuerte influencia continental. De acuerdo con la Síntesis Biogeográfica o Corológica de Europa de Rivas-Martínez (2008), el área de estudio está comprendida dentro del Reino Holártico, en la Región Mediterránea, Subregión mediterránea occidental, superprovincia Mediterránea - Iberolevantina, Provincia Aragonesa y en el Sector Bárdenas - Monegros.

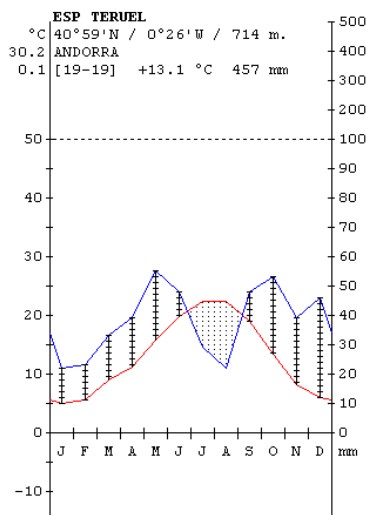


Figura 1: Climograma de la estación climatológica de Andorra, Teruel. Fuente: 2008 S. Rivas-Martínez, Centro de Investigaciones Fitosociológicas, Madrid.

Este clima se caracteriza por ser parecido al mediterráneo en lo que afecta a las precipitaciones, entre 400mm y 600mm, con máximos en otoño y primavera, y continental en cuanto a las temperaturas, más extremas debido a que no recibe la influencia del mar. Los veranos son cálidos y secos, llegando a alcanzar más de 30°C, e inviernos bastante fríos con frecuentes temperaturas por debajo de los 0°C, lo que conlleva heladas en noches despejadas y nevadas esporádicas.

2.1.2. GEOLOGÍA

La geología de la zona de estudio está determinada por materiales calizos. La mina se sitúa sobre arena y arcillas con lignitos, cuya permeabilidad es baja, con zonas de calizas y margas en los bordes de esas arcillas. Estas provienen del mesozoico cretácico inferior Aptiense-Albinense de la zona Ibérica, Maestrazgo. Alejándonos un poco de la zona minera nos encontramos calizas arcillosas.

La laguna se sitúa sobre una geología artificial, formada por los materiales de relleno, escorias, cenizas y yesos de desulfuración, con su fondo y taludes impermeabilizados para evitar la salinización de terrenos y acuíferos circundantes.

2.1.3. VEGETACIÓN

La vegetación predominante está compuesta por matorral mediterráneo, pino carrasco de repoblación y numerosos campos de cultivo con labor intensiva. La vegetación natural circundante al hueco minero son coscojares, matorrales, pinares (*Pinus pinaster* W.), romerales y tomillares basófilos y vegetación propia de roquedos calcáreos.

2.1.4. CARACTERÍSTICAS DE LA MINA Y LA LAGUNA

Esta mina tiene una extensión en proyección horizontal de aproximadamente 55 ha y una capacidad de volumen del vaso de 12,8 Mm³, con una profundidad máxima de relleno de 6075 m.

La laguna consta de forma elipsoidal, ocupa aproximadamente un área de 0,58 ha, con una longitud de 225 m, una anchura máxima de 42 m y una anchura mínima de 12 m.

2.2. METODOLOGÍA DE RESTAURACIÓN

2.2.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Los materiales con los que se está produciendo el relleno del vertedero son residuos derivados de la combustión del carbón de la central térmica. Estos residuos provienen de la quema de carbón importado de otras minas. Los residuos son, (1) cenizas volantes, se definen, según la norma española *UNE-EN 450-1:20006+A1:2008*, como un polvo fino con partículas principalmente esféricas, cristalinas, originadas por la combustión del carbón pulverizado, con o sin materiales de combustión, que tiene propiedades puzolánicas y que está compuesto fundamentalmente de SiO₂ y Al₂O₃. El contenido de SiO₂ reactivo tal y como se describe en la Norma *EN 197-1*, es de, al menos el 25% en masa. Son recogidas por los colectores de partículas instalados en las chimeneas de las centrales para evitar la contaminación atmosférica. Dependiendo de si se trata de un colector mecánico o un precipitador electrostático, varía el tamaño de partícula, siendo mayor el

tamaño en el primer caso que en el segundo. De cualquier modo, estas cenizas volantes son siempre un residuo de partículas muy finas, típicamente esféricas, cuyo diámetro se encuentra entre $< 1\mu\text{m}$ y $150\mu\text{m}$. La composición química de estas cenizas está determinada por la fracción del carbón que no combustiona, estando formadas mayoritariamente ($> 85\%$) por cristales de los elementos: silicio, aluminio, hierro, calcio y magnesio (Malhotra y Ramezaniapour, 1994).

(2) Escorias, están formadas por partículas angulares con textura superficial muy porosa y rugosa. El tamaño de escoria varía entre el de una grava fina y una arena fina (tabla 2). La composición química de las cenizas de hogar o escorias, depende fundamentalmente del tipo de carbón utilizado. Se pueden clasificar según su componente mayoritario, en silíceas, si se trata de SiO_2 , o calcáreas, si se trata de CaO . En el caso del lignito el porcentaje de CaO suele variar entre 15% y el 35% (CEDEX, 2011).

(3) Yesos de desulfuración, un residuo generado durante la descontaminación del dióxido de azufre que se encuentra en los gases de la combustión de la central térmica, obtenidos por vía húmeda a través del método de desulfuración con cal o caliza. En este proceso, en la torre de lavado el SO_2 se disuelve en la pasta aguada y reacciona con la cal o caliza. Esto produce CO_2 , el cual entra a la corriente de gas y forma CaSO_3 sólido. Este último se oxida casi por completo hasta CaSO_4 , parcialmente por el exceso de oxígeno en los gases de combustión que entran a la torre, parte en el tanque de retención del efluente, en el espesador, o en el recipiente adicional de oxidación, rociado con aire generando los yesos de desulfuración ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Rodríguez y Velasco, 2005). Son bastante solubles en agua, 0,256g cada 100g en agua a 20°C .

Las propiedades mecánicas en el rango de baja humedad son muy buenas, pero cuando aumenta la humedad se pierde compresión y resistencia a la flexión, por lo que no es un material fácil de usar. Resiste bastante bien a las heladas. Las propiedades térmicas son aceptables. El transporte de agua y de vapor de agua es bastante alto, por lo que se muestra como un buen factor para la distribución de la humedad, pero, si los yesos de desulfuración se exponen a precipitación, este factor conduce a una rápida penetración de agua en el material, lo que produce inestabilidad (Telesca et al. 2013)

	Escorias	Cenizas	Yesos
Humedad (%)	0,32	0,26	22,38
pH	7,91	10,08	8,32
Conductividad (dS/m)	1,01	1,86	2,81

Tabla 1: Humedad (%), pH y Conductividad (dS/m) de los materiales de relleno. Fuente: 2013, M. González Izquierdo, Evaluación de materiales formadores de suelo en minas de carbón a cielo abierto sometidas a procesos de restauración ecológica.

	Arena	Limo	Arcilla
Escorias	92	5	3
Cenizas	30	50	20
Yesos	45	55	

Tabla 2: Granulometría (%) de los materiales de relleno. Fuente: 2013, M. González Izquierdo, Evaluación de materiales formadores de suelo en minas de carbón a cielo abierto sometidas a procesos de restauración ecológica.

Elemento	Escorias	Cenizas	Yesos
Al	135	119	3
P	3	2	1
S	2	8	116
K	9	22	0
Ca	34	136	184
Ti	5	4	0
Mn	0	1	0
Fe	172	65	2
Rb	1	n.d	n.d
Sr	1	1	0

Tabla 3: Elementos totales de las muestras (mg/kg) (n.d= no disponible) Fuente: 2013, M. González Izquierdo, Evaluación de materiales formadores de suelo en minas de carbón a cielo abierto sometidas a procesos de restauración ecológica.

2.2.2. RESTAURACIÓN TERRESTRE

La mina se ha estado utilizando como laboratorio natural desde 2012. En este laboratorio se han ido siguiendo varias líneas experimentales de investigación, utilizando una parte del vertedero con diferentes características (suelo compactado o no) y viendo a lo largo del tiempo como evolucionaban las plantas experimentales para ver cuál era la restauración más eficiente.

Se comprobó que las especies vegetales con mayor abundancia en estos ecosistemas yesíferos naturales basan su éxito principalmente en su capacidad de persistencia (supervivencia) en el ecosistema, pero no tanto en su capacidad de establecimiento. Desde el punto de vista de la recuperación ambiental del vertedero de Corta Barrabasa, se considera necesaria la

intervención para facilitar el establecimiento de estos taxones, los cuales de forma espontánea difícilmente podrían hacerlo.

Las características de los sustratos yesíferos que dificultan el establecimiento de la vegetación no adaptada se identifican como: a) estrés físico, como consecuencia de la formación de costras edáficas y/o biológicas, y, b) estrés químico, derivado de un empobrecimiento de nutrientes causado por la sustitución de otros cationes de calcio por calcio.

La técnica de la restauración pasiva, es decir, permitir la colonización espontánea de los yesos de desulfuración a partir de plantas que crezcan sin ningún tipo de intervención, queda descartada. Esto hace recomendable y necesaria una intervención a través de una restauración activa.

Las líneas experimentales de investigación que se siguieron son:

1) Restauración ecológica de matorrales mediterráneos en escombreras de yesos de desulfuración en centrales térmicas de carbón; 2) Rehabilitación de escombreras de yeso de desulfuración de gases mediante especies gipsófitas en zona no yesíferas; 3) Estrategias de revegetación mediante matorral mediterráneo en escombreras de yeso artificial procedentes de centrales térmicas de carbón.

1) Una de las opciones evaluadas para la restauración del vertedero es el uso de albardín (*Lygeum spartum* L.), o esparto de Aragón, una de las plantas más típicas de las zonas esteparias del Valle del Ebro. Esta planta puede establecerse en suelos que otras especies no pueden desde un primer momento, y posteriormente ayudar a algunas especies a colonizar dicha zona (planta nodriza).

2) Se seleccionaron 3 especies típicas de suelos ricos en yeso: *Gypsophila struthium* L. ssp *hispanica* W., *Helianthemum squamatum* M. y *Lepidium subulatum* L. Dichas especies presentan diferentes adaptaciones vegetales para garantizar su establecimiento en áreas yesíferas naturales.

La siembra no parece ser una herramienta efectiva para el establecimiento vegetal en este tipo de sustratos para la mayoría de las especies típicas de suelos ricos en yeso.

3) Se seleccionaron 5 especies de plantas (en orden de mayor a menor facilidad para establecerse en suelos ricos en yeso): *Atriplex halimus* L., *Rosmarinus officinalis* L., *Thymus vulgaris* L., *Helichrysum stoechas* L. y *Quercus coccifera* L.

La mayoría de todos los individuos de estas 5 especies sobrevivieron en el sustrato de yesos artificiales después del estudio.

En todas las líneas de investigación experimentales las condiciones meteorológicas tienen bastante importancia, haciendo que tengan un mayor o menor éxito de establecimiento según las condiciones que se den.

El proyecto de reconstrucción geomorfológica planeado es un modelo de plataforma-talud, consistente en la formación de tres plataformas escalonadas de diferentes alturas, con orientación Oeste, iniciando desde una cota máxima de 680 m en la parte Este y terminando en una cota de 636 en la parte Oeste.

El modelo plataforma-talud se ha considerado por muchos expertos estable geotécnicamente pero no ecológicamente. Esta topografía inmadura muestra considerables limitaciones para maximizar las probabilidades de éxito del proyecto de recuperación ambiental del vertedero, por lo que se recomienda una mejora de la reconstrucción geomorfológica dando un enfoque ecosistémico que se centra en la integración del compartimento geomorfológico con los del suelo y la vegetación en la conformación de un ecosistema funcional con capacidad de automantenimiento.

En la restauración que se llevara a cabo se utilizaran las plantas anteriormente investigadas con las siguientes características.

1) Monocultivo de *Atriplex halimus*.

Previa descompactación y enmienda con escorias, establecimiento mediante siembra directa a voleo sin pretratamiento de dormancia de semillas ni selección de calidad (tamaño) de semilla, con época recomendada de siembra en otoño.

2) Material mediterráneo.

Previa descompactación y enmienda con escorias, establecimiento mediante plantación directa, con época recomendada de plantación a principios de primavera. Especies contrastadas (no necesariamente exclusivas) en orden

basado en gradiente de gipsofilia: *Rosmarinus offinalis*, *Helichrysum stoechas*, *Thymus vulgaris*, *Quercus coccifera*.

3) Aljezar de especies gipsófitas.

Previa descompactación y enmienda con escorias, establecimiento mediante plantación directa, con época recomendada de plantación a principios de primavera. Especies primocolonizadoras contrastadas (no necesariamente exclusivas): *Gypsophila struthium ssp hispanica* y *Lepidium subulatum*.

4) Albardinal

A través de la creación de de islas de fertilidad (adición de topsoil) previa descompactación y enmienda con escorias, establecimiento mediante plantación de *Lygeum spartum*, con época recomendada de plantación a principios de primavera.

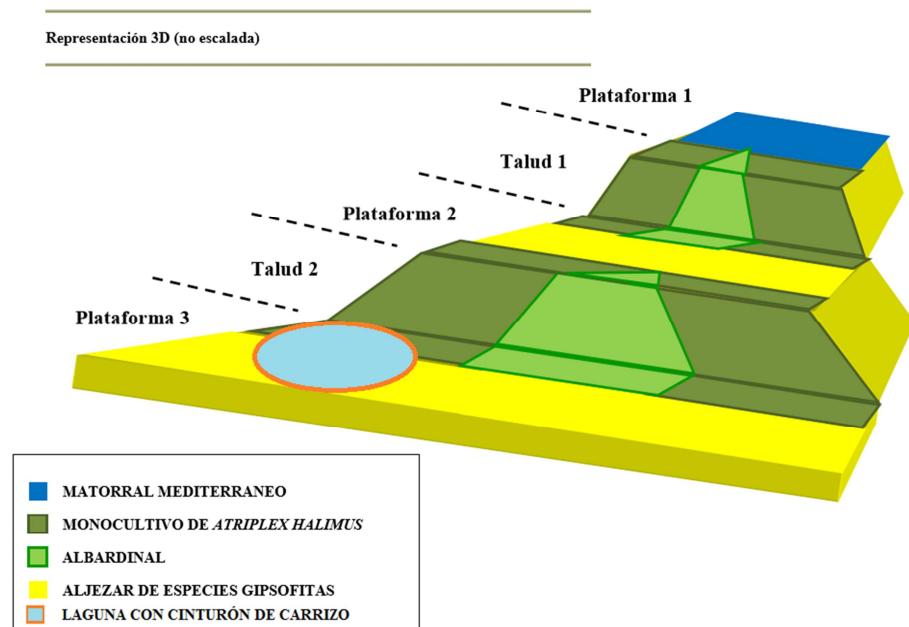


Figura 2: Representación 3D de la restauración terrestre y acuática lagunar. Fuente: 2016, J.M. Castillejo, Recomendaciones para la restauración del vertedero de yesos de desulfuración Corta Barrasa.

2.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Endesa realiza dos tomas de muestras anualmente, en nuestro caso fueron realizadas el 30 de Junio y otra el 23 de Diciembre del año 2014.

Las muestras tomadas en 2015 y 2016 fueron tomadas, el 28 de Julio y el 27 de Mayo respectivamente. Para la toma de muestras se utilizó una vara extensible de 2 m con un recipiente 1,5 l en el extremo. La toma de muestras

se realizó desde la orilla por donde se puede acceder a la laguna. Este recipiente se introdujo en el agua a una profundidad aproximada de 1 m. Antes de coger la muestra definitiva se homogeneizó con el mismo agua el recipiente 3 veces. Una vez cogida la muestra se introdujo el recipiente en una nevera con hielos y posteriormente se congeló y se mantuvo en oscuridad.

También se disponen de datos meteorológicos diarios desde 2014 hasta 2016 obtenidos de la estación de Calanda a través de la página web de la Oficina del Regante. Los parámetros recopilados son los siguientes.

Parámetros	Acrónimo	Unidad
Temperatura media	Temp media	°C
Temperatura máxima	Temp máxima	°C
Temperatura mínima	Temp mínima	°C
Velocidad del viento máxima	VelViento max	m/s
Velocidad del viento media	VelViento	m/s
Dirección del viento máxima	DirViento Vel max	º
Dirección del viento media	DirViento	º
Radiación		MJ/m ²
Precipitación		Mm
Evotranspiración	Et0	
Humedad mínima	Humedad min	%
Humedad máxima	Humedad max	%
Humedad media		%

Tabla 4: Variables meteorológicas recogidas de la estación de Calanda. Fuente: Elaboración propia.

Para ellas se calculó la media mensual como la suma de los valores diarios, partido del total de días del mes. Posteriormente se obtuvieron las medias para los años a partir de las fechas de los muestreos de agua para el análisis físico-químico. A excepción de la precipitación y la evapotranspiración, cuyo valor es la suma acumulativa de los valores diarios.

Se realizó una última visita el verano de 2016 para observar detenidamente la laguna y tomar datos que pudieran ser interesantes para el análisis.

2.4. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

Las muestra tomadas por ENDESA se realizaron en el laboratorio Control 7, contratado a través de ENAC ensayos. En este laboratorio se analizaron las muestras que corresponden al 2014.

Muchos de estos parámetros analizados por ENDESA (tablas 10) se encuentran asociados a rangos de mayor o menor que una cantidad, por lo que habrá que tratar estos datos antes de analizarlos.

Para el resto de muestras que se tomaron, el análisis lo realicé, en el IUCA, Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón, departamento de Calidad y Tratamiento de Aguas, situado en el edificio Torres Quevedo, departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente.

En la siguiente tabla podemos ver la totalidad de los parámetros analizados.

PARAMETRO	UNIDADES	PROCEDIMIENTO	TECNICA de ENSAYO
*pH	ud pH	PNT/ME-01	electrometría
*conductividad	μS/cm	PNT/ME-02	electrometría
**turbidez	ntu	Standard methods, Eaton (2005)	nefelometría
**DQO	mg/L O ₂	Standard methods, Eaton (2005)	reflujo abierto
**TOC	mg/L C	Standard methods, Eaton (2005)	oxidación catalítica por combustión
*calcio	mg/L Ca	PNT/ME-14	volumetría
*magnesio	mg/L Mg	PNT/ME-15	volumetría
*dureza	mg/L CaCO ₃	PNT/ME-16	volumetría
sodio	mg/L Na	PNT/ME-24	espectrometría emisión
potasio	mg/L K	PNT/ME-24	espectrometría emisión
carbonatos	mg/L CaCO ₃	PNT/ME-17	volumetría
bicarbonatos	mg/L CaCO ₃	PNT/ME-17	volumetría
*alcalinidad TA	mg/L CaCO ₃	PNT/ME-17	volumetría
*alcalinidad TAC	mg/L CaCO ₃	PNT/ME-17	volumetría
*cloruros	mg/L Cl	PNT/ME-41	cromatografía iónica

*sulfatos	mg/L SO ₄	PNT/ME-41	cromatografía iónica
**fosfatos	mg/L PO ₄		cromatografía iónica
*nitratos	mg/L NO ₃	PNT/ME-41	cromatografía iónica
*nitritos	mg/L NO ₂	PNT/ME-41	cromatografía iónica
*fluoruros	mg/L F	PNT/ME-41	cromatografía iónica
**bromuros	mg/L Br		cromatografía iónica
boro	mg/L B	PNT/ME-26	espectrofotometría UV-vis
*residuo seco	mg/L	PNT/ME-08	gravimetría
**sólidos en suspensión	mg/L	Standard methods, Eaton (2005)	filtración
silicio	mg/L Si	PNT/ME-38	espectrofotometría UV-vis
hierro	mg/L Fe	PNT/ME-22	EAA-llama
cobalto	µg/L Co	UNE EN 11885	ICP
aluminio	mg/L Al	PNT/ME-37	espectrofotometría UV-vis
manganeso	mg/L Mn	PNT/ME-22	EAA-llama
cromo	mg/L Cr	PNT/ME-22	EAA-llama
arsénico	µg/L As	UNE EN 11885	ICP
mercurio	µg/L Hg	UNE EN 17852	espectrofotometría UV-vis
níquel	mg/L Ni	PNT/ME-22	EAA-llama
cobre	mg/L Cu	PNT/ME-22	EAA-llama
cinc	mg/L Zn	PNT/ME-22	EAA-llama
cadmio	mg/L Cd	PNT/ME-22	EAA-llama
plomo	mg/L Pb	PNT/ME-22	EAA-llama
estroncio	µg/L Sr	UNE EN 11885	ICP
antimonio	µg/L Sb	UNE EN 11885	ICP
molibdeno	µg/L Mo	UNE EN 11885	ICP
uranio	µg/L U		

Tabla 5: Parámetros físico-químicos utilizados en el estudio. Fuente: Elaboración propia.

*Parámetros comunes analizados tanto por parte de Endesa como por mi parte. El procedimiento que se llevó a cabo en mi caso fue Standard methods, Eaton (2005). ** Parámetros analizados por mi parte para los que Endesa no consta de datos.

2.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El objetivo del análisis es relacionar las variables meteorológicas con las físico-químicas para poder ver cuáles de ellas se ven afectadas por cambios y cómo evolucionan a través del tiempo.

La estadística utilizada son Análisis de Componentes Principales (PCA). Se ha elegido este método porque es un análisis de ordenación que permite establecer las correlaciones existentes entre ambos tipos de variables, físico-químicas y meteorológicas.

Según Jolliffe (2002), este tipo de análisis reduce la dimensionalidad de un conjunto de datos que consta de un gran número de variables interrelacionadas, al tiempo que conserva tanto como sea posible de la variación presente en la que se establecen los datos. Esto se consigue mediante la transformación a un nuevo conjunto de variables, los componentes principales (PC), que son no correlacionados, y que son ordenados, de modo que unos pocos de los primeros conservan la mayor parte de la variación presente en todas las variables originales.

Primeramente se llevó a cabo una organización de los datos meteorológicos diarios. Para su análisis se cogieron los datos meteorológicos diarios 15, 90 y 170 días antes de ser cogida cada muestra, y se calcularon los parámetros que aparecen en la tabla 4. Se eligieron estos intervalos de días para averiguar qué variables meteorológicas afectan más a las propiedades físico-químicas a lo largo del tiempo y así poder ver si existe un factor determinante. Se vio necesario elegir tres intervalos para poder analizar las diferencias o semejanzas de las variables. Los 15 días se eligieron para poder ver si hay algún tipo de fenómeno meteorológico extraño en el momento de recoger las muestras o en los días próximos. Los 90 días son un intervalo medio entre los otros dos. Por último se escogieron 170 días ya que es el intervalo máximo de días redondeado entre la recogida de una muestra y otra anterior, así podemos estudiar las variables meteorológicas anteriores a cada muestra sin que otra muestra se vea reflejada en esos intervalos de días.

Parámetro	Unidades
pH	ud pH
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$
Alcalinidad TAC	mg/L CaCO_3
Nitratos	mg/L NO_3
Cloruros	mg/L Cl
Sulfatos	mg/L SO_4
Fluoruros	mg/L F

Tabla 6: Parámetros válidos comunes en las cuatro muestras. Fuente: Elaboración propia.

Para los datos físico-químicos se organizaron de forma que el mínimo de datos de cada parámetro estuviesen presentes en las cuatro muestras y no estuvieran dentro de un rango de valores. A partir de esta organización nos dejó 7 parámetros válidos (tabla 6) de los 13 parámetros comunes (tabla 5) entre las cuatro muestras.

Para realizar el Análisis PCA se ha utilizado el programa informático Ginkgo Multivariate Analysis Sistem versión 1.7. Este programa forma parte de los cuatro (Ginkgo, Quercus, Fagus y Yucca) que incluye el paquete de software VegAna (edición de Vegetación y Análisis) procedente de la universidad de Barcelona, y orientado al almacenamiento, manejo y análisis de datos ecológicos.

3. RESULTADOS

3.1. DATOS METEOROLÓGICOS

3.1.1. PCA DE DATOS METEOROLÓGICOS 15 DÍAS ANTES DE RECOGER LA MUESTRA.

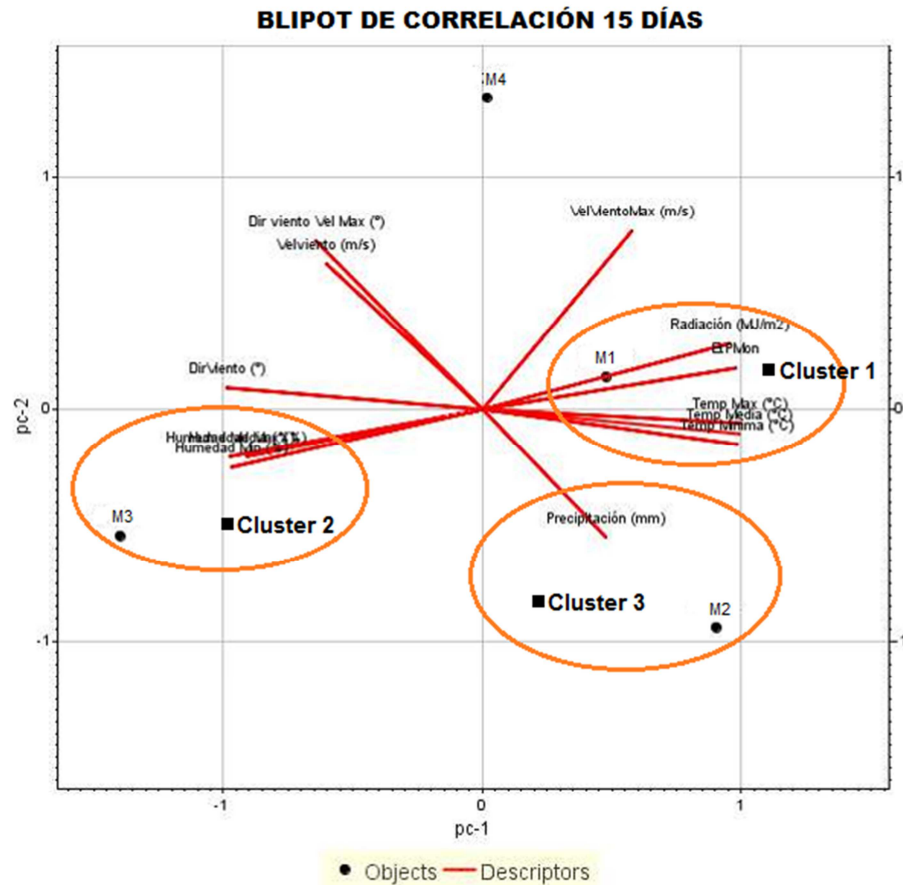


Figura 3: Análisis de Componentes Principales para las variables meteorológicas recogidas 15 días antes de tomar la muestra. Cluster 1: M1, Cluster 2: M2, Cluster 3: M3. Fuente: Elaboración propia.

	EV	%Var Total	%Var Total Acumulada
EV-1	9,8495	75,7653	75,7653
EV-2	2,1221	16,3236	92,0889
EV-3	1,0284	7,9111	100,0000

Tabla 7: valores de los ejes y varianza total del Análisis de Componentes Principales para las variables meteorológicas recogidas 15 días antes de tomar la muestra. Fuente: Elaboración propia.

El PCA para las 13 variables meteorológicas de los 15 días anteriores a que las muestras sean recogidas muestra si ha existido algún tipo de fenómeno

meteorológico extraordinario o por el contrario sirve para estudiar la relación de las variables con los demás intervalos. Se muestran 3 Ejes-value (EV) con los que estaría el 100% de la varianza acumulada explicada. Sin embargo, con los dos primeros ejes se consigue explicar el 92,0889% de la varianza acumulada.

Se pueden explicar 3 clusters.

- Cluster 1: junio 2014, radiación, evotranspiración, temp media, temp máxima y temp mínima
- Cluster 2: diciembre 2014, humedad máxima, humedad mínima, humedad media.
- Cluster 3: julio 2015, precipitación.

3.1.2. PCA DE DATOS METEOROLÓGICOS 90 DÍAS ANTES DE RECOGER LA MUESTRA.

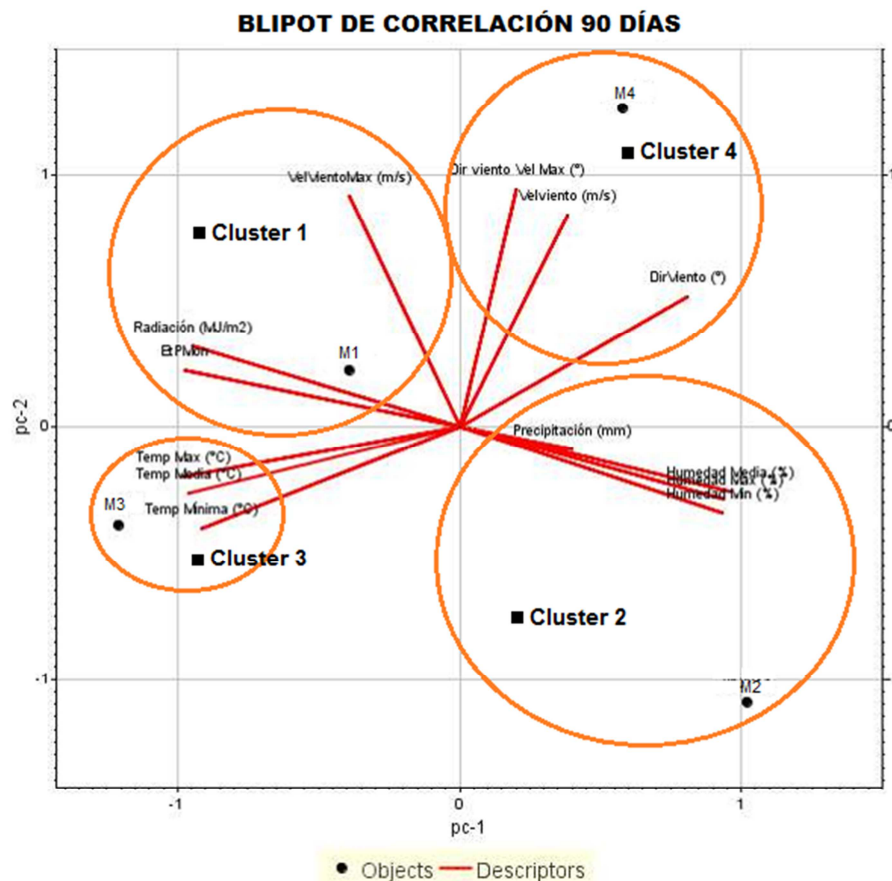


Figura 4: Análisis de Componentes Principales para las variables meteorológicas recogidas 90 días antes de tomar la muestra. Cluster 1: M1, Cluster 2: M2, Cluster 3: M3, Cluster 4: M4. Fuente: Elaboración propia.

	EV	%Var Total	%Var Total Acumulada
EV-1	8,3993	64,6099	64,6099
EV-2	3,4118	26,2450	90,8548
EV-3	1,889	9,1452	100,0000

Tabla 8: valores de los ejes y varianza total del Análisis de Componentes Principales para las variables meteorológicas recogidas 90 días antes de tomar la muestra. Fuente: Elaboración propia.

El PCA para las 13 variables meteorológicas de los 90 días anteriores a que las muestras sean recogidas muestra la relación de las variables meteorológicas de un intervalo medio de tiempo con las físico-químicas. Se muestran 3 Ejes-value (EV) con los que estaría el 100% de la varianza acumulada explicada. Sin embargo, con los dos primeros ejes se consigue explicar el 90.8548% de la varianza acumulada.

Se pueden explicar 4 clusters:

- Cluster 1: junio 2014, velocidad del viento máxima, evotranspiración y radiación.
- Cluster 2: diciembre 2014, humedad mínima, humedad media, humedad máxima y precipitación.
- Cluster 3: julio 2015, temp media, temp mínima y temp máxima.
- Cluster 4: abril 2016, dirección del viento, dirección del viento máxima, velocidad del viento.

3.1.3. PCA DE DATOS METEOROLÓGICOS 170 DÍAS ANTES DE RECOGER LA MUESTRA.

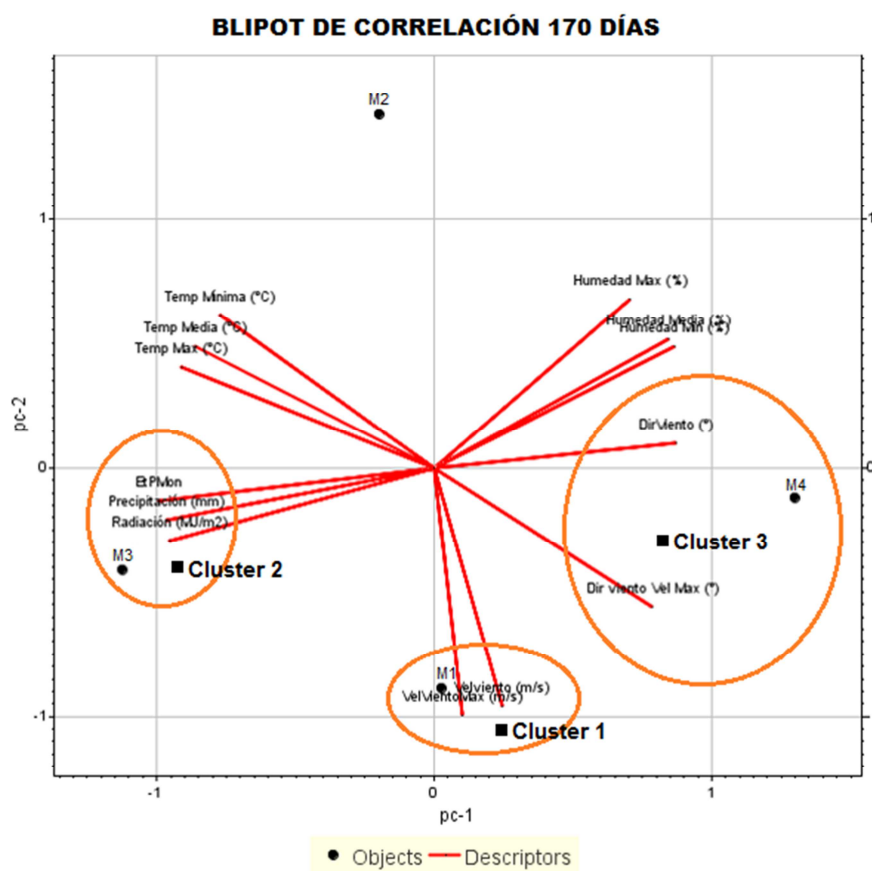


Figura 5: Análisis de Componentes Principales para las variables meteorológicas recogidas 170 días antes de tomar la muestra. Cluster 1: M1, Cluster 2: M3, Cluster 3: M4. Fuente: Elaboración propia.

	EV	%Var Total	%Var Total Acumulada
EV-1	8,3976	64,5970	64,5970
EV-2	4,1175	31,6728	96,2698
EV-3	0,4849	3,7302	100,0000

Tabla 9: valores de los ejes y varianza total del Análisis de Componentes Principales para las variables meteorológicas recogidas 170 días antes de tomar la muestra. Fuente: Elaboración propia.

El PCA para las 13 variables meteorológicas de los 170 días anteriores a que las muestras sean recogidas muestra las variables meteorológicas que pueden afectar más a largo plazo a las variables físico químicas. Se muestran 3 Ejes-value (EV) con los que estaría el 100% de la varianza acumulada explicada. Sin embargo, con los dos primeros ejes se consigue explicar el 96.2698% de la varianza acumulada.

Se pueden explicar 3 clusters:

- Cluster 1: junio 2014, velocidad del viento máxima, velocidad del viento, dirección del viento máxima.
- Cluster 2: julio 2015, evotranspiración, radiación y precipitación.
- Cluster 3: abril 2016, dirección del viento, humedad máxima, humedad mínima y humedad media.

Respecto a los PCA mostrados, podemos ver que las variables meteorológicas recogidas 90 días antes son bastante parecidas para todas las muestras. Así coinciden varias variables para el verano de 2014, el verano de 2015 y el verano de 2016. El PCA que más potencial presenta para explicar los datos físico-químicos de la calidad del agua en nuestro caso sería el de 90 días, ya que muestra variables parecidas a las que se muestran en el de 15 días pero están mejor situadas en lo que respecta al tiempo, ya que en 90 días se abarcan más datos.

3.2. DATOS FÍSICO-QUÍMICOS

3.2.1. DATOS NUMÉRICOS

PARÁMETRO	UNIDADES	M1	M2	M3	M4
*pH	ud pH	8,4 ± 0,1	8,2 ± 0,1	8,84	8,62
*conductividad	μS/cm	5540 ± 10%	6530 ± 10%	4.830	5.220
***turbidez	ntu	n.d	n.d	12,18	9,22
**DQO	mg/L O ₂	n.d	n.d	79	50
**TOC	mg/L C	n.d	n.d	9,64	10,68
*calcio	mg/L CaCO ₃	n.d	n.d	1.240,00	1.320,00
	mg/L Ca	>500 ± 10%	> 500 ± 10%	496,72	529,00
*magnesio	mg/L Mg	>100 ± 14%	> 100 ± 14%	840,44	864,87
*dureza	mg/L CaCO ₃	>1600 ± 3%	> 1600 ± 3%	4.659,96	4.884,37
sodio	mg/L Na	116 ± 16%	137 ± 16%	n.d	n.d
potasio	mg/L K	70,4 ± 6%	69,3 ± 6%	n.d	n.d
carbonatos	mg/L CaCO ₃	< 5 ± 14%	< 5 ± 14%	n.d	n.d
bicarbonatos	mg/L CaCO ₃	143 ± 14%	170 ± 14%	n.d	n.d
*alcalinidad	mg/L CaCO ₃	< 5 ± 14%	< 5 ± 14%	55	50
TA					
*alcalinidad	mg/L CaCO ₃	143 ± 14%	170 ± 14%	137,48	160
TAC					
*cloruros	mg/L Cl	431 ± 6%	517 ± 6%	494,50	561,38
*sulfatos	mg/L SO ₄	3620 ± 3%	4197 ± 3%	3.800,98	3.973,75
**fosfatos	mg/L PO ₄	n.d	n.d	n.d	n.d
*nitratos	mg/L NO ₃	111 ± 7%	139 ± 7%	135,30	154,54
*nitritos	mg/L NO ₂	< 3,1 ± 8%	< 4,7 ± 8%	0,40	0,48
*fluoruros	mg/L F	11,0 ± 14%	13,0 ± 14%	12,25	13,30
**bromuros	mg/L Br	n.d	n.d	9,15	10,25
boro	mg/L B	14,6	3,58		
*residuo seco	mg/L	> 5000 ± 20%	> 5000 ± 20%	7.250	9.180
**sólidos en suspensión	mg/L	n.d	n.d	0,0344	0,032
silicio	mg/L Si	2,3	3,58	n.d	n.d
hierro	mg/L Fe	0,24	0,2	n.d	n.d
cobalto	μg/L Co	< 2	< 2	n.d	n.d
aluminio	mg/L Al	< 0,05	< 0,05	n.d	n.d

manganeso	mg/L Mn	< 0,1	< 0,1	n.d	n.d
cromo	mg/L Cr	< 0,3	< 0,3	n.d	n.d
arsénico	µg/L As	14	27	n.d	n.d
mercurio	µg/L Hg	<0,05	<0,05	n.d	n.d
níquel	mg/L Ni	< 0,2	< 0,2	n.d	n.d
cobre	mg/L Cu	< 0,1	< 0,1	n.d	n.d
cinc	mg/L Zn	< 0,05	< 0,05	n.d	n.d
cadmio	mg/L Cd	< 0,05	< 0,05	n.d	n.d
plomo	mg/L Pb	< 0,4	< 0,4	n.d	n.d
estroncio	µg/L Sr	7300	7600	n.d	n.d
antimonio	µg/L Sb	< 2	< 2	n.d	n.d
molibdeno	µg/L Mo	1600	1400	n.d	n.d
uranio	µg/L U	160 ± 16	n.d	n.d	n.d

Tabla 10: Datos físico-químicos de las muestras. Donde, M1: verano 2014, M2: invierno 2014, M3: verano 2015 y M4: verano 2016. n.d: No determinado. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. SERIES TEMPORALES

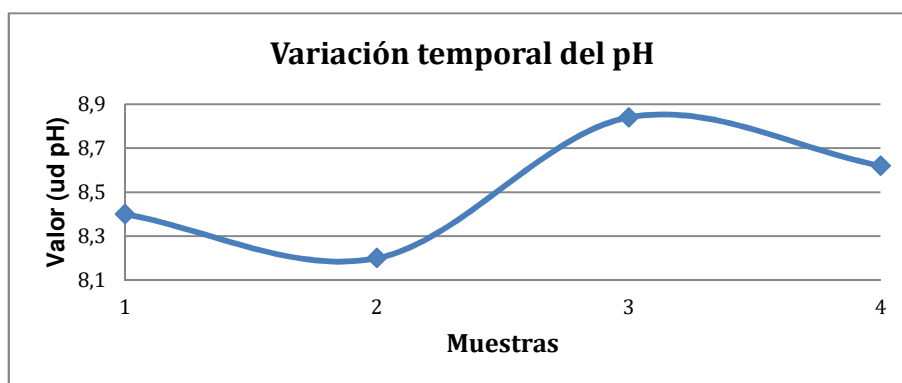


Figura 6: Variación temporal del pH. Fuente: Elaboración propia.

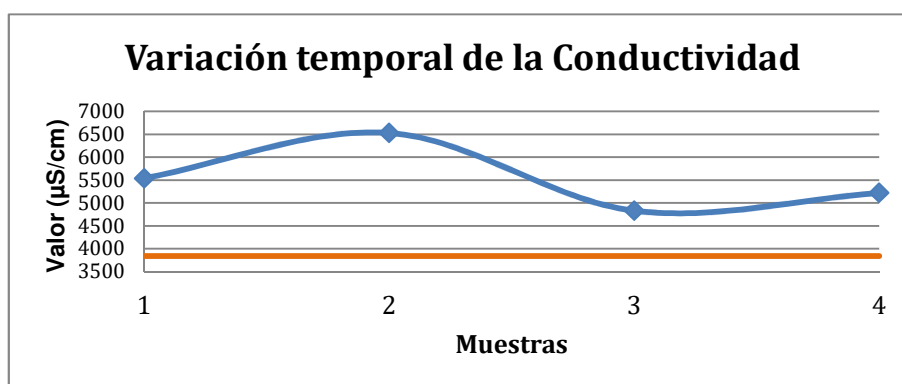


Figura 7: Variación temporal de la conductividad. La línea horizontal marca la concentración de conductividad en una laguna de yesos natural (Anexo I). Fuente: Elaboración propia.

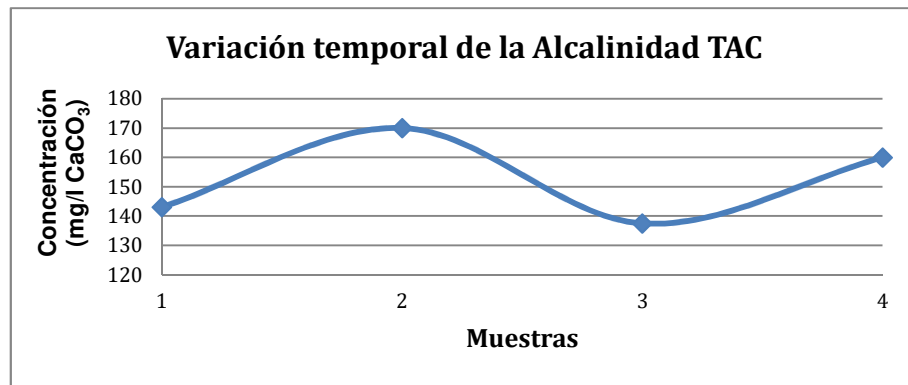


Figura 8: Variación temporal de la alcalinidad TAC. Fuente: Elaboración propia.

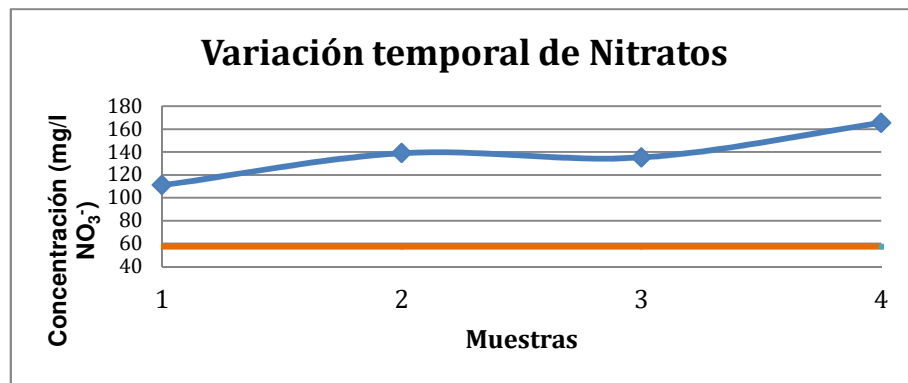


Figura 9: Variación temporal de la concentración de nitratos. La línea horizontal marca la concentración de nitratos en una laguna de yesos natural (Anexo I). Fuente: Elaboración propia.

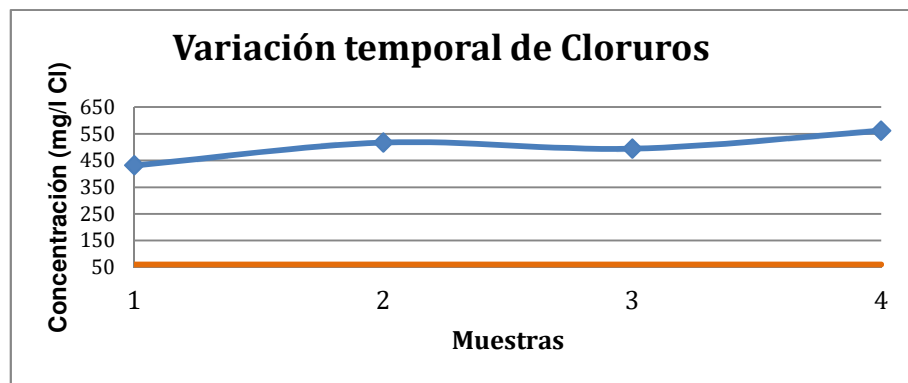


Figura 10: Variación temporal de la concentración de cloruros. La línea horizontal marca la concentración de cloruros en una laguna de yesos natural (Anexo I). Fuente: Elaboración propia.

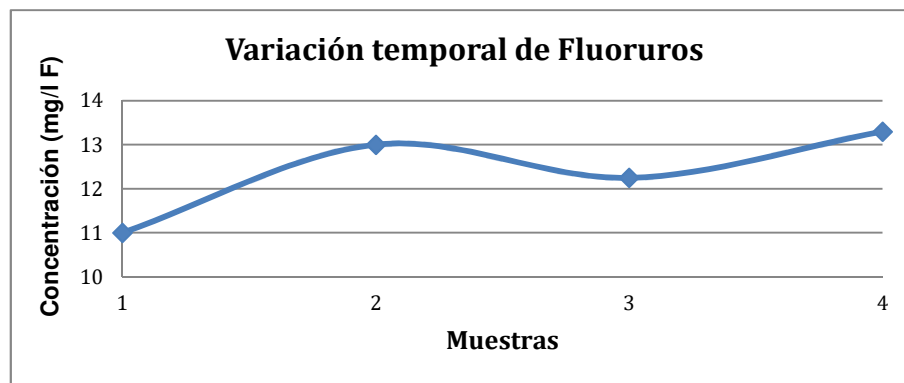


Figura 11: Variación temporal de la concentración de fluoruros. Fuente: Elaboración propia.

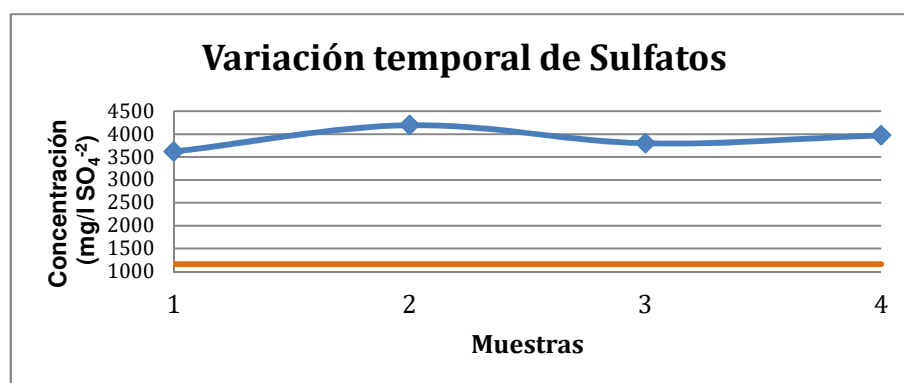


Figura 12: Variación temporal de la concentración de sulfatos. La línea horizontal marca la concentración de sulfatos en una laguna de yesos natural (Anexo I). Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos muestran una tendencia ascendente para casi todos los parámetros físico-químicos, como son sulfatos, fluoruros, cloruros, nitratos, alcalinidad TAC y conductividad es ascendente. A causa de estos resultados podemos determinar que a medida que pasa el tiempo la carga de nutrientes en la laguna es mayor. Esto se puede entender de dos maneras, como que se produce acumulación de estos nutrientes o que debido al poco tiempo que lleva establecida la laguna, la cantidad de elementos disueltos está evolucionando de manera creciente. En el caso del pH, la gráfica nos muestra que los valores de este son inversos a los de las demás gráficas. El segundo muestreo, M2, nos muestra un valor más alto en todos los casos, menos en la gráfica del pH que es inversa a las demás gráficas debido a que esta muestra se tomó en invierno.

3.2.3. PCA DE DATOS FÍSICO-QUÍMICOS.

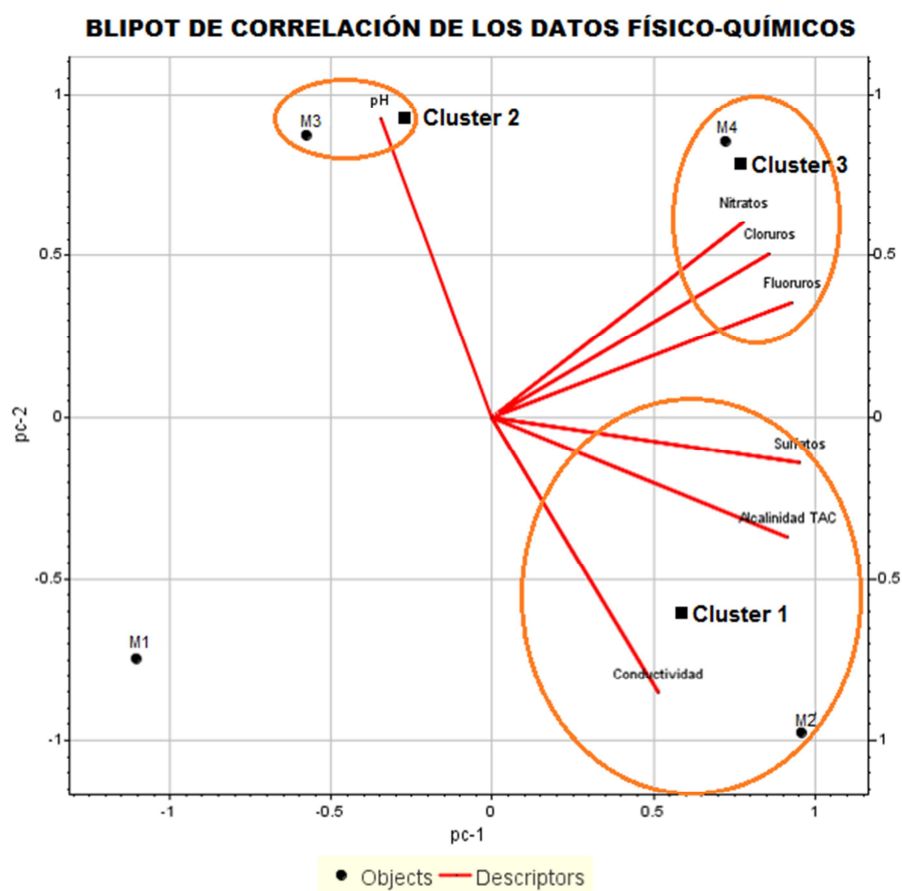


Figura 13: Análisis de Componentes Principales para las variables físico-químicas. Fuente: Elaboración propia.

	EV	%Var Total	%Var Total Acumulada
EV-1	3,6100	60,1663	60,1663
EV-2	2,2589	37,6485	97,8148
EV-3	0,1311	2,1852	100,0000

Tabla 11: Valores de los ejes y varianza total del Análisis de Componentes Principales para las variables físico-químicas. Fuente: Elaboración propia.

El PCA para las 6 variables físico-químicas muestra 3 Ejes-value con los (EV) que estaría el 100% de la varianza acumulada explicada. Sin embargo, con los dos primeros ejes se consigue explicar el 97.8148% de la varianza acumulada.

Se pueden explicar 3 clusters:

- Cluster 1: diciembre 2014, conductividad, alcalinidad y sulfatos.
- Cluster 2: julio 2015, pH.
- Cluster 3: abril 2016, nitratos, cloruros y fluoruros.

4. DISCUSIÓN

La laguna situada en el vertedero de ``Corta Barrasa`` tiene como iones predominantes los sulfatos (3.620 – 4.197 mg/l SO_4^{-2}). Esto se debe al continuo contacto con materiales yesíferos artificiales (Mancebo, 2008). Según Telesca et al. (2013) los yesos de desulfuración son bastantes solubles, 0,256g cada 100g en agua a 20°C, lo que provoca que, a causa de esa disolución cuando el yeso de desulfuración entra en contacto con el agua, se hidrate y se separen sus complejos químicos, aportando sulfatos, entre otros iones, al agua de la laguna.

Una solución para eliminar esta alta cantidad de sulfatos es utilizar bacterias sulfato reductoras (BSR). Glombitza (2001) utiliza bacterias *Desulfovibrio sp.* para reducir el sulfato en una mina de lignito en un agua con una concentración de más de 2.100 mg/l SO_4^{-2} y un pH 5. Este método geoquímico se realizó a partir de cultivar primero en el laboratorio estas bacterias con agua de la mina. Más tarde se introdujeron las bacterias en lechos fijos de cerámica porosa. Por último se bombeo el agua de la mina, anteriormente tratada con Na_2S para eliminar metales pesados, a través de los lechos donde se encontraban las bacterias, lo que produjo, la eliminación total de metales pesados y la reducción de los sulfatos a 134 mg SO_4^{-2} /(l.h), además el pH aumento hasta 6,9. Esta adición de Na_2S en nuestro caso no sería necesaria, debido a la cantidad de sulfatos que contiene el agua y a que los metales pesados no ocasionan problemas. En 20 horas el sulfato pasó de 2.100 a 700 mg/l SO_4^{-2} . Según Andrade (2010), las bacterias sulfato reductoras desempeñan adecuadamente sus actividades metabólicas entre pH mayores a

4 hasta pH ligeramente básicos. El pH que nosotros tenemos es ligeramente básico, por lo que primero tendríamos que saber cómo afecta esto al funcionamiento de las bacterias sulfato reductoras, debido a que como en el estudio anterior el pH pueda aumentar un poco más en el proceso. Por esto se recomienda hacer un estudio sobre cómo afectaría nuestro pH a las bacterias sulfato reductoras en condiciones similares a las de nuestra laguna.

Además se ha demostrado que estas bacterias funcionan tanto en medios anaerobios como en el de Gomblitz, (2001), como en medios aerobios como el de Okabe et al. (1999), el cual utiliza estas bacterias en reactores de discos rotativos sumergidos para eliminar sulfatos en aguas residuales. Para nuestro caso utilizaríamos estas bacterias sulfato reductoras establecidas en lechos fijos de cerámica porosa, debido a la similitud con nuestro caso. Una desventaja de las bacterias sulfato reductoras es que en su proceso de respiración reduce el sulfato a H_2S , el cual no es incorporado por la biomasa, pero es corrosivo y reacciona en presencia de metales. Aunque redujéramos la cantidad de sulfatos los materiales de relleno seguirían aportándolo por lo que se recomienda aislar el fondo de la laguna para evitar que una vez eliminado el carácter negativo de estos sulfatos, se vuelva a aportar por parte de los materiales. Este aislamiento se produciría a través de la instalación en el fondo de la laguna de una geomembrana de polietileno de muy baja densidad (PEMBD) ya que ha dado buenos resultados en el estudio de Blanco et al. (2010).

Respecto a los metales según Li et al. (2015) una desventaja de usar yesos de desulfuración es que contienen concentraciones de metales pesados. Según la directiva 98/83CE relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano todas las concentraciones para los metales de nuestra agua entran en el rango válido, menos la del arsénico ($14 - 27 \mu g/L$ As). Nuestro valor es un poco superior al indicado, $10 \mu g/L$ As, pero no es preocupante ya que Smedley y Kinniburgh, (2002) indican que en explotaciones mineras se suelen dar valores entre $100 - 500 \mu g/L$ As. Por lo que en nuestro caso la concentración de metales pesados no es problema.

El ion Ca^{+2} está muy presente en las muestras ya que lo aportan los yesos de desulfuración, al igual que los sulfatos, por disolución de estos ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) (Rodríguez y Velasco, 2005). Además en los análisis de los tres componentes de relleno de la mina con los que está en contacto la laguna

contienen una alta cantidad de calcio (496,72 – 529,00 mg/l Ca). Los yesos de desulfuración aportan 184 mg/kg de Ca. La cantidad de calcio en nuestra agua es similar a la cantidad de calcio en la laguna de yesos naturales, por lo que podemos deducir que la cantidad de calcio en nuestra agua es normal. Esto se debe a la disponibilidad de iones por efecto del pH. A valores de pH entre 7 y 9 el ion HCO_3^- predomina en el agua, por lo que una parte del calcio reacciona para formar los carbonatos y bicarbonatos mientras los sulfatos no reaccionan con ningún otro complejo químico.

Según Alonso, (1998) el magnesio es el catión más importante en la alcalinidad, por lo que una alta alcalinidad conlleva una alta concentración de Mg^{+2} , como en nuestro caso (840,44 – 864,87 mg/l Mg). Este catión, junto con el calcio, es el responsable de lo que se conoce como dureza total. También indica que la relación $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^{+2}$ es propia de aguas dulces, duras, y de ambientes kársticos. Una dureza elevada representa el principal sistema amortiguador del agua dulce como neutralizador de ácidos y bases en el agua (Rodríguez, 2010), este efecto se conoce como efecto tampón. El efecto tampón es la mezcla en concentraciones relativamente elevadas de un ácido y base conjugada, en nuestro caso formando un sistema carbonato-bicarbonato que actúa manteniendo el pH, absorbiendo y neutralizando ácidos y bases (Fernandez y Sanchez, 2003).

Además Bogart et al. (2016), indica que la alcalinidad se determina por la cantidad de Ca^{+2} , Mg^{+2} , CO_3^{-2} y HCO_3^- . En su estudio nos muestra que el 100% de los individuos de la especie *Daphia magna* S., murió con una exposición de 96 horas a un agua que contenía 600 mg/l de CaCO_3 , como dureza del agua y 420 mg/l de CaCO_3 como alcalinidad. Algunos lugares donde se han obtenido unos valores de alcalinidad y dureza del agua extremos, superiores a 300 mg/l CaCO_3 y 1.500 mg/l CaCO_3 respectivamente son, por ejemplo, en la minería superficial, explotaciones de gas natural o en la extracción de arenas oleaginosas (Kuchapski y Rasmussen, 2015). En nuestro caso triplicamos el valor de la dureza, ya que tenemos alrededor de 4.700 mg/l de CaCO_3 , un agua muy dura, pero para la alcalinidad no es un valor tan excesivo, aun así alto (137,48 – 170 mg/l CaCO_3). Un proceso para eliminar la dureza del agua, es la descalcificación mediante resinas de intercambio iónico. Lo más habitual es utilizar resinas de intercambio catiónico donde intercambian iones sodio por los iones de calcio y magnesio, causantes de la dureza. Al

reducir estos iones también se reducen los valores de pH y alcalinidad (Rodríguez y Rodríguez, 2010). En nuestro caso, aunque el valor sea muy alto, los efectos que produce no son muy notorios por lo que no tomaremos medidas, ya que consideramos más importante eliminar otros problemas que impiden la funcionalidad del ecosistema, los cuales son la alta cantidad en el agua de sulfatos y nitratos.

Uno de los nutrientes más abundantes en la laguna, son los nitratos. Esto nos puede hacer pensar que esta eutrofizada debido a la abundancia de nitratos, aunque el fosforo no aparezca. Además como se puede observar en la figuras del Anexo II, el color del agua es bastante verdoso, lo que puede indicar un alto nivel de clorofila-a, o que el color del agua se deba a, por ejemplo, la cantidad de algas. La acumulación de nitratos según Robles (2012), en una zona de clima mediterráneo continentalizado con suelos pobres y topografía accidentada donde existen explotaciones agrarias de olivar por donde se estima una perdida natural de nitrógeno por escorrentía de 5 a 10 kg Ntotal/Hectárea/año, es atribuida principalmente a las inadecuadas prácticas agrícolas y ganaderas. Si nos centramos en el ámbito agrícola, la fuente fundamental de los nitratos proviene de la aplicación excesiva o inadecuada de fertilizantes nitrogenados orgánicos o minerales. Las aguas de este estudio se encuentran entre los 6 y 27 mg/l de NO_3^- , cantidad muy inferior a la nuestra. En la directiva 91/676/CEE se establece el valor límite de 50 mg/l de NO_3^- , para aguas afectadas por la contaminación por nitratos procedentes de fuentes agrarias o en riesgo de estarlo.

En nuestro caso la abundante cantidad de nitratos (111 – 165,54 mg/l NO_3^-) se puede dar debido a que la laguna recoge todas las aguas superficiales circundantes mediante dos canales. Según Yuan, (2009) las barreras de vegetación juegan un importante papel en la mitigación de los impactos derivados de la actividad agraria sobre la calidad de los ecosistemas acuáticos. Nos muestra que con una franja de 0,7 m de espesor se eliminaron un 50% de los contaminantes, entre ellos el 54% de los nitratos. La eliminación de estos contaminantes también depende del tipo terreno y vegetación que se establece en la barrera.

En el caso de los nitritos la legislación española establece un máximo de 0,1 mg/l, lo que en nuestro caso también superamos (0,4 – 4,7 mg/l NO₂⁻) y lo cual produce toxicidad en muchos organismos. Al igual que el nitrato su origen proviene de la utilización de fertilizantes en la agricultura (Tang et al. 2016).

Podemos establecer la cadena trófica que podemos encontrar en un ecosistema lagunar con la información que nos aporta la figura 19. Aplicada está a nuestro caso, la cadena trófica constaría de, unos productores primarios como las algas de las que los renacuajos se alimentan. Cuando los renacuajos pasan a ser ranas, probablemente *Pelophylax perezi* S. (rana común) ya que su distribución geográfica abarca toda la Península Ibérica y el sur de Francia, dato observado en nuestra laguna, estas pasan a ser omnívoras y pueden alimentarse sobre todo de dípteros, coleópteros y himenópteros. Esta especie de rana no es exigente con la calidad del agua, pudiendo vivir en agua eutróficas e incluso con un cierto grado de contaminación xenobiótica. Su único factor limitante es la ausencia de agua (Pleguezuelos, 2004). El máximo exponente de la cadena trófica sería algún depredador que se alimentara de ranas, los más comunes en nuestra laguna puede ser alguna ave, rapaces, o algún reptil, serpientes.

En el Anexo I se comparan los resultados obtenidos de la laguna “Corta Barrasa” con una laguna de yesos natural. En esa comparación podemos comparar factores como sulfatos, nitratos, nitritos, cloruros, conductividad eléctrica y calcio. En algunos parámetros físico-químicos, los resultados son bastantes similares como por ejemplo para los nitritos y la concentración de calcio. Los demás parámetros comparables de nuestra laguna, situada en yesos de desulfuración, son bastante más altos. Esto es debido a la artificialidad de los yesos y su pureza.

Si comparamos la cantidad de cloruros de yesos en aguas naturales (46 – 60 mg/l Cl), con la cantidad de cloruros en nuestra laguna (431 – 561 mg/l Cl) podemos ver que en nuestra agua hay muchos más cloruros. La alta cantidad de este elemento se atribuye al porcentaje que aportan por parte de las cenizas. Según de la Grée et al. (2016) las cenizas, provenientes de carbón, contienen 1.000 mg/kg de Cl. Estos cloruros provienen de partículas de halita (NaCl). De acuerdo con (Landfill Ban Decree, 2012) establece un rango entre 800 – 15.000 mg/kg de Cl, el cual indica que no es peligroso, por lo que la cantidad de cloro en nuestro caso no es peligrosa.

En todas las muestras la conductividad eléctrica ronda los $5000\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos niveles en general son más altos que los que cabría esperar de una laguna de agua dulce, como los del estudio de Millán et al (2011). Según Soria et al. (1987) la concentración de cloruros está muy relacionada con la conductividad de las aguas y en nuestro caso la cantidad de cloruros es alta como hemos explicado anteriormente.

Así mismo podemos concluir con lo analizado en los resultados que el viento influye en los nitratos, cloruros y fluoruros. Según Margalef (1983), la acción del viento sobre la superficie del agua determina estructuras de circulación de diferente tamaño, conocidas generalmente como células de Langmuir. Normalmente se forman rodillos cuyo eje se extiende en la dirección del viento y que giran en sentidos alternos. El diámetro máximo de los rodillos en el sentido horizontal suele ser de unas decenas de metros. Estos remolinos hacen que estos parámetros físico-químicos nombrados anteriormente no precipiten y queden suspendidos en el agua de acuerdo con lo que comenta (Elosegi, 2009) que la energía del viento remueve los nutrientes del lago para ponerlo a disposición de los productores primarios, en nuestro caso algas, probablemente verdes debido al color del agua, ya que se observaron algunos anfibios, como ranas comunes, que en sus primeras fases se alimentan de estas. Estos parámetros físico-químicos van aumentando a lo largo de los años por lo que se está produciendo una acumulación de los mismos.

Respecto a la humedad y pluviometría, los resultados nos muestran que influye en la conductividad, alcalinidad y sulfatos. Zonas donde encontramos lagos con baja alcalinidad, son zonas en las que se produce una pluviometría abundante. En dichas zonas la mayoría de carbonatos expuestos y disponibles se han disuelto y han sido lavados a lo largo del tiempo (Verma, 1998). En nuestro caso la pluviometría es más bien baja lo que ayuda a que alcalinidad sea alta. La afección de la alcalinidad en nuestro caso se puede notar en el carácter básico que tiene el agua de la laguna y la cantidad de iones Mg^{+2} y Ca^{+2} . Los sulfatos también guardan una clara relación con la pluviometría por lo que se ha explicado antes sobre la disolución de estos en presencia de agua.

Con estos resultados podemos concluir que algunas variables meteorológicas como son la pluviometría y el viento afectan notablemente a la composición físico-química de las aguas de la laguna.

Respecto a la tendencia ascendente de la concentración de los nutrientes tenemos dos teorías. La primera teoría estaría basada en que los nutrientes se van acumulando en la laguna a lo largo del tiempo. El estudio de Vicente et al. (2006) indica que las altas concentraciones de nutrientes en el lago Honda, se mantienen debido a la resuspensión de los sedimentos favorecida por su morfometría, régimen hídrico y granulometría de sedimentos. Este lago es eutrófico debido a la alta concentración de nitratos que recoge de las aguas superficiales, donde el viento también tiene importancia, su granulometría es arcillo-limosa y la pendiente de sus laderas es importante. Por todo esto podemos decir que nuestro caso es similar, por lo que, la resuspensión de los sedimentos puede influir en la acumulación de nutrientes.

La segunda teoría que manejamos y que creemos que es más representativa de nuestro caso, muestra que la tendencia creciente en el aumento de la concentración de los nutrientes se debe a que la laguna se encuentra aún en una etapa sucesional todavía inicial y está evolucionando, asimilando los elementos que se encuentran en los materiales de relleno. La sucesión ecológica implica un incremento de la “información” (cantidad de energía, biomasa, o estructura viva e inanimada), desde los estados iniciales a los estados posteriores (Margalef 1997, Walker, 2005). Además, las fases tardías de la sucesión acumulan mayor cantidad energía, gracias a un menor nivel de perturbación que las iniciales, y, a su vez, estas fases tardías son más resistentes a las perturbaciones gracias al flujo de energía (Margalef 1997, Walker, 2005). Se ha demostrado que nuestra laguna actualmente no es funcional, por lo que podemos deducir que, esta “información” no va aumentando y la laguna sigue aumentando la concentración de los elementos disponibles que aumentara hasta que el agua alcance su límite de saturación, que no son los mismos para cada elemento (Mancebo, 2008). Esto ocurrirá si no se produce ninguna actuación antes.

- Recomendaciones de restauración

Los ecosistemas acuáticos lagunares tiende a desarrollar transiciones entre un estado, “menos maduro” y “maduro” y viceversa. Según Margalef (1983), carece de sentido trabajar con el concepto de clímax en ecosistemas acuáticos, porque la dinámica de cambio es mucho más rápida y cíclica que en ecosistemas terrestres.

- Incremento de la heterogeneidad

En etapas o estadios tempranos del desarrollo de un ecosistema acuático, con poca cobertura vegetal, la heterogeneidad espacial es relativamente baja y conforme se coloniza el humedal por vegetación se crean zonas donde se acumula materia orgánica, y las orillas del humedal se hacen más curvilíneas (Comín, 2014). Por lo tanto crear esta heterogeneidad como paso inicial en nuestro caso es una fase importante para conseguir desarrollar la recuperación ecológica de la laguna.

Una manera de crear heterogeneidad en ecosistemas acuáticos es a través de la modificación de su morfología. Según Comín (2014), es mejor que la laguna tenga diferentes tipos de profundidad para que se creen diferentes microhábitats a pequeñas distancias entre si dentro de la laguna. Diferencias del 10% de profundidad del agua pueden significar pequeñas depresiones en el fondo y favorecer así la heterogeneidad ambiental. La topografía deber ser especialmente detallada en las orillas de la laguna porque en la mayoría de lagunas la altura de la columna de agua varía notablemente en las orillas de la laguna en cortas distancias horizontales. Es decir pequeñas variaciones del nivel del agua pueden suponer dejar sin inundar o variar la altura del agua por grandes extensiones del humedal (Comín, 2014). Por eso en nuestro caso a la hora de formar la laguna crearemos diferentes alturas en la cubeta, para fomentar la heterogeneidad.

- Reconstrucción geomorfológica

Para integrar la laguna en la restauración terrestre habría que modificarla geomorfológicamente y cambiarla de emplazamiento. Como podemos ver en el Anexo II, nuestra laguna cuenta con una pendiente alrededor del 133%, con una longitud de pendiente de 5 m. La ausencia de orilla se representa en toda la laguna menos en dos extremos donde existen unos pocos metros de orilla, uno de ellos utilizado para coger las muestras. Según Kaufmann et al. (2014), la forma de la orilla es crucial para el establecimiento de la biota y los procesos ecológicos en lagos. Margalef (1983) comenta que, en orillas donde la pendiente es muy alta, la concentración de la biomasa de micrófitos sumergidos disminuye. Según Duarte y Kalf (1986), las orillas con una pendiente suave permiten la deposición de materiales finos, mientras que las de pendiente inclinada son principalmente áreas de erosión y transporte. En nuestro caso todas las laderas de la laguna están formadas por

pendientes inclinadas por lo que la erosión y el transporte son comunes. Esta erosión hace que el aporte de nutrientes por parte de los yesos al agua sea continuado y explica la alta cantidad de todos estos nutrientes. El transporte y sedimentación hacia las dos zonas de orilla de la laguna puede producir en el tiempo la colmatación de esta, por lo que la modificación geomorfológica es necesaria. El emplazamiento de la laguna sería en el último talud, el de menor altura, de la restauración terrestre, por lo que recibiría la escorrentía superficial de los demás taludes. En la formación de la nueva laguna se tendrán que crear orillas con pendientes suaves donde se favorezca la sedimentación y así la disolución de los materiales por parte de la erosión será menor.

- Reducción de sulfatos

La restauración de lagunas se puede llevar a cabo de muchas maneras diferentes. Un estudio de Jeppesen et al. (2007) nos muestra cómo mejorar la restauración de lagos a partir de su tamaño. En el estudio se dice que la mejor estrategia para restaurar lagos pequeños y largos, como sería nuestro caso, es la reducción externa de la carga de nutrientes. En párrafos anteriores hemos comentado que los sulfatos son un problema en nuestra laguna. Para hacer frente a este problema utilizaremos bacterias sulfato reductoras, que eliminen la cantidad de sulfato hasta conseguir un valor aceptable.

- Reducción de nitratos.

La formación de humedales según Comín et al. (2001) parece ser muy eficiente para eliminar el 50% del nitrógeno de las aguas superficiales de ecosistemas fluviales. Al igual que en el proyecto CREAMAgua se utiliza carrizo para rebajar la cantidad de nitratos y sulfatos en el agua. En este estudio se convirtió unos campos abandonados de arroz, situados en el valle del Ebro sobre suelos calcáreos, por lo que los suelos en los que se ubican tienen similitudes con los nuestros, en humedales y se utilizó revegetación espontánea. En tres años la especie dominante era *Phragmites australis* S., carrizo. En el momento en el que el carrizo se vuelve la especie dominante, la biomasa aumenta al igual que la sucesión del ecosistema. Una forma de disminuir la cantidad de nitratos en nuestra laguna sería plantando esta especie en las orillas de la laguna, para más tarde quitarla, cuando la cantidad de sulfato se haya reducido, debido a la bioacumulación y volverla a establecer en la orilla de la laguna para que actúe de filtro verde, ya que el agua de escorrentía no proviene solo de los canales.

El carrizo puede soportar bastante bien niveles moderados de salinidad en el agua y en el suelo, necesitando suelos encharcados. En el proyecto CREAMAgua se establece esta misma especie en suelos y aguas con características parecidas a las de nuestra laguna, por lo que la plantación de esta especie sería adecuada en nuestro caso. Se plantaría en toda la extensión de la orilla especies ya en crecimiento de carrizo donde la profundidad máxima del agua sea 5 dm. Así el carrizo tendría dos funciones, eliminar los nitratos contenidos en la laguna y actuar como filtro verde disminuyendo la cantidad de nitratos que entra en la laguna a través de correntia superficial.

La laguna además se encontraría alrededor suyo con la vegetación establecida en la recuperación terrestre. En nuestro caso al estar en el último talud la vegetación que corresponde es arbardinal y aljear de especies gipsófitas.

- Construcción de filtros verdes en los canales.

Como también se ha comentado, según Yuan (2009) las barreras de vegetación juegan un importante papel en la mitigación de los impactos derivados de la actividad agraria sobre la calidad de los ecosistemas acuáticos. Nos muestra que con una franja de 0,7 m de espesor se eliminaron un 50% de los contaminantes, entre ellos el 54% de los nitratos. Si se aumenta el ancho de esta franja a 8 m, la eliminación del nitrógeno orgánico aumenta su eficiencia hasta un 92%. La vegetación utilizada en este estudio son tiras de pasto o césped rígido. En nuestro caso para reducir la contaminación que llega a la laguna podemos utilizar como medida preventiva estas barreras de vegetación. Se plantaran barreras de 8 metros en el fondo los canales por donde llega el agua de escorrentía a la mina. Como estos canales están aislados de los demás materiales se utilizará un sustrato en el que las barreras de vegetación se encuentren cómodas.

- Futuras investigaciones.

Como datos a estudiar en futuros proyectos habría que incidir sobre la fase de eutrofización en la que se encuentra la laguna. En un estudio realizado por Franco et al. (2010), explican varios índices de eutrofización. El Índice del Estado Trófico (IET o TSI) es uno de los más utilizados y se basa en medir la transparencia entre 0, oligotrófico, o 100, hipertrófico, con un disco de Secchi. Un valor de TSI = 0 equivale a 64 m de profundidad y cada incremento de 10 m

en TSI representa una reducción del 50%. Un lago eutrófico estaría en un valor de TSI entre 60 y 90. Si lo midiéramos por concentración de clorofila, un lago eutrófico estaría entre 56 y 427 mg/m³. La medida de estos dos parámetros para futuros estudios sería conveniente.

5. CONCLUSIONES

- Los materiales de relleno, sobre todo los yesos de desulfuración, son los principales causantes de la mala calidad del agua, por la cantidad de sulfatos presentes en ella, debido a su composición y a su interacción con el agua.
 - Debido, también, a los yesos de desulfuración la cantidad de iones de calcio y magnesio en el agua son elevadas. Estos iones, a su vez, afectan al agua produciendo una alcalinidad alta, una dureza del agua muy elevada y un pH básico.
 - Los metales pesados en nuestro caso no son un problema ya que se encuentran entre los límites legales.
 - Los nitratos y nitritos, que pueden provenir de fertilizantes y fitosanitarios agrarios por escorrentía superficial, causan la segunda carga más importante de nutrientes sobre el agua.
 - Los yesos de desulfuración aportan una carga de nutrientes al agua mucho mayor a la aportada por los yesos naturales.
 - Se ha demostrado que algunos parámetros meteorológicos, como el viento y la pluviometría, muestran una clara influencia sobre determinadas propiedades físico-químicas del agua de la laguna.
- Recomendaciones de restauración.
- Se recomienda construir distintas profundidades en el fondo de la laguna, para crear heterogeneidad. Una vez construido el fondo de la laguna se recomienda su aislamiento con una geomembrana de polietileno de muy baja densidad para que no siga aportando sulfatos al agua.
 - Las laderas se construirían con pendientes suaves donde resaltará la sedimentación y con líneas irregulares, para favorecer también la heterogeneidad.

- El agua se debería pasar por filtros con bacterias sulfato reductoras, para disminuir la cantidad de sulfatos.
- Para disminuir los nitratos se recomienda la plantación de carrizo en las orillas de la laguna. Debido a la alta cantidad de nitratos, se prevé que, tengamos que quitar los carrizos plantados a causa de la bioacumulación, pero se volverían a plantar nuevos individuos de carrizo para reducir el nitrato que provenga de la escorrentía superficial.
- Por último se recomienda como medida preventiva plantar sobre los canales 8 metros de tiras de pastos para que actúen de filtros verdes.

6. AGRADECIMIENTOS

Quiero dar mis agradecimientos a las siguientes personas, ya que sin ellas, este trabajo no hubiera sido posible.

En primer lugar, agradecer a mi director José Miguel Castillejo, por todo el tiempo invertido, por su paciencia, sus conocimientos, sobre todo por el optimismo con el que me ha apoyado a lo largo de todas las fases de este trabajo y por permitir que hiciera este trabajo.

A José Manuel Nicolau por el interés y apoyo mostrado tanto en las prácticas como en la realización de este trabajo.

Quiero agradecer también a Endesa por facilitarme los datos.

Agradecer también a Natividad Miguel por prestarme el laboratorio para poder analizar las muestras y ayudarme en el análisis de las mismas.

Por ultimo a todas las compañeros que me han apoyado y acompañado en este viaje, sin olvidarme de mi familia que me ha estado apoyando en todos los momentos lo necesitara o no.

7. BIBLIOGRAFÍA

Álvarez-Campana, J. M., & Ramos, A. (2007). Restauración de minas de lignito. Los casos de As Pontes y Meirama (A Coruña, España). In *VIII Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Nuevas perspectivas para la protección y desarrollo del legado minero y geológico* (pp. 13-16).

Álvarez-Cobelas, M., Cirujano, S., Rojo, C., Rodrigo, M. A., Pina, E., Rodríguez-Murillo, J. C., & Montero, E. (2006). Effects of Changing Rainfall on the Limnology of a Mediterranean, Flowthrough-Seepage. Chain of Lakes. *International review of hydrobiology*, 91(5), 466-482.

Andrade Tovar, V. S. (2010). Evaluación del potencial de generación de sulfuro por la acción de las bacterias sulfato reductoras y sus posibles aplicaciones en el tratamiento de los drenajes ácidos de mina.

Annadotter, H., Cronberg, G., Aagren, R., Lundstedt, B., Nilsson, P. Å., & Ströbeck, S. (1999). Multiple techniques for lake restoration. In *The Ecological Bases for Lake and Reservoir Management* (pp. 77-85). Springer Netherlands.

Antón, A., & Lizaso, J. (2003). Nitritos, nitratos y nitrosaminas. *Fundisa. Artículos de divulgación*.

Blanco, M., Aguiar, E., Cea, J. D., Castillo, F., & Soriano, J. (2010). El polietileno en la impermeabilización de balsas. *Ing. Civil*, 159, 57-64.

Bogart, S. J., Woodman, S., Steinkey, D., Meays, C., & Pyle, G. G. (2016). Rapid changes in water hardness and alkalinity: Calcite formation is lethal to *Daphnia magna*. *Science of The Total Environment*, 559, 182-191.

Böhme, B., Steinbruch, F., Gloaguen, R., Heilmeyer, H., & Merkel, B. (2006). Geomorphology, hydrology, and ecology of Lake Urema, central Mozambique, with focus on lake extent changes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(15), 745-752.

Bradshaw, A. D. (1996). Underlying principles of restoration. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 53(S1), 3-9.

Brierley, B., & Harper, D. (1999). Ecological principles for management techniques in deeper reservoirs. *Hydrobiologia*, 395, 335-353.

Callahan, J. T. (1984). Long-term ecological research. *BioScience*, 34(6), 363-367.

Carpenter, S. R., & Lathrop, R. C. (1999). Lake restoration: capabilities and needs. In *The Ecological Bases for Lake and Reservoir Management* (pp. 19-28). Springer Netherlands.

Castillejo, J.M. (2016). Recomendaciones para la restauración del vertedero de yesos de desulfuración Corta Barrasa.

CEDEX. (2011). Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

Chen, L., C. Ramsier, J. Bigham, B. Slater, D. Kost, Y. B. Lee, and W. a. Dick. (2009). Oxidation of FGD-CaSO₃ and effect on soil chemical properties when applied to the soil surface. *Fuel* 88:1167–1172.

Comín, F. A. (2014). Manual de restauración de humedales en cuencas agrícolas. Proyecto EU Life09 ENV/ES/000431 (2011-2014)

Comín, F. A., Romero, J. A., Hernández, O., & Menéndez, M. (2001). Restoration of wetlands from abandoned rice fields for nutrient removal, and biological community and landscape diversity. *Restoration Ecology*, 9(2), 201-208.

Crisman, T. L., Mitraki, C., & Zalidis, G. (2005). Integrating vertical and horizontal approaches for management of shallow lakes and wetlands. *Ecological Engineering*, 24(4), 379-389.

Cuadrat, J. M. (1999). *El clima de Aragón*. Caja de Ahorros de la Inmaculada.

de la Grée, G. D., Florea, M. V. A., Keulen, A., & Brouwers, H. J. H. (2016). Contaminated biomass fly ashes—Characterization and treatment optimization for reuse as building materials. *Waste Management*, 49, 96-109.

Duarte, C. M., & Kalf, J. (1986). Littoral slope as a predictor of the maximum biomass of submerged macrophyte communities¹₂. *Limnol. Oceanogr*, 31(5), 1072-1080.

Eaton, A. D., & Franson, M. A. (2005). Water Environment Federation. *Standard methods for the examination of water & wastewater*. Washington (DC): American Public Health Association.

Elosegi, A. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Fundación BBVA.

Fernández, Y., & Sánchez, J. L. (2003). Efecto de una posible interacción entre el pH y la salinidad sobre el crecimiento de *Posidonia oceanica* (L.) Delile, 1813.

Florin, M., & Montes, C. (1999). Functional analysis and restoration of Mediterranean laguns in the Mancha Humeda Biosphere Reserve (Central Spain). *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 9(1), 97-109.

Franco, D. P. M., Manzano, J. Q., & Cuevas, A. L. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS*, 78, 25-33.

García-Guadalupe, M. E., Sánchez, H. U. R., Peña, Á. R. M., Concepción, F. O. G., & Espinosa, M. L. (2006). La contaminación atmosférica precursor de lluvia ácida en la zona metropolitana de Guadalajara (ZMG), Jalisco, México.

Glombitza, F. (2001). Treatment of acid lignite mine flooding water by means of microbial sulfate reduction. *Waste Management*, 21(2), 197-203.

González Izquierdo, M. (2013). Evaluación de materiales formadores de suelo en minas de carbón a cielo abierto sometidas a procesos de restauración ecológica.

Goldyn, R., Podsiadłowski, S., Dondajewska, R., & Kozak, A. (2014). The sustainable restoration of lakes—towards the challenges of the Water Framework Directive. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 14(1), 68-74.

Gulati, R. D., Pires, L. M. D., & Van Donk, E. (2008). Lake restoration studies: failures, bottlenecks and prospects of new ecotechnological measures. *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*, 38(3), 233-247.

Jackson, L. L., Lopoukhine, N., & Hillyard, D. (1995). Ecological restoration: a definition and comments. *Restoration Ecology*, 3(2), 71-75.

Jensen, F. B. (2003). Nitrite disrupts multiple physiological functions in aquatic animals. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 135(1), 9-24.

Jeppesen, E., Meerhoff, M., Jacobsen, B. A., Hansen, R. S., Søndergaard, M., Jensen, J. P., & Branco, C. W. C. (2007). Restoration of shallow lakes by nutrient control and biomanipulation—the successful strategy varies with lake size and climate. *Hydrobiologia*, 581(1), 269-285.

Jolliffe, I. (2002). *Principal component analysis*. John Wiley & Sons, Ltd.

Jorba, M., Romanyà, J., Rovira, P., Hereter, A., Josa, R., & Vallejo, R. (2002). La restauración ecológica aplicada a la minería a cielo abierto en Cataluña. *Ingeopres*, 106, 56-63.

Kaufmann, P. R., Peck, D. V., Paulsen, S. G., Seeliger, C. W., Hughes, R. M., Whittier, T. R., & Kamman, N. C. (2014). Lakeshore and littoral physical habitat structure in a national lakes assessment. *Lake and Reservoir Management*, 30(2), 192-215.

Knapp, A. K., Smith, M. D., Hobbie, S. E., Collins, S. L., Fahey, T. J., Hansen, G. J., ... & Shaver, G. R. (2012). Past, present, and future roles of long-term experiments in the LTER network. *BioScience*, 62(4), 377-389.

Kratz, T. K., Deegan, L. A., Harmon, M. E., & Lauenroth, W. K. (2003). Ecological variability in space and time: Insights gained from the US LTER program. *BioScience*, 53(1), 57-67.

Kuchapski, K. A., & Rasmussen, J. B. (2015). Surface coal mining influences on macroinvertebrate assemblages in streams of the Canadian Rocky Mountains. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 34(9), 2138-2148.

Li, X., Mao, Y., & Liu, X. (2015). Flue gas desulfurization gypsum application for enhancing the desalination of reclaimed tidal lands. *Ecological Engineering*, 82, 566-570.

Liu, C. Q., Lang, Y. C., Satake, H., Wu, J., & Li, S. L. (2008). Identification of anthropogenic and natural inputs of sulfate and chloride into the karstic ground water of Guiyang, SW China: combined $\delta^{37}\text{Cl}$ and $\delta^{34}\text{S}$ approach. *Environmental science & technology*, 42(15), 5421-5427.

Lövstedt, C. B., & Bengtsson, L. (2008). The role of non-prevailing wind direction on resuspension and redistribution of sediments in a shallow lake. *Aquatic Sciences*, 70(3), 304-313.

Malhotra, V. M., & Ramezaniapour, A. A. (1994). *Fly ash in concrete*. Canmet.

Mancebo, J. A. (2008). Karstología de yesos. Algunas aplicaciones en ingeniería civil. Departamento de ingeniería y morfología del terreno. Universidad politécnica de Madrid.

Margalef, R. (1983). *Limnología* (No. 504.45 MAR). Barcelona: Omega.

McCullough, C. D., & van Etten, E. J. (2011). Ecological restoration of novel lake districts: new approaches for new landscapes. *Mine Water and the Environment*, 30(4), 312-319.

Millán, A. (2004). Macroinvertebrados acuáticos de la rambla de Tabernas: endemismos e indicadores bióticos. Subdesiertos de Almería: naturaleza de cine, 273-288.

Peeters, E. T., Franken, R. J., Jeppesen, E., Moss, B., Bécares, E., Hansson, L. A.,... & Nöges, T. (2009). Assessing ecological quality of shallow lakes: Does knowledge of transparency suffice? *Basic and Applied Ecology*, 10(1), 89-96.

Pérez, A., & Torres, P. (2011). Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 10(2), 41-52.

Peña, J. L., Cuadrat, J. M., & Sánchez, M. (2002). El clima de la provincia de Teruel. *Cartilla turolense, Instituto de Estudios Turolenses (CSIC), Teruel*.

Pleguezuelos, J. M. (2004). *Atlas y libro rojo de los anfibios y reptiles de España* (p. 584). R. Márquez, & M. Lizana (Eds.). Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

Redman, C. L., Grove, J. M., & Kuby, L. H. (2004). Integrating social science into the long-term ecological research (LTER) network: social dimensions of ecological change and ecological dimensions of social change. *Ecosystems*, 7(2), 161-171.

Rivas-Martínez, S. (2008). Global bioclimatics (Clasificación bioclimática de la Tierra-versión 1 December 2008).

Robles, F. O. (2012). Aspectos técnicos del Proyecto LIFE+ EUTROMED, sobre prevención de la eutrofización provocada por nitrógeno agrícola en las aguas superficiales en clima mediterráneo.

Rodríguez, A., & Rodríguez, R. (2010). La dureza del agua. *Universidad Tecnológica Nacional*.

Rodríguez, N., & Velasco Hurtado, C. (2005). Tecnologías de Desulfuración de Gases. *Revista Metalúrgica UTO*, 29.

Ryder, D. S., & Boulton, A. J. (2005). Redressing the limnological imbalance: trends in aquatic ecology, management and conservation in Australia. *Hydrobiologia*, 552(1), 159-166.

Salonen, V. P., & Varjo, E. (2000). Gypsum treatment as a restoration method for sediments of eutrophied lakes—experiments from southern Finland. *Environmental Geology*, 39(3-4), 353-359.

Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied geochemistry*, 17(5), 517-568.

Society for Ecological Restoration (SER) International, Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas. (2004). Principios de SER International sobre la restauración ecológica. www.ser.org y Tucson: Society for Ecological Restoration International.

Soria, F., & Galvache, S. (1982). Características de cenizas volantes españolas Characteristics of spanisli fly ashes. *Materiales de Construcción*, 38, 25-38.

Soria, J. M., Miracle, M. R., & Vicente, E. (1987). Aporte de nutrientes y eutrofización de la Albufera de Valencia. *Limnetica*, 3(2), 227-242.

Søndergaard, M., Jeppesen, E., Peder Jensen, J., & Lildal Amsinck, S. (2005). Water Framework Directive: ecological classification of Danish lakes. *Journal of Applied Ecology*, 42(4), 616-629.

Steinbruch, F. (2010). Geology and geomorphology of the Urema Graben with emphasis on the evolution of Lake Urema. *Journal of African Earth Sciences*, 58(2), 272-284.

Tang, H., Sundari, R., Lintang, H. O., & Yuliati, L. (2016). Detection of nitrite and nitrate ions in water by graphene oxide as a potential fluorescence sensor. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 107, No. 1, p. 012027). IOP Publishing.

Telesca, A., Marroccoli, M., Calabrese, D., Valenti, G. L., & Montagnaro, F. (2013). Flue gas desulfurization gypsum and coal fly ash as basic components of prefabricated building materials. *Waste management*, 33(3), 628-633.

Tesarek, P., Drchalova, J., Kolísko, J., Rovnaníková, P., & Černý, R. (2007). Flue gas desulfurization gypsum: Study of basic mechanical, hydric and thermal properties. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1500-1509.

Tolonen, E. T., Rämö, J., & Lassi, U. (2015). The effect of magnesium on partial sulphate removal from mine water as gypsum. *Journal of environmental management*, 159, 143-146.

Torbert, H. A., & Watts, D. B. (2014). Impact of flue gas desulfurization gypsum application on water quality in a Coastal Plain soil. *Journal of environmental quality*, 43(1), 273-280.

Valencia, L. E. S. (2001). Caracterización física química y mineralógica de las cenizas volantes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, (10), 47-62.

Verma, M. P. (1998). Necesidad de la Determinación de la Alcalinidad en la Caracterización de la Lluvia. *Boletín IIE, enero-febrero*.

Vicente, I. D., Amores, V., & Cruz-Pizarro, L. (2006). Instability of shallow lakes: A matter of the complexity of factors involved in sediment and water interaction?. *Limnetica*, 25(1-2), 253-270.

Williamson, C. E., Morris, D. P., Pace, M. L., & Olson, O. G. (1999). Dissolved organic carbon and nutrients as regulators of lake ecosystems: resurrection of a more integrated paradigm. *Limnology and Oceanography*, 44(3part2), 795-803.

World Health Organization. (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. Geneva: world health organization.

Yuan, Y., Bingner, R. L., & Locke, M. A. (2009). A review of effectiveness of vegetative buffers on sediment trapping in agricultural areas. *Ecohydrology*, 2(3), 321-336.

Zambrano, L. (2003). La restauración de ríos y lagos. *Ciencias*, (072).

Zamparas, M., & Zacharias, I. (2014). Restoration of eutrophic freshwater by managing internal nutrient loads. A review. *Science of the Total Environment*, 496, 551-562.

ANEXO I: COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS ENTRE UNA LAGUNA DE YESOS NATURAL Y UNA LAGUNA DE YESOS DE DESULFURACIÓN.

PARÁMETROS	UNIDADES	YESOS NATURALES	YESOS DE DESULFURACIÓN
Nitritos	mg/L NO ₂	0,05 – 0,63	0,40 – 0,48
Nitratos	mg/L NO ₃	11,83 – 57,30	111,00 – 165,54
Conductividad eléctrica	μS/cm	1.730,00 – 3.480,00	4.830,00 – 6.530,00
Sulfatos	mg/L SO ₄	737,00 – 1.155,00	3.620,00 – 4.197,00
Cloruros	mg/L Cl	46,00 – 60,00	431,00 – 561,38
Calcio	mg/L Ca	359,00 – 470,00	496,72 – 529,00

Tabla 11: Comparación de parámetros físico-químicos, entre una laguna de yesos natural y nuestra laguna de yesos de desulfuración. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO II: IMÁGENES



Figura 14: vista aérea de la mina.



Figura 15: Granulometría de los yesos de desulfuración y laguna.



Figura 16: Laguna, donde se puede observar el color del agua.



Figura 17: Orilla por donde se accede a la laguna.



Figura 18: Montones de material de relleno.

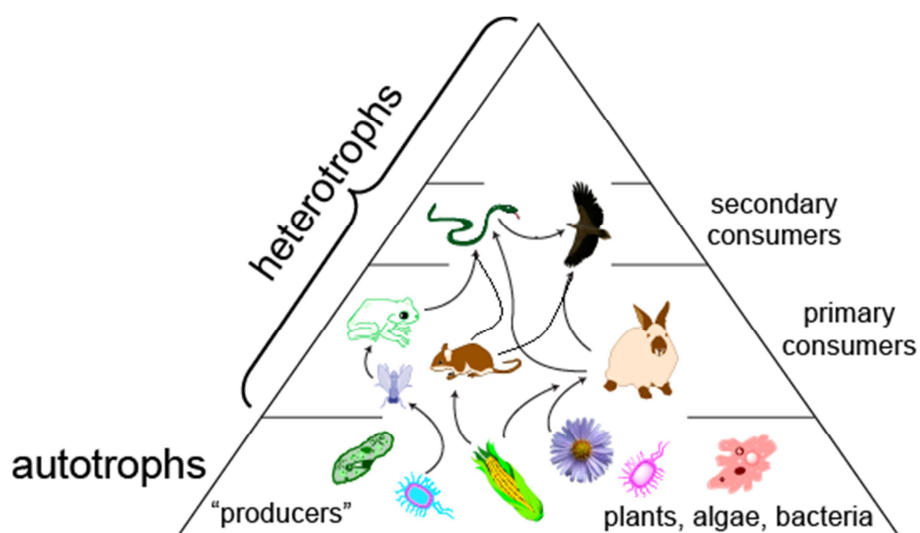


Figura 19: Gráfico de una pirámide trófica en un ecosistema lagunar. La base de la pirámide indica los productores primarios, el segundo escalón los consumidores primarios y el tercer escalón los consumidores secundarios.