



Departamento de  
Ciencias de la Tierra  
Universidad Zaragoza



Facultad de Ciencias  
Universidad Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Evaluación del impacto en la calidad de los suelos de la presencia de las formaciones salinas y su explotación en el entorno de Remolinos (Zaragoza).

Autora

Carlota Michel Iguiñiz

Directora

Gloria Desir Valén

Facultad de Ciencias | Universidad de Zaragoza

2021

## ÍNDICE

Abstract .....	2
Resumen.....	3
1. Introducción .....	4
2. Objetivos .....	5
3. Área de estudio .....	6
3.1 Situación Geográfica .....	6
3.2 Contexto Geológico .....	6
3.3 Contexto Hidrogeológico.....	7
3.5 Contexto Climático .....	7
4. Metodología .....	8
4.1 Revisión bibliográfica .....	8
4.2 Metodología de campo .....	8
4.3 Metodología de laboratorio .....	9
4.4 Metodos de representación de datos.....	11
5. Resultados y Discusión .....	11
5.1 Resultados de campo .....	11
5.2 Resultados de laboratorio .....	11
➤ Resultados de las muestras de suelo .....	11
➤ Resultados de las muestras de agua .....	15
➤ Mapa de isolíneas.....	17
6. Medidas correctoras .....	20
7. Conclusion .....	21
8. Bibliografía .....	22
Anexos.....	24

## Abstract

The salinisation and sodification of the soil horizons and groundwater avoids the proper use of these resources, which are essential for the development of life, and even for the social and economic development of the populations.

In the central sector of the Ebro Depression, on the left bank, between the towns of Tauste and Alagón is the Remolinos escarpment. Here we find the Evaporitic Unit of the Zaragoza Fm. which contains extensive halitic deposits corresponding to the deposits produced by evaporation in the endorheic lakes of the depocenter of the Tertiary Continental Ebro Basin.

The aim of this study is to demonstrate the origin of the salinisation and sodification of the fields and the waters emerging from the floodplain in the Remolinos area. In addition to assessing its quality with respect to the parameters in accordance with the uses of cultivation and irrigation.

To this end, these soils and surface waters were sampled and chemically analysed. Considering the results obtained, isoline maps have been made using the Surfer and ArcGis programmes to visualise the flow of the concentrations of each ion.

Nine out of eighteen contaminated soil samples were found to have very high concentrations of electrical conductivity, chlorides, sulphides, calcium, and sodium. Applying the parameters corresponding to saline soils, three types of soils were obtained: normal, saline and saline-sodic. The samples with the highest concentrations of ions and conductivity are in the Arroyo de las Salinas ravine and along the escarpment. The samples obtained in the floodplain have also been categorised as saline and saline-sodic, although the values are not as high.

Regarding to the water samples, nine samples were obtained, four of which showed signs of contamination. Considering their ion concentrations, they were classified as: calcium bicarbonate, calcium sulphate and sodium chloride water. The water samples with the highest concentrations of sodium chlorides were in the lower part of the Barranco de las Salinas, next to the soil samples. The rest of the contaminated samples were obtained from the floodplain of waterlogged areas.

Finally, from these results it has been determined that the origin of the contamination in soil and water comes from the leaching of high quantities of soluble salts precipitated from the evaporite deposits outcropping on the escarpment.

## Resumen

La salinización y sodificación en los horizontes del suelo como en las aguas subterráneas impide un buen uso de estos recursos imprescindibles para el desarrollo de la vida, e incluso para el desarrollo social y económico de las poblaciones.

En el sector central de la Depresión del Ebro, en la margen izquierda, entre las localidades de Tauste y Alagón se encuentra el escarpe de Remolinos. En él se sitúa la Unidad Evaporítica de la Fm. Zaragoza que alberga unos amplios depósitos halíticos correspondientes a los depósitos producidos por evaporación en los lagos endorreicos del depocentro de la Cuenca Terciaria Continental del Ebro.

El objetivo de este estudio es evidenciar la procedencia de la salinización y sodificación de los campos y las aguas surgentes de la llanura de inundación en el área de Remolinos. Además de evaluar su calidad respecto a los parámetros acordes con los usos de cultivo y regadío. Para ello, se ha realizado un muestreo de estos suelos y aguas superficiales y se ha procedido su análisis químico. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se han realizado mapas de isolíneas mediante el programa Surfer y ArcGis para la visualización del flujo de las concentraciones de cada ion.

Se han evidenciado 9 de 18 muestras de suelo contaminadas, con concentraciones muy elevadas de conductividad eléctrica, cloruros, sulfuros, calcio y sodio. Aplicando los parámetros correspondientes a suelos salinos, se han obtenido tres tipos de suelos: normales, salinos y salino-sódicos. Las muestras con mayor concentraciones de iones y conductividad se sitúan en el Barranco de Arroyo de las Salinas y a lo largo del escarpe. Las muestras obtenidas en la llanura de inundación también se han categorizado como salinos y salino-sódicos, aunque presentan unos valores no tan elevados.

Respecto a las muestras de agua se han obtenido 9 muestras de las cuales 4 presentaban signos de contaminación. Teniendo en cuenta sus concentraciones de iones se han clasificado como: aguas bicarbonatadas cálcicas, sulfatadas cálcicas y cloruradas sódicas. Las muestras de agua con máximas concentraciones de cloruros sódicos se situaban en la parte baja del Barranco de las Salinas, junto a las muestras de suelo. El resto de las muestras contaminadas se obtuvieron de la llanura de inundación de zonas encharcadas.

Finalmente, a partir de estos resultados se ha determinado que la procedencia de la contaminación en suelos y aguas proviene de la lixiviación de altas cantidades de sales solubles precipitadas de los depósitos evaporíticos aflorantes en el escarpe.

# 1. Introducción

Los problemas de la salinidad en el suelo y las aguas en zonas áridas y semiáridas con un déficit hídrico causado por una escasa precipitación, provoca un lavado insuficiente de las sales en el suelo, que, incrementado con una insolación persistente, favorece la evapotranspiración del agua de lluvia y se genera una mayor concentración de sales en el suelo. Debido a un nivel freático alto, el agua con mayor o menor concentración de sales asciende por capilaridad y se evapora aumentando la concentración de sales ya existente (E. Amezketa, s.f).

Por el contrario, en áreas donde afloran niveles de rocas evaporíticas en zonas topográficamente más elevadas que el nivel de base, la precipitación y escorrentía superficial transporta las sales disueltas hasta los horizontes más bajos. Los iones presentes en el agua se intercambian en los complejos de cambio gracias a la capacidad de intercambio iónico del suelo. Estos iones que en un principio estaban adsorbidos en el suelo se liberan y son transportados y acumulados, generando problemas de degradación y desertificación por salinización y/o sodificación de los suelos.

Los principales aniones y cationes que intervienen en estos procesos son el sodio ( $\text{Na}^+$ ), el calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), el magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), el potasio ( $\text{K}^+$ ), el cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), el sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), y el bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y suelen darse de forma natural en zonas deprimidas, en suelos con mal drenaje, y/o clima árido o semiárido donde existe un déficit hídrico muy marcado ya que la evaporación supera a la precipitación. Además, hay que añadir que las aguas utilizadas para el riego de superficies agrícolas, así como el uso de fertilizantes que contienen dichos iones contribuyen a la salinización y sodificación, y, por ende, a los problemas que estos procesos generan (A. Lamz y M.C Gonzalez, 2013).

Los elevados contenidos de sales y sodio influyen en las características físicas y químicas de las propiedades edáficas y las plantas. En suelos salinizados hay una alta concentración de cloruros y sulfatos de sodio junto con el magnesio, los cuales provocan un efecto físico en el suelo en el que favorece el proceso de floculación que, gracias a los agregados y la estructura formada, hay una mayor fertilidad física. Por otro lado, las sales producen la disminución del potencial osmótico del agua del suelo, e inhiben el crecimiento de la planta. Y gracias a la cantidad elevada de iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ) y cloro ( $\text{Cl}^-$ ) que se infiltran en el suelo, se impide la absorción de los nutrientes esenciales: como el potasio ( $\text{K}^+$ ), el calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), y se produce la intoxicación de la planta (UNT, 2019).

En suelos sódicos, con un porcentaje de sodio de intercambio mayor al 15% (ESP), se producen factores negativos físicos como la dispersión. La dispersión genera la destrucción o colapso de la estructura, ralentizando el movimiento del agua y formándose un fuerte encostramiento en la superficie el cual dificulta el crecimiento y la oxigenación del cultivo. Respecto a las consecuencias químicas, debido a una concentración elevada de sales sódicas se producen incrementos del pH del suelo a valores iguales o superiores a 8.5, lo que dificulta de modo severo la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes al igual que la actividad biológica (UNT, 2019).

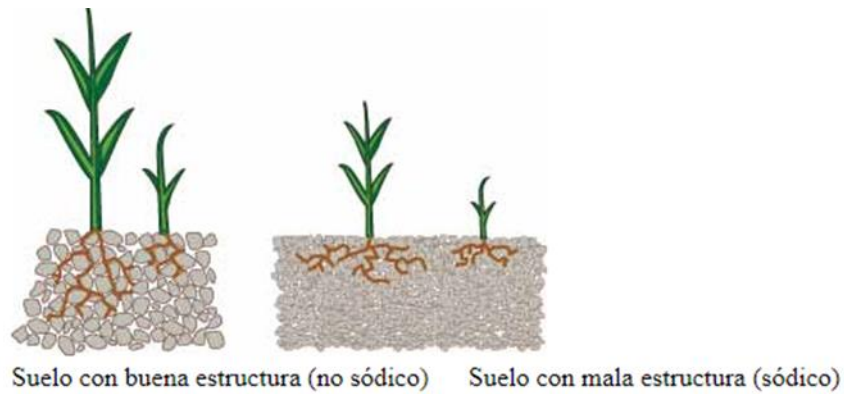


Figura 1. Efectos de la sodicidad en la estructura y sellamiento del suelo. Fuente: Sonon et al. Agricultural and environmental services lab. Universidad de Georgia (US)

Este estudio se ha realizado en Remolinos, una localidad que presenta formaciones salinas situadas en el escarpe a la margen izquierda del río Ebro, las cuales son explotadas generalmente en salmueras, y se encuentran controladas por la alta tasa de solubilidad de las rocas evaporíticas, generando problemas de salinización y sodificación en el nivel de base y, por consiguiente, se produce la disminución de la calidad del suelo y de las aguas subterráneas (J. Mandado et al, 1984).

El municipio tiene como motor económico principal la agricultura, basada en cultivos de secano y regadío, con explotaciones de pequeño a mediano tamaño de alfalfa, trigo, maíz, cebada y remolacha. Además de la agricultura, la economía de esta localidad está basada en la explotación y aprovechamiento de los recursos mineros que ofrecen los afloramientos salinos situados en el escarpe entre las localidades de Tauste y Zaragoza. Concretamente, se tratan de niveles halíticos con nódulos de anhidrita que continúan, actualmente, siendo explotados y comercializados como sal gema, sal de salinas y salmuera.

## 2. Objetivos

El objetivo general del trabajo es evaluar el impacto que se genera actualmente en la calidad de las tierras de cultivo y en las aguas en las inmediaciones de Remolinos debido a la contaminación de sales y sodio consecuencia de las capas y las explotaciones salinas presentes en la zona.

Por ello, se tratarán de alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- La evaluación del grado de salinización y/o sodificación de los suelos agrícolas.
- Analizar los patrones de la distribución de las sales lavadas desde los afloramientos salinos hasta el nivel de base local, el Río Ebro.
- Determinar las calidades de las aguas de riego y del Río Ebro en base a su salinidad y la conductividad eléctrica aguas arriba y debajo de Remolinos y sus explotaciones de sal.
- Analizar posibles soluciones para disminuir la salinización en los suelos.

### 3. Área de estudio

#### 3.1 Situación Geográfica

La zona de estudio se encuentra situada en la margen izquierda del río Ebro entre las localidades de Remolinos y Tauste. El límite norte de la zona coincide con la divisoria de aguas situada en la parte superior del escarpe en yesos que limita la llanura de inundación y el límite sur es el propio cauce del río Ebro.

El cuadrante donde se ha centrado la investigación (Figura 2) y la toma de muestras presenta una longitud de 14km desde la desembocadura del Barranco de la Casa, y la carretera de Alagón en Torres de Berrellén, hasta el comienzo del Camino de Negré situado al NO en Tauste. Se ha tomado un ancho aproximadamente de 2km perpendicular a la distancia longitudinal descrita anteriormente. Comprende en su mayoría campos de cultivo situados en la llanura de inundación del Ebro, hasta las desembocaduras de los Barrancos de la margen izquierda del río.

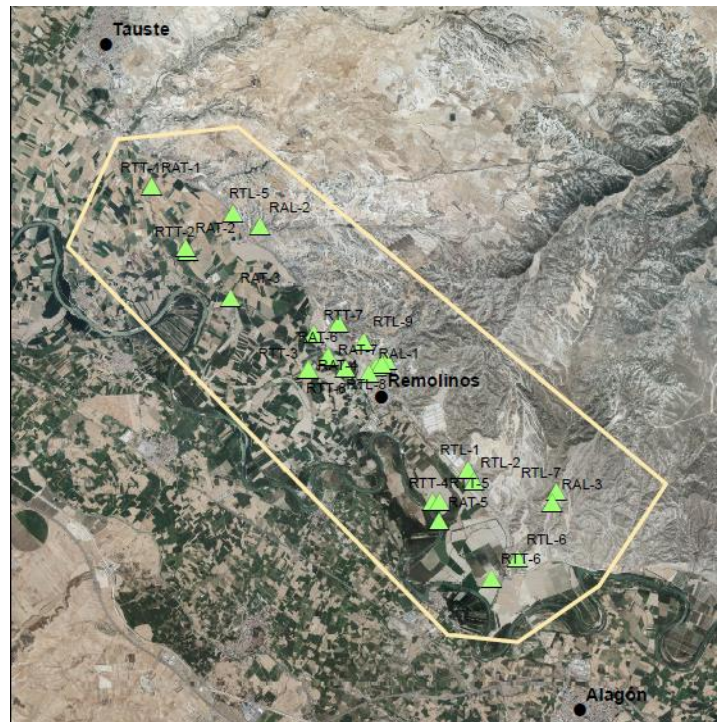


Figura. 2. Zona de estudio delimitada. Fuente: Elaboración propia

#### 3.2 Contexto Geológico

La zona de estudio se encuentra en el sector central de la Depresión Terciaria del Ebro. Afloran depósitos del Terciario, del Mioceno Inferior hasta el Mioceno Medio. Las series terciarias se encuentran representadas especialmente por las margas y los yesos que han sido socavadas por el río Ebro. Los depósitos pertenecientes a estas series se dividen principalmente en dos unidades denominadas (J.M Esnaola et al, 1995): Unidad Evaporítica y Unidad Carbonatada, ambas se encuentran recubiertas por materiales del Cuaternario, los cuales cubren la mayor parte de la superficie del área de estudio con diferentes generaciones de glaciares, coluviones, aluviales y las terrazas del Ebro. En Remolinos el Ebro presenta un valle asimétrico con una orilla claramente erosiva en el margen izquierdo que labra un marcado escarpe.

La Unidad Evaporítica se corresponde con la Fm. Zaragoza, más concretamente con la parte superior de la Unidad Tectosedimentaria de Pérez et al (1988). Corresponde en su mayor parte a la zona central de un gran cuerpo evaporítico, que en su zona superior presenta al NO y SO facies típicas de zonas intermedias, con yesos y lutitas, que en áreas más alejadas pasan a sabkhas bien definidas.

Respecto a la Unidad Carbonatada, se apoya sobre la Unidad Evaporítica, donde se observan ondulaciones y abombamientos que distorsionan la posición de contacto en muchas zonas. Esta unidad se encuentra formada por calizas micríticas y biomicríticas centimétricas hasta potencias de 1m, entre las que se intercalan margas carbonatadas y sílex en determinadas zonas (J.A Santos, 1991).

El esquema geológico evidenciado por estos datos permite suponer que en el área situada entre Tauste y Zaragoza se localizan varios lentejones halíticos correspondientes a los depósitos producidos por evaporación en los lagos endorreicos del depocentro de la Cuenca Terciaria Continental del Ebro. Las rocas resultantes contienen una gran cantidad de sales solubles precipitadas que al haber sido erosionadas afloran en superficie.

Respecto a las series pertenecientes al Cuaternario, en el Pleistoceno, se desarrollaron las terrazas altas y medias del río Ebro sobre la Fm. Zaragoza, donde aparecen frecuentemente deformadas y no presentan una morfología lineal continua. Los diferentes glaciares están constituidos por fragmentos de rocas del Terciario. En el Holoceno se establecen los depósitos de los aluviales y los fondos de los vales. La llanura de inundación, con una gran extensión y en continuidad con los propios rellenos de canal, está compuesta principalmente también por limos y arcillas.

Cabe destacar que la litología yesífera en todo el sector estudiado, con intercalaciones de sales en Remolinos, y a techo el nivel de margas rojizas ha tenido una gran importancia en la evolución del escarpe durante el Cuaternario. Ya que se han visto condicionados los depósitos de yesos por procesos de disolución, y la superposición a estos niveles los depósitos margosos que han determinado la formación de planos de discontinuidad por el comportamiento mecánico de los propios materiales. (F. Pellicer et al, 1984)

### 3.3 Contexto Hidrogeológico

El río Ebro con dirección NO-SE discurre sobre los terrenos consolidados del Terciario Continental, como ya se ha mencionado anteriormente. Las terrazas bajas del Ebro y sus afluentes, especialmente la llanura aluvial posee permeabilidades muy altas y se presentan encajadas. Este acuífero pertenece al curso medio del río Ebro, lo conforman varios niveles de terrazas, la explotación principal se realiza en la llanura de inundación y en la primera y segunda terraza. El substrato impermeable o muro del acuífero lo constituyen las facies evaporíticas del Mioceno (IGME, s.f).

La hidrología superficial se encuentra marcada por las líneas de diaclasado asociadas a la fractura mayor que ha determinado el escarpe original. Estas diaclasas constituyen planos de debilidad dentro de la masa rocosa favoreciendo el desplome de paquetes rocosos y a la acción hídrica, condicionada por procesos de meteorización y disolución (F. Pellicer et al, 1984).

La calidad química de las aguas subterráneas de la zona según el índice de Calidad General (I.C.G) es de media a mala, debido al carácter evaporítico del zócalo y límites impermeables del acuífero, lo que provoca la disolución de sulfatos y carbonatos, y da como resultado aguas con un alto grado de mineralización, cuya conductividad sobrepasa los 2.000 pmhos/cm (IGME, s.f).

### 3.5 Contexto Climático

El clima de la comarca es de tipo continental, con una temperatura templada media de 14º-15ºC y fuertes oscilaciones térmicas anuales con máximas de 50ºC y mínimas de -15ºC. La existencia de un viento predominante del noroeste, denominado cierzo, tiene presencia en la zona durante todo el año, aunque destacan como más afectados los periodos invernales.



Las precipitaciones son escasas y concentradas en primavera y otoño, con 350-500 mm de media, por lo que el ambiente dominante es seco. La elevada evapotranspiración de la zona, con valores de 300 mm, favorece la acumulación de sales en los horizontes más superficiales, debido a un marcado déficit hídrico.

## 4. Metodología

### 4.1 Revisión bibliográfica

Con el objetivo de conocer el área de estudio se ha realizado un estudio bibliográfico de sus características, tanto geológicas como geográficas. Se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica previa tanto de las formaciones de pertenecientes al Área de Estudio y más concretamente las capas salinas. De igual modo se investigó vegetación característica de ambientes salinos, como las salicornias que pudieran dar información del suelo en el que se encontraban y las aguas del entorno, al igual que otros indicadores salinos en superficie como la tolva de halita.

### 4.2 Metodología de campo

Para la realización de este estudio se ha llevado a cabo la toma de muestras de tierra y de agua en puntos específicos dentro de la cuadrícula determinada de la zona de muestreo (fig. 2), a partir de los cuales se extraerán los resultados que se expondrán posteriormente.

En primer lugar, se determinaron los puntos de muestreo en el sector comprendido entre las localidades de Tauste y Alagón, en la margen izquierda del río Ebro. La elección se basó en criterios de accesibilidad, indicadores de salinización, deterioro de cultivos, zonas de drenaje preferente, etc. Las muestras de agua, debido a la accesibilidad se tomaron en acequias, zonas encharcadas o surgencias. Por otro lado; las muestras de tierra han sido tomadas en puntos que presentaban evidencias visibles de una posible salinización. Además de esos puntos se seleccionaron algunos puntos más, como indicadores de valores máximos de salinidad en el área de estudio, en las confluencias del escarpe en yesos de Remolinos con las salidas de los principales barrancos que lo drenan; el Barranco de la Marquesa, el Barranco de Arroyo de las Salinas y el Barranco de la Lengua.

La campaña de muestreo se dividió en dos sectores, para abarcar toda la toma de muestras a lo largo de la zona de muestreo. Se procedió a la obtención de aproximadamente 2kg de muestra de suelo en cada punto de muestreo. Utilizando el martillo se extrajo 20cm en profundidad de suelo y se guardó la muestra en una bolsa plástica con sus respectivas siglas. Se realizó la foto del lugar y se anotaron en el cuaderno de campo las descripciones detalladas de las características del suelo como la litología, la textura, la presencia o no de mineralización, cantos o gravas, granulometría, si se encontraba húmedo, la presencia o no de vegetación en la cobertera, etc... Para las muestras de agua se intentaron obtener 200 cl por cada punto marcado, aunque en algunas de ellas debido a la poca cantidad de agua surgente que había no fue posible. Las muestras fueron guardadas en botes de plástico siglados, con la fotografía de donde habían sido recogidas y con la breve descripción del lugar.



Fig.3. Imágenes obtenidas de campo. A la izquierda se puede observar el agua estancada presente en el Barranco de la Lengua, de donde se obtuvo la muestra de agua RAL-2. Imagen de la derecha en un campo cultivado con evidentes signos de salinización. Se trata de la muestra RTT-7.

Posteriormente, todas las muestras fueron llevadas al laboratorio en el que se procedió a la colocación en bandejas separadas y sigladas de las muestras terrígenas para proceder al secado al aire de las mismas (Figura 4). Las muestras de agua se mantuvieron refrigeradas hasta el análisis químico que se explicará a continuación.



Fig.4. Imagen sacada a parte de las muestras de campo muestras se secaban al aire en el laboratorio.

Una vez las muestras terrígenas se secaron, se realizó el Test de Emerson para medir la dispersividad de los suelos. Se introdujeron en cada vaso de precipitado de 50ml, agua desionizada y dos agregados de 2-5mm de diámetro de cada muestra de suelo. Se hizo el registro del tiempo que estuvieron los agregados sumergidos y se evaluaron los comportamientos tras haber transcurrido 1h y 48h.

### 4.3 Metodología de laboratorio

Tras dejar secar la totalidad de las muestras de tierra en el laboratorio se procedió a desmenuzarlas mediante un rodillo para separar las fracciones granulométricas y los agregados. Posteriormente, se tamizaron con el tamiz de 2mm de luz de malla. Del total de la muestra obtenido, se separaron 400gr de muestra para la realización del análisis químico de los componentes iónicos mayoritarios del suelo mediante la técnicas de la pasta saturada. La metodología seguida aparece detallada en el libro de *Métodos oficiales de análisis. Tomo III* del Ministerio de agricultura, pesca y alimentación de 1987.

Para la preparación de las pastas saturadas se tomaron los 400 gr de muestra seca y se les fueron añadiendo de forma gradual y paulatina, controlado en cada momento el grado de saturación, agua desionizada para evitar la contaminación de la muestra y las lecturas erróneas. Cuando las

muestras ya no aceptaban más agua, es decir, se formaban zonas encharcadas en superficie golpear suavemente contra la mesa de trabajo, se realizaba un pequeño surco para comprobar que no había sobrante de agua ni se encontraba demasiado seco como para no volver a unirse la pasta formada. Otra evidencia era que presentaban un brillo característico debido a la reflexión de la luz y se deslizaban con facilidad, aunque en las muestras de suelos muy arcillosos era normal que tuvieran una textura menos fluida.

Una vez conseguida la pasta saturada y haberla dejado reposar una media de 4h se procedió a la separación del extracto. Las pastas de las bandejas se introdujeron cada una a un embudo Buchner, que se encontraban unidos por la boquilla inferior a recipientes que recogían los extractos y por la lateral a la bomba que aplicaba el vacío (Figura XX). A diferencia de lo que indica el manual, no se agregaron gotas de hexametáfosfato, ya que era interesante la medición de precipitación de carbonato cálcico que se realizaría posteriormente.



*Fig. 5. Imagen sacada del laboratorio mientras se realizaba la extracción de la pasta saturada.*

Finalmente se traspasaron las soluciones acuosas obtenidas de los recipientes a botes para muestras de 100 cl. En la mayoría de las muestras se obtuvieron 50 cl, que se consideran los mínimos para poder realizar los análisis químicos, pero en las muestras más arenosas no se concentró mucha agua y no ha sido posible la obtención de ese mínimo. El que esas muestra sean viables o no para los análisis químicos se determinaría más adelante.

En la segunda parte de la metodología de laboratorio se realizó el análisis químico a todas las muestras, tanto de suelo, mediante los extractos obtenidos de la pasta saturada como de agua, y constaba de dos partes, los análisis electroquímicos y los ópticos.

En la realización los electroquímicos se realizaron los análisis de:

- Conductividad, midiéndolos con el Jelway 470.
- Resistividad con el 9117BN Orion
- Cloruros, se midieron con el mismo aparato que la resistividad
- pH con el Orion 710A y el 8165BN Orion
- Alcalinidad, se utilizaron los mismo materiales que para el pH

Finalmente, para la realización de las medidas ópticas se emplearon:

- Mezcla con reactivos aplicando el Metodo de Nemeth para obtener unicamente la concentración de sulfatos
- Absorción atómica tanto en emisión como en absorción para medir la concentración de cationes de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) sodio ( $\text{Na}^{2+}$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ) que había en las muestras. Se empleó el aparato de medida PERKIN- ELMER 2380 Atomic.

#### 4.4 Metodos de representación de datos

Una vez obtenidos los resultados de las muestras de laboratorio en Excel, se realizaron representaciones de isolíneas para los iones pertenecientes a las muestras de suelo de sodio ( $\text{Na}^+$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y el SAR. Para ello, se utilizó en primer lugar el programa Surfer 10 de Golden Grafics, donde se creó un Grid o malla para cada ion a representar a partir del Excel de resultados con las coordenadas de cada punto de muestra. Para cada uno de los grids obtenidos se realizó el mapa de isolíneas mediante la interpolación de los datos de los vecinos próximos por kriging y se creó un mapa vectorial con las líneas de concentración. Finalmente, se exportaron a ArcGis para poder ver sobre la zona de estudio y con los datos georreferenciados, la distribución espacial de las concentraciones y las pautas de dispersión o dilución de los principales cationes desde las áreas fuentes a la zona de nivel de base, en este caso el río Ebro.

## 5. Resultados y Discusión

### 5.1 Resultados de campo

Se han obtenido un total de 28 muestras de la zona de muestreo. En el sector de la llanura de inundación del Ebro se han obtenido 15 muestras siendo 7 de agua (sigladas como RAT) y 8 de tierra (sigladas como RTT). En la margen derecha de la carretera Tauste-Alagón, donde se sitúa el escarpe, se han tomado 13 muestras de las cuales 10 son muestras de suelo (sigladas como RTL) y 3 de agua (sigladas como RAL). El objetivo de tomarlas en estas localizaciones ha sido poder ver la evolución del grado de salinización desde el área fuente hasta la zona del nivel de base. Se adjunta en el Anexo la Tabla. 1 con el listado de muestras y sus respectivas coordenadas y localizaciones.

### 5.2 Resultados de laboratorio

#### ➤ *Resultados de las muestras de suelo*

Se han analizado los parámetros de pH, conductividad eléctrica, SAR (Sodium adsorption ratio), y las diferentes concentraciones en cada muestra de cationes y aniones de: cloruro, bicarbonato, sulfatos, calcio, magnesio, sodio y potasio. Evidenciarán la presencia de suelos salinos y/o sódicos en el área de estudio y se deducirá, por tanto, la razón por la cual estos horizontes presentan estas concentraciones químicas.

En los resultados obtenidos de las 18 muestras terrígenas a lo largo de toda la zona de estudio (Tabla. 2) se puede apreciar grandes diferencias en cuanto a la composición química de cada una de ellas.

Tabla 1. Resultados de las 18 muestras de suelos de la zona de muestreo, obtenido a partir del análisis químico de la pasta saturada. En negrita se encuentran resaltados los datos de las muestras con mayores concentraciones.

Muestras	pH	cE dS/m	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> meq/L	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> meq/L	Cl <sup>-</sup> meq/L	Ca <sup>2+</sup> meq/L	Mg <sup>2+</sup> meq/L	Na <sup>+</sup> meq/L	K <sup>+</sup> meq/L	SAR
RTT-1	<b>8,67</b>	1,400	6,74	2,15	4,20	3,26	1,82	6,99	0,13	4,38
RTT-2	8,27	<b>7,15</b>	10,60	<b>41,15</b>	<b>31,03</b>	<b>62,18</b>	<b>9,53</b>	13,67	<b>3,29</b>	2,28
RTT-3	8,18	<b>14,66</b>	<b>13,14</b>	<b>52,26</b>	<b>134,54</b>	<b>57,19</b>	<b>29,89</b>	<b>92,91</b>	3,68	<b>14,08</b>
RTT-4	8,34	2,28	11,22	11,13	4,09	14,02	3,16	9,94	0,54	3,39
RTT-5	8,47	1,313	6,68	6,23	2,30	6,11	1,62	6,23	0,12	3,17
RTT-6	8,15	1,871	5,69	14,19	2,68	13,63	2,19	4,32	0,72	1,53
RTT-7	7,52	<b>29,9</b>	3,29	<b>53,99</b>	<b>341,30</b>	<b>100,00</b>	<b>33,81</b>	<b>254,47</b>	<b>13,30</b>	<b>31,11</b>
RTT-8	7,39	1,572	4,72	8,79	3,53	7,29	2,51	5,98	0,24	2,70
RTL-1	7,5	3,09	3,68	36,87	2,36	34,60	1,25	2,90	1,27	0,69
RTL-2	7,48	<b>19,35</b>	3,54	<b>61,47</b>	<b>194,06</b>	<b>61,73</b>	<b>25,21</b>	<b>155,29</b>	3,01	<b>23,55</b>
RTL-3	7,63	<b>29,1</b>	2,40	<b>87,90</b>	<b>318,73</b>	<b>54,79</b>	<b>8,28</b>	<b>325,37</b>	1,44	<b>57,94</b>
RTL-4	7,03	<b>48,3</b>	2,53	<b>151,66</b>	<b>651,57</b>	<b>66,52</b>	<b>13,48</b>	<b>665,97</b>	2,15	<b>105,30</b>
RTL-5	7,05	<b>19,09</b>	2,53	<b>150,24</b>	<b>105,21</b>	<b>27,89</b>	<b>27,92</b>	<b>203,88</b>	<b>10,35</b>	<b>38,59</b>
RTL-6	7,91	3,22	2,04	36,47	4,52	31,39	2,58	5,15	0,43	1,25
RTL-7	7,81	2,86	1,71	24,40	3,68	26,24	1,84	3,71	0,11	0,99
RTL-8	8,18	<b>4,11</b>	2,73	<b>44,92</b>	7,22	<b>36,53</b>	3,50	12,09	1,16	2,70
RTL-9	7,66	3,40	3,03	38,81	4,18	34,72	2,59	4,72	1,24	1,09
RTL-10	7,45	<b>5,19</b>	2,11	<b>40,07</b>	<b>22,88</b>	<b>38,22</b>	2,75	19,14	0,49	4,23

A partir de los datos obtenidos de conductividad eléctrica (cE), SAR y las concentraciones de los iones, se puede clasificar el comportamiento del suelo en relación con la salinidad y sodicidad de cada muestra. Es necesario tener en cuenta principalmente dos factores:

- cEs: La conductividad eléctrica de una pasta saturada

Se basa en la velocidad con que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en solución.

- El porcentaje de sodio intercambiable (ESP, exchangable sodium adsortium ratio) que se determina a través del SAR.

A través de la adsorción de sodio (SAR), que es calculada a partir de las concentraciones de Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> (mEq/L) de las soluciones salinas, se obtiene el grado de sodificación de la tierra.

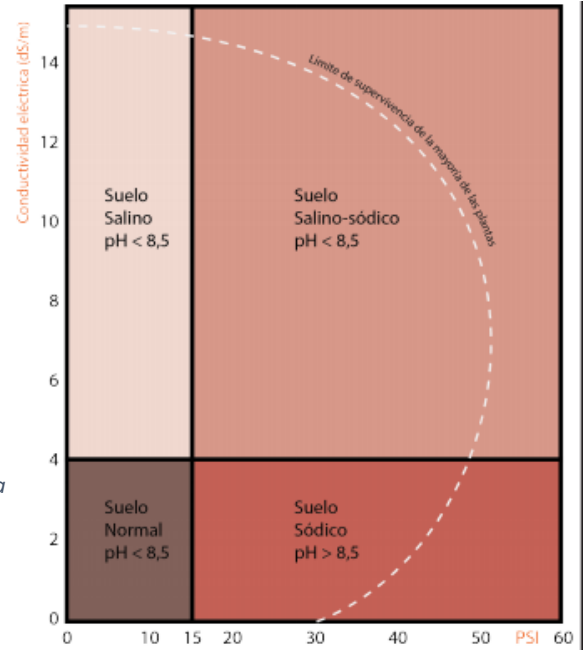
$$SAR = \frac{[Na^+]}{\frac{\sqrt{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}}{2}}$$

Gracias a la conversión de estos datos, y aplicarlos al diagrama (Figura.6), se obtiene la categoría del suelo al que pertenece cada muestra.

Los parámetros a tener en cuenta para saber la categoría de suelo a la que pertenece cada muestra son los siguientes:

- ◆ Suelos Normales:  $cEs < 4dS/m$  ;  $SAR > 13$
- ◆ Suelos Salinos:  $cEs > 4dS/m$  ;  $SAR < 13$
- ◆ Suelos Sódicos:  $cEs < 4dS/m$  ;  $SAR > 13$
- ◆ Suelos Salino-Sódicos:  $cEs > 4dS/m$  ;  $SAR > 13$

Fig. 6. Diagrama explicativo de los tipos de suelo: salino, sódico o salino-sódico dependiendo de los valores de CE (conductividad eléctrica de la pasta saturada) y el SAR. Fuente: G.F Courel, 2019



Tras comparar los datos obtenidos de las muestras terrígenas con los parámetros de salinidad y sodicidad, se han obtenido los siguientes resultados (Tabla. 3) categorizados en tres tipos de suelos:

Tabla 2. Categorías a las que pertenece cada muestra de suelo, aplicando los parámetros expuestos anteriormente. Los colores diferencian los tipos de suelo, siendo: verde- suelo normal. Amarillo- suelo salino. Rojo- suelo salino-sódico

Muestra	Salinidad/Sodicidad	Categoría
RTT-1	Normal	Verde
RTT-2	Salino	Amarillo
RTT-3	Salino- Sódico	Rojo
RTT-4	Normal	Verde
RTT-5	Normal	Verde
RTT-6	Normal	Verde
RTT-7	Salino-Sódico	Rojo
RTT-8	Normal	Verde
RTL-1	Normal	Verde
RTL-2	Salino sódico	Rojo
RTL-3	Salino-Sódico	Rojo
RTL-4	Salino-sódico	Rojo
RTL-5	Salino-Sódico	Rojo
RTL-6	Normal	Verde
RTL-7	Normal	Verde
RTL-8	Salino	Amarillo
RTL-9	Normal	Verde
RTL-10	Salino	Amarillo

Las tres muestras resultantes de suelo salino presentan una conductividad eléctrica sutilmente superior a 4dS/m comparadas con las muestras salino-sódicas. La muestra RTT-2, se obtuvo de un campo del sector de la llanura de inundación y presenta elevados valores de sulfuros, cloruros y calcio. Por otro lado, las muestras RTL-8 y 10 se obtuvieron del sector del escarpe, en el Barranco de Arroyo de las Salinas y de otro barranco hacia el oeste. En estas dos muestras se observan valores altos de sulfuros, cloruros y calcio a excepción de las concentraciones de cloruros en la muestra RTL-8, donde se presentan en concentraciones normales.

Las concentraciones de los iones nombrados anteriormente se diferencian de los de las muestras salino-sódicas en que no son tan elevadas, habiendo diferencias del doble o el triple de concentración entre ambos tipos de suelo.

Las seis muestras salino-sódicas presentan una conductividad eléctrica entre 14,66 y 48,3 dS/m, y un SAR entre 14,08 a 105,30. Las muestras RTT- 3 y 7 fueron obtenidas del sector de la llanura de inundación, en campos con signos dañinos visibles. Por otro lado, las muestras RTL-2, 3, 4 y 5 se tomaron del Barranco de la Marquesa, Barranco Arroyo de las Salinas y bajo el escarpe. Todas las muestras salino-sódicas presentan concentraciones extremadamente elevadas de cloruros, calcio y sodio, aunque es más notorio en las muestras pertenecientes al escarpe que a las situadas en los campos de la llanura de inundación.

Los resultados expuestos evidencian una mayor conductividad eléctrica (cE) y concentraciones de sulfuros, cloruros, calcio, y sodio en las muestras obtenidas de barrancos en comparación de

las muestras obtenidas de campos de la llanura de inundación. Por ello, puede entenderse que se produce el lixiviado de las aguas de escorrentía superficial a favor de los propios barrancos y de las infiltraciones de la escorrentía subsuperficial hasta la llanura de inundación, donde afecta a los campos.

Debido a la gran cantidad de sales solubles presentes en los suelos, se produce un desbalance osmótico del agua que afecta al crecimiento de la planta y se impide la absorción de los nutrientes necesarios. En suelos salino-sódicos con una buena fertilidad física, se generan agregados y la floculación de las partículas. Además, aun siendo el pH no mayor a 8'5, la gran cantidad de sodio y cloruros presentes en el suelo impiden la infiltración de nutrientes esenciales, como en los suelos salinos. Por lo que el crecimiento de las plantas se ve afectado por ambas causas, el exceso de sales y los excesivos niveles de sodio (UNT, 2019).

Las características áridas de la zona, junto con la presencia de suelos impermeables y un drenaje deficiente, inciden en la acumulación de sustancias como el sodio, cloruros, sulfatos, magnesio, bicarbonatos y carbonato sódico, provenientes de la escorrentía superficial. Puesto que la lluvia provoca un flujo descendiente del agua produciendo el lavado de las sales que, en un momento determinado, la evapotranspiración hace que el flujo se invierta y se produzca el ascenso de las mismas. Como consecuencia, el suelo se saliniza progresivamente favoreciendo la formación de suelos salinos y sódicos.

#### ❖ *Test de Emerson*

Los resultados del Test de Emerson expuestos en la Tabla.4 indican la dispersividad o la ausencia de ella en todas las muestras de suelo. De las 18 muestras de suelo únicamente hay dispersividad en tres de ellas, mientras que en el resto de muestra se mantienen los agregados.

*Tabla 3. Resultados del Test de Emerson aplicado a las muestras de suelo. Únicamente las muestras RTL-3, 4 y 5 son dispersivas.*

Muestra	Salinidad/Sodicidad	Dispersividad
RTT-1	Normal	No
RTT-2	Salino	No
RTT-3	Salino-sódico	No
RTT-4	Normal	No
RTT-5	Normal	No
RTT-6	Normal	No
RTT-7	Salino-Sódico	No
RTT-8	Normal	No
RTL-1	Normal	No
RTL-2	Salino-sódico	No
RTL-3	Salino-Sódico	Si
RTL-4	Salino-sódico	Si
RTL-5	Salino-Sódico	Si
RTL-6	Normal	No
RTL-7	Normal	No
RTL-8	Salino	No
RTL-9	Normal	No
RTL-10	Salino	No

Las tres muestras dispersivas son las RTL-3, 4 y 5 pertenecientes a suelos salino-sódicos. Las concentraciones de sodio que presentan estas muestras son las más elevadas, con valores de 325,3, 665,97 y 203,88 (mEq/L) respectivamente.

El resto de las muestras, pertenecientes tanto a suelos normales, a salinos o a salino-sódicos no presentan dispersividad. Aunque haya muestras de suelo salino-sódicas, al no tener una gran concentración de sodio, no sufren dispersión.

En el diagrama de dispersividad que se encuentra a continuación (Fig.7) se han representado los datos de conductividad eléctrica (cE) frente a los datos de SAR de todas las muestras de suelo, y se puede apreciar que únicamente las tres muestras mencionadas anteriormente presentan dispersión.

Por lo que se corroboran los resultados obtenidos a partir del Test de Emerson y puede deducirse que la problemática en los cultivos no viene derivada de las arcillas dispersivas del suelo, sino que claramente se encuentra ligada a los procesos de salinización.

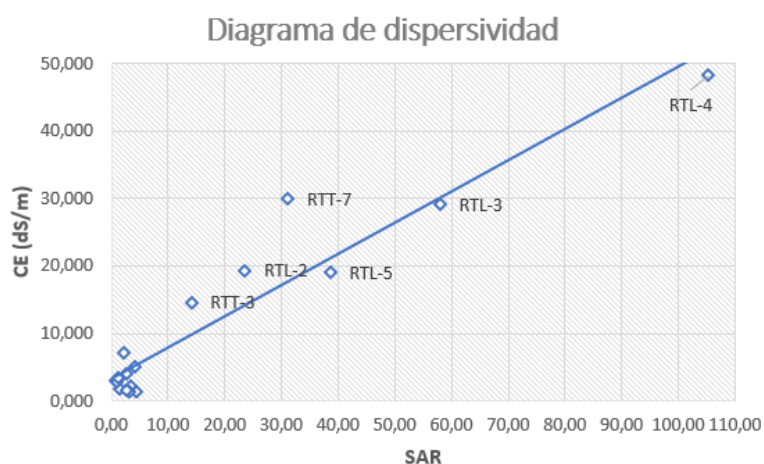


Fig. 7. Diagrama de dispersividad. CE (ds/m) frente a SAR. Elaboración propia

Ya que debido a la elevada concentración de iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ) y cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) que se infiltran en el suelo, se impide la absorción de los nutrientes esenciales, y son las raíces las que se ahogan por la degradación del suelo en contraposición a la falta de estructura física del horizonte y/o rotura del mismo donde se individualizan las partículas de arcilla y se produce la ruptura de agregados, provocando una disminución en la infiltración favoreciendo la escorrentía superficial y produciendo la asfixia radicular en el cultivo (AGROSAL, s.f).

➤ *Resultados de las muestras de agua*

En las 9 muestras de agua recogidas en la zona de estudio se aprecia una clara diferenciación entre ellas respecto a concentración y composición. En la Tabla.5 se pueden observar aguas bicarbonatadas cálcicas ( $\text{Ca}(\text{CO}_3\text{H})_2$ ), sulfatadas cálcicas ( $\text{CaSO}_4$ ) y las cloruradas sódicas ( $\text{NaCl}$ ) con mayor concentración de iones.

Tabla 4. Resultados del análisis químico de las muestras de agua tomadas en la zona de estudio. Los valores en negrita indican las muestras con valores más elevados de meq/L. Se encuentran resaltadas la muestra RAT-4 sulfatada calcia y las RAT-6, RAL-1y 2 cloruradas sódicas.

MUESTRA	cE mS	$\text{SO}_4^{2-}$ meq/L	$\text{Cl}^-$ meq/L	$\text{HCO}_3^-$ meq/L	Ca meq/L	Mg meq/L	Na meq/L	K meq/l
RAT-1	1,234	3,25	4,68	4,76	4,82	2,07	5,21	0,11
RAT-2	1,296	3,42	5,19	4,22	5,27	1,70	5,41	0,11
RAT-3	1,363	4,50	5,73	3,22	6,02	1,97	5,93	0,16
<b>RAT-4</b>	6,31	<b>59,25</b>	28,07	1,50	<b>47,06</b>	9,32	26,14	0,86
RAT-5	1,565	4,71	6,77	4,35	5,75	2,02	7,07	0,11
<b>RAT-6</b>	14,61	79,33	<b>126,08</b>	2,97	54,14	25,57	<b>108,79</b>	5,36
RAT-7	1,005	4,27	3,84	1,57	3,03	1,42	4,21	0,11
<b>RAL-1</b>	60,7	171,71	<b>1066,20</b>	1,09	94,16	15,93	<b>1077,04</b>	2,91
<b>RAL-2</b>	25,8	115,97	<b>266,55</b>	2,84	35,83	53,06	<b>284,92</b>	0,76



Las muestras de aguas bicarbonatadas cálcicas son las RAT-1,2,3,5 y 7. Han sido obtenidas del sector de la llanura de inundación de acequias, y del río Ebro (RAT-5). Presentan concentraciones normales de iones y una conductividad eléctrica no superior a 1,565 m/s, por lo que se puede entender como aguas no contaminadas en sales, y sirven como comparativa al resto de muestras.

La muestra RAT-4, se clasifica como agua sulfatada cálcica debido a sus altas concentraciones que se observan tanto en sulfuros, como en calcio, aunque también presentan concentraciones de cloro y sodio ligeramente elevadas. Esta muestra fue obtenida de un encharcamiento presente entre campos cultivados en la llanura de inundación. La abundante presencia de sulfuros y calcio en comparación con las muestras bicarbonatadas cálcicas indica que podría ser una surgencia de agua proveniente del escarpe.

Finalmente, las muestras con concentraciones extremadamente elevadas son aguas cloruradas sódicas. La muestra RAT-6, con una concentración no tan elevada que las dos restantes fue obtenida de un encharcamiento en la carretera cercana a campos de cultivo, en la llanura de inundación, con evidentes signos de salinidad. Las dos muestras, RAL-1 y 2, con concentraciones de cloruros de 1066,20 mEq/L y 266,55 mEq/L, y 1077,04 mEq/L y 284,92 mEq/L de sodio. Fueron tomadas en el margen del escarpe, en la boca del Barranco de Arroyo de las Salinas y en el agua estancada presente del Barranco de la Lengua, respectivamente.

Para determinar la calidad del agua de las muestras obtenidas es necesario la comparación de los resultados con los parámetros de agua de riego (Tabla.6), que implican una concentración tolerable de cada ion tanto para el sustrato como para el cultivo. Teniendo esto en cuenta, una concentración mayor a la que indica la Tabla. 6, determinaría la muestra con concentraciones anómalas y la posible contaminación salina.

Tabla 5. Comparativa de los valores tolerables para su uso como agua de riego. Y los valores obtenidos para cada una de las muestras de aguas de riego analizadas en la zona de estudio. Adaptado de Ayers y Westcot (1985)

	SALINIDAD						
	C. Eléctrica	Cationes (meq/l)			Aniones (meq/l)		
	cE (dS/m)	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Valores Tolerables	0 - 3	0 - 20	0 - 5	0 - 40	0 - 10	0 - 30	0 - 20
RAT-1	1.234	4,82	2,07	5,21	4,76	4,68	3,25
RAT-2	1.296	5,27	1,7	5,41	4,22	5,19	3,42
RAT-3	1.363	6,02	1,97	5,93	3,22	5,73	4,5
<b>RAT-4</b>	<b>6.31</b>	<b>47,06</b>	9,32	26,14	1,5	28,07	<b>59,25</b>
RAT-5	1.565	5,75	2,02	7,07	4,35	6,77	4,71
<b>RAT-6</b>	<b>14,61</b>	54,14	25,57	<b>108,79</b>	2,97	<b>126,08</b>	79,33
RAT-7	1,005	3,03	1,42	4,21	1,57	3,84	4,27
<b>RAL-1</b>	<b>60.7</b>	94,16	15,93	<b>1077,04</b>	1,09	<b>1066,2</b>	171,71
<b>RAL-2</b>	<b>25,8</b>	35,83	53,06	<b>284,92</b>	2,84	<b>266,55</b>	115,97

A partir de la comparativa de la tabla queda visto que únicamente las aguas bicarbonatadas cálcicas podrían ser utilizadas para riego, ya que el resto de las aguas sobrepasan en grandes concentraciones a los valores tolerables tanto para plantas como para cultivos.

Teniendo también en cuenta los resultados obtenidos de conductividad eléctrica de las muestras de encharcamientos o posibles surgencias (RAT-4, RAT-6), se puede observar que presentan concentraciones más bajas a las muestras de los barrancos (RAL-1,2). Por lo que es apreciable la

disminución de concentración que existe de los iones según va descendiendo topográficamente el flujo hasta llegar a las muestras tomadas en la llanura de inundación. Por lo tanto, queda constancia del lavado que ha sufrido el depósito evaporítico que, favorecido por los flujos de ladera, se han formado surgencias de agua con concentraciones extremadamente elevadas de salinidad y sodicidad, donde los valores de RAT- 4 y 6 son bastante menores a los valores de RAL- 1 y 2.

➤ *Mapa de isolíneas*

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de las muestras de suelo se han realizado cuatro mapas de isolíneas teniendo en cuenta las concentraciones de cada muestra respecto a los iones de sodio, cloruros, sulfuros y a la concentración de sodio intercambiable (SAR). Se ha optado por la representación solo de estos iones debido a la cantidad de información que aportan, en comparación con el resto, y a la relación que tienen con las contaminaciones salinas en suelos y en agua.

A continuación, en los mapas de isoconcentraciones se podrán observar las líneas en forma radial a partir de cada muestra, indicando una menor concentración cuanto más alejado estén de la misma y cuanto mayor sea la separación haya entre las líneas. Hay que tener en cuenta que cuando las líneas entran en contacto con el río Ebro, las posibles concentraciones de cada ion que hubiera en esa zona se reducirían hasta valores similares a la muestra RAT-5, obtenida del río Ebro.

En los mapas de isolíneas representados de sodio (Fig.8) y SAR (Fig.9), se puede apreciar entre ellos una gran similitud. Los puntos de máximas concentraciones de sodio están situados en el Barranco de Arroyo de las Salinas, donde se encuentran las muestras: RTL-3 y RTL-4 categorizadas como salino-sódico. Se obtuvo una muestra de agua (RAL-1) a la salida del barranco con valores de 60dS/m de cE y más de 1000mEq/L de sodio ( $\text{Na}^+$ ) y cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), por lo que concuerda con los valores obtenidos del suelo del barranco, e indica la escorrentía que se produce en el mismo.

Como puntos menores de concentración se observa al SE del mapa la muestra RTL-2 y debajo del escarpe al NO, la muestra RTL-5, con valores de agua concordantes a los obtenidos del suelo. Según se expanden las isolíneas hacia la llanura de inundación las concentraciones de sodio y el RAS disminuyen.

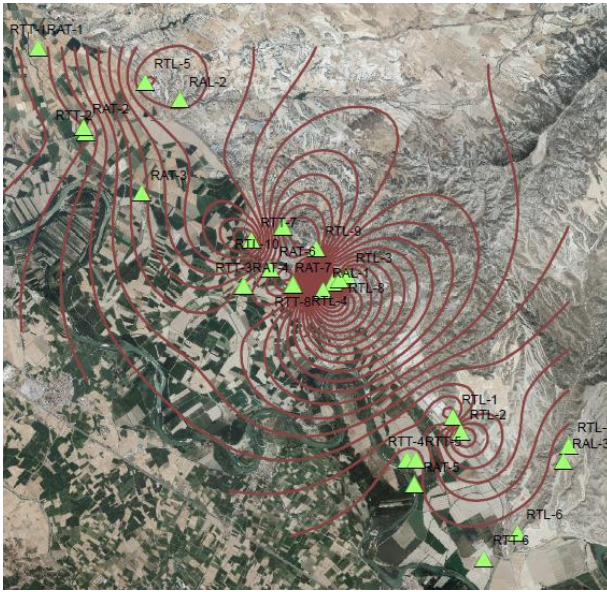


Fig.8. Mapa isolíneas de la concentración en meq/l de sodio

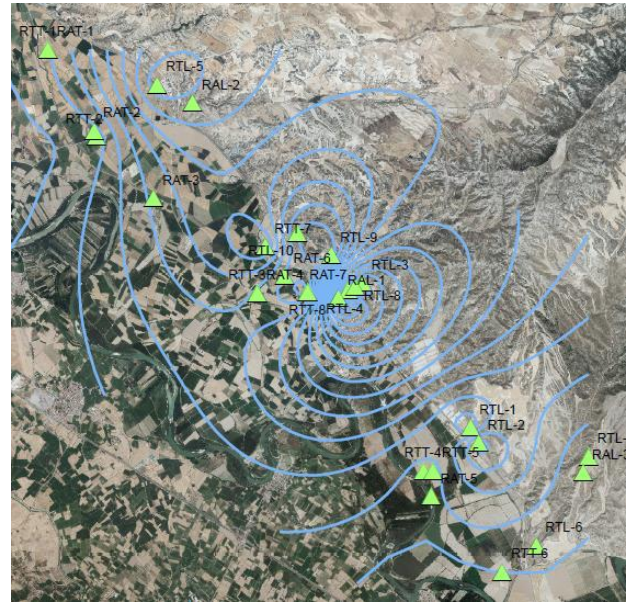


Fig. 9. Mapa isolíneas del SAR

En el caso del mapa de las isolíneas de cloruros representadas en la Fig.10, se puede apreciar la relación que hay entre la contaminación de sodio y cloruros, ya que la mayor concentración de cloruros existente es la que se localiza nuevamente en el Barranco de Arroyo de las salinas, bajo el escarpe y al SE del mapa. Como valores secundarios notorios se encuentra la muestra RTT-7, situada en el sector de la llanura de inundación en un campo de cultivo. Presenta una contaminación salino-sódica elevada y a la misma altura que esta muestra, se recogieron datos de agua cloruro sódica (RAT-6) con un valor de conductividad eléctrica de 14,61 dS/m.

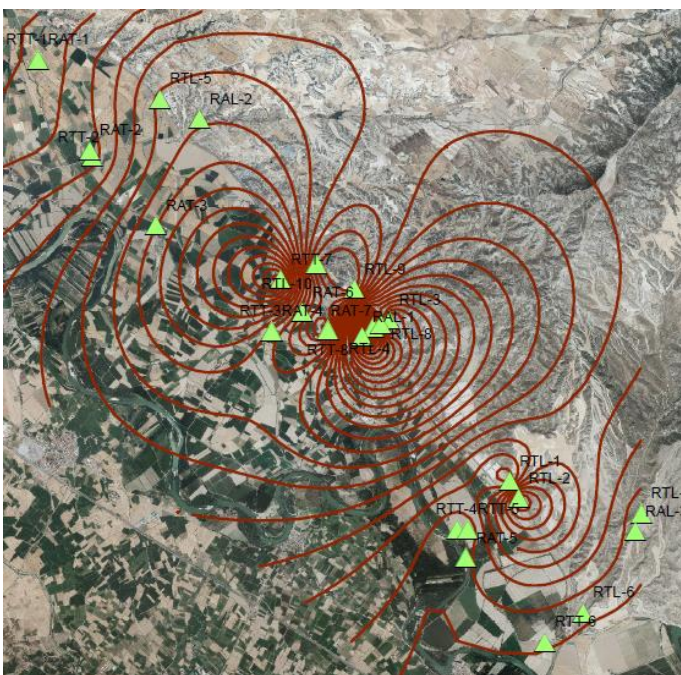


Fig. 10. Mapa isolíneas de de la concentración en meq/l de cloro

Finalmente, en el mapa de isolíneas donde se representan las concentraciones de sulfatos (Fig.11), se puede apreciar que la máxima concentración presente en la zona de muestreo se encuentra en la parte baja del Barranco de Arroyo de las Salinas, en los datos obtenidos de las muestras de suelo de RTL-3 y RTL-4 y la muestra de agua RAL-1. Las dos muestras situadas al NO, y y al SE del barranco, RTL-5 y RTL-2 respectivamente, presentan también datos elevados de sulfatos.

Cabe destacar las muestras situadas en la llanura de inundación, una muestra de suelo salino-sódico, RTT-3 con elevadas concentraciones de cloruros, sodio, sulfatos y calcio, y la muestra RAT-4, la única muestra de agua sulfatada cálcica. Resulta coherente el relacionar la muestra de agua rica en sulfatos con los suelos sulfatados del barranco, ya que la contaminación en esta zona proviene de los lavados de los cloruros sódicos del escarpe.

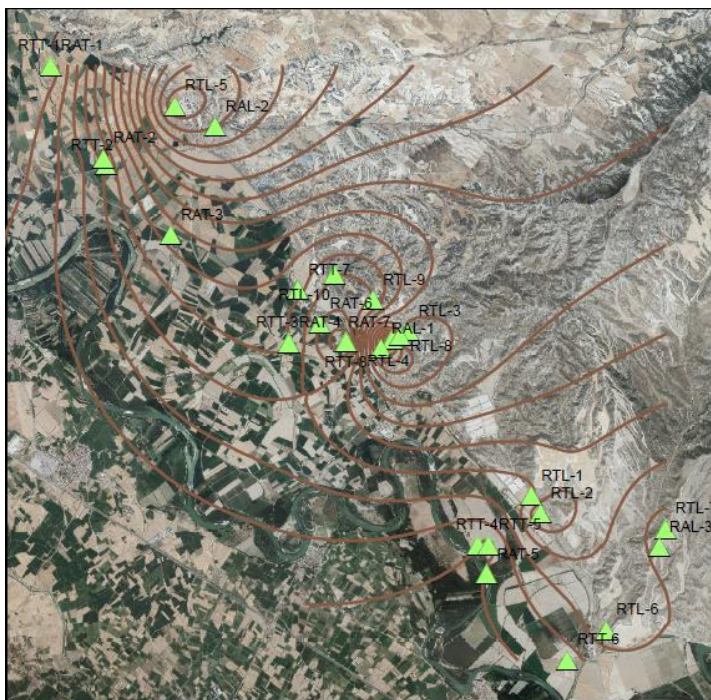


Fig. 11. Mapa aislíneas de la concentración en meq/l de  $SO_4^{2-}$

Tras poder analizar los mapas de aislíneas de los iones más importantes en la salinización y sodificación tanto de aguas como de suelos, se confirma que, en las zonas cercanas a las salidas de los barrancos, al escarpe y a las explotaciones salinas, hay unos valores mucho más elevados que en el resto de la zona de muestreo.

Sobre el escarpe de Remolinos se localizan diferentes tipos de movimientos de ladera, tales como desprendimientos y deslizamientos rotacionales. La evolución del escarpe se realiza mediante fracturación paralela al cauce y desplome de grandes bloques. En las zonas adyacentes, el río erosiona intensamente la base del escarpe, estando favorecida la magnitud del proceso por la composición inicial fundamentalmente halítica del mismo, provocando desplomes súbitos de grandes masas (F. Pellicer, 1984).

En áreas algo más alejadas, la erosión producida por las aguas superficiales lixivia las sales halíticas de todo el escarpe, produciéndose más lentamente el progresivo asentamiento del material restante y la subsiguiente fracturación en el contacto con la roca en la que todavía no

ha habido una tasa elevada de solubilización de sales. Estas fracturas paralelas al escarpe se convierten en nuevas vías de penetración de aguas subsaturadas que profundizan y hacen progresar el proceso. Por tanto, queda retratado que la actual evolución del escarpe tiene una relación clara con la solubilidad de las sales (J. Mandado et al, 1984). Ya que la lixiviación de sales por el agua de escorrentía superficial o subsuperficial fluye y se infiltra con alta carga de cloruros, sulfuros y sodio, hasta la llanura de inundación donde se generan surgencias de agua altamente contaminada y una afección a los campos de cultivo.

## 6. Medidas correctoras

A continuación, se proponen tres medidas aplicables a los suelos agrícolas para la reducción de la contaminación por sales y sodio según Geocalci:

1. Aumentar la permeabilidad de los suelos mediante labores profundas de desfonde e instalando una red de tubos de drenaje que facilite el desagüe de riegos y lluvias que arrastren las sales del terreno.

Los trabajos de desfonde profundo consisten en voltear los horizontes del suelo para fragmentar las capas más duras con el fin de favorecer la penetración de las raíces, de aumentar la capacidades de filtración y, por ende, la evacuación del agua que arrastrará las sales que se quieren eliminar. Para garantizar que la evacuación del agua es la correcta se recomienda instalar un sistema de drenes que nos aseguren una correcta remoción de sales evitando así la resalinización de los suelos. Así pues, existen dos tipos de drenes:

- Drenes a cielo abierto: zanjas con un pequeño talud los cuales son efectivos, pero pierden eficiencia de trabajo al poco tiempo debido a que pierden profundidad y a proliferación de malezas acuáticas. Para un óptimo funcionamiento es necesario limpiarlos y reprofundizarlos al menos una vez al año.
- Subterráneos: pueden ser de diversos materiales (hormigón, cerámica, PVC) y se recubren con material filtrante (ripio), cuya granulometría debe impedir el paso de sedimentos hacia la tubería y que no se obstruya con el tiempo. Tienen una inversión inicial más costosa, pero presenta ventajas sobre los drenes a cielo abierto como, por ejemplo: su mantenimiento es mínimo, no ocupan espacio ni interfieren con las labores culturales, y no interrumpen el tránsito de vehículos dentro de la propiedad ni es necesaria la construcción de pasantes y puentes.



Fig. 12. IMagen de drenes superficiales y subterráneos. Fuente: Geocalci, s.f

De manera complementaria al desfonde profundo y a la instalación de sistemas de drenaje, se recomienda efectuar lavados del terreno con unos riegos abundantes y lentos para que las sales sean arrastradas a la mayor profundidad posible y así eliminadas por dichos sistemas.

2. Aportar grandes cantidades de estiércol o turba negra y mezclar con la capa superior de la tierra para que el suelo retenga mejor la humedad.

El uso de estos sustratos orgánicos puede ser beneficioso para reducir la cantidad de sales ya que mejora las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo. Estos productos, disgregan las partículas disminuyendo la compactación, mejoran la capacidad de aireación y por tanto la capacidad de eliminación de sales del suelo, y también incrementan la capacidad de intercambio catiónico para reemplazar al sodio evitando así problemas de sodificación.

3. Por último, se recomienda utilizar fertilizantes cuyo contenido en sales sea adecuado para suelos con esta problemática, es decir, fertilizantes cuya concentración en sales no sea elevada para favorecer el crecimiento y producción del cultivo sin que aumente la concentración de sal del suelo evitando así los problemas derivados de la salinización y/o sodificación.

## 7. Conclusion

The study of salinity and sodicity in the soil and water in the study area between Tauste and Alagón has revealed a high concentration of sodium (Na), calcium (Ca), chlorides (Cl<sup>-</sup>), and sulphides (SO<sub>4</sub>). From the soil and water samples obtained in the field, and after chemical analysis in the laboratory, it is concluded that the study area has saline and saline-sodic soils, in which dispersion has been determined in three of them.

The maximum concentration of contamination comes from the Arroyo de las Salinas ravine, where the saline-sodic samples RTL-3 have been obtained with values of 29.1 dS/m of electrical conductivity, 87.90 mEq/L of sulphides, 318.73 mEq/L of chlorides and 325.37 mEq/L of sodium. Sample RTL-4 has electrical conductivity values of 48.3 dS/m, 151.66 mEq/L sulfates, 651.57 mEq/L chlorides and 665.97 mEq/L sodium. The samples located on the margin of the RTL-5 and RTL-2 escarpment show similar concentrations to those of the Salinas ravine. On the contrary, the samples obtained from the floodplain, both from rising water and from soils in cultivated fields, show lower concentration values.

The isoline maps clearly show a decrease in concentration from the exit of the ravine, the escarpment, and the salt works, towards the floodplain. Furthermore, it has been corroborated that the high salt concentration does not come from the irrigation waters, as these have normal conductivity and ion values.

Based on the above, it can be affirmed that the halitic deposit, located on the escarpment, due to processes of weathering and dissolution of its constituent minerals, these are leached towards lower topographies in favour of surface and subsurface runoff through the ravines and the escarpment diaclasate, which flows to the floodplain, where contamination of the fields occurs, and finally to the Ebro River.

## 8. Bibliografía

- AGROSAL (s.f): *Efectos de la Salinidad y la Sodicidad en los cultivos*. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (ivia). Recuperado el 27 de Abril de: <http://www.agrosal.ivia.es/efectos.html>
- Amezketa, E., (s.f): *Problemática relacionada con la Salinidad del Suelo*. Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación (DAGA). Recuperado el 27 de Abril de: <https://www.navarra.es/NR/rdonlyres/DC788C10-FD10-4CAB-9829-67EAC828A8C6/0/NavarraSalinidadSuelos.pdf>
- Aragües, R., Gimenez, F.A, y Quilez, D., (1986): *Balance de sales de la Cuenca del Ebro*. Sistema integrado del Ebro: estudio interdisciplinar, pp. 279-291.
- Ayto. Remolinos, (2020): *Remolinos*. Turismo de Zaragoza. Recuperado el 27 de Abril de: <https://www.turismodezaragoza.es/provincia/pueblos/remolinos.html>
- Castiella, J., Del Valle, J., Ramírez del Pozo, J.(1977) *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 321 (Tauste) y memoria*. IGME. 18 p
- Courel, G.F, (2019): *Suelos salinos y sódicos*. Cátedra de Edafología. Recuperado el 10 de Junio de:  
file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Suelos%20Salinos%20y%20s%C3%B3dicos%202019.pdf
- Department of Sustainable Natur Resources, (s.f): *Soil survey standard test method*. Emerson aggregate Test. Recuperado el 10 de Junio de:  
<https://www.environment.nsw.gov.au/resources/soils/testmethods/eat.pdf>
- Echeverría, M.T., Ibáñez, M.J., Pellicer, F., (1984): *Procesos actuales en el escarpe de yesos de Remolinos*. Recuperado el 27 de Abril de:  
<https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/cig/article/view/933>
- Esnaola, J.M., Leyva, F., (1995): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº353 (Pedrola) y memoria*. IGME. 71p
- Esnaola, J.M., Gil Martín, C., Marqués, L.A, Santos, J.A., (1995): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 354 (Alagón) y memoria*. IGME. 46p
- García, J., Galé, C., Querol, E., Mandado, J., Ramajo, J., Revuelto, C., Pueyo, O., Pocoví, A., López, P.L., (2019): *Remolinos: La sal de la vida....* Colección Geolodía. ISSN: 2603-8889. Editada por SGE.
- García Villar, A., Navarro J.I., Ramirez, J.I., Rodríguez Santisteban, R., Simón, J.L., Van de Hurk, A, (1995): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 322 (Remolinos) y memoria*. IGME. 65p.
- Gimenez, F.A, Gutierrez Elorza, M., Ibañez, M.J, Machín, J., Peña-Monné, J.L, Pocoví, J.A, Rodriguez Vidal, J., (1984): *El Cuaternario en la depresión del Ebro en la región aragonesa. Cartografía y síntesis de los conocimientos existentes*. Universidad de Zaragoza. CSIC. 217pags
- IGME, (s.f): *Documentación complementaria: Hidrogeología*. Hoja nº 354 (Alagón). 65p
- Lamz, A. y González, M.C, (2013): *La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata*. INCA. Cultivos tropicales, vol.34, nº4, p.31-42
- Lebrón, I., (1984): *Aportes de sales inorgánicas al rio Ebro entre Tudela y Zaragoza. Localización, mecanismos y criterios básicos para minimizarlos*. Universidad de Zaragoza
- Lebrón, I., (1988): *Suelos salino-sódico-alcálicos de la Depresión media del Ebro. Condiciones de formación, características y propiedades*. Universidad de zaragoza
- Mandado, J., Rodríguez, J., Tena, J.M, (1984): *La disolución de las rocas evaporíticas: Un importante factor geomorfológico en el Valle del Ebro*. Recuperado el 27 de Abril de:

[https://www.academia.edu/31104561/La\\_disoluci%C3%B3n\\_de\\_rocas\\_evapor%C3%A1ticas\\_un\\_importante\\_factor\\_geomorfol%C3%B3gico\\_en\\_el\\_Valle\\_del\\_Ebro](https://www.academia.edu/31104561/La_disoluci%C3%B3n_de_rocas_evapor%C3%A1ticas_un_importante_factor_geomorfol%C3%B3gico_en_el_Valle_del_Ebro)

- Marqués calvo, L.A., (1991): *Documentación complementaria: Neotectónica*. Hoja nº 354 (27-14) (Alagón). IGME. 19p
- Ministerio de agricultura, pesca y alimentación, (1987): *Métodos oficiales de análisis. Tomo III*.
- Pérez, A., Muñoz, A., Pardo, G., Villena, J., (1988): *Evolución de los sistemas lacustres del margen ibérico de la Depresión del Ebro (Sectores central y occidental) durante el Mioceno*. Acta Geológica Hispánica. Vol. 24. Nº3-4. págs. 243-257.
- Quirantes, J.P., (1972): *El cuaternario en la parte central de la Depresión del Ebro*. Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada. ISSN 0210-5462. Nº2. Págs. 63-68.
- Santos García, J.A., (1991): *Documentación complementaria: Informe sedimentológico*. Hoja nº354 (27-14) (Alagón). IGME. 25p



## Anexos

1. Tabla de las 28 muestras obtenidas de suelo y agua, se describe brevemente la localización y las coordenadas de las mismas.

Nº Muestra	Sigla	Este UTM (UTMX)	Norte UTM (UTMY)	Localización	Clase
1	RAT-1	645811,1	4638553,5	Camino Negre	Acequia
2	RTT-1	645811,1	4638553,5	Camino Negre	Acequia
3	RAT-2	646616,4	37714,2	Camino Negre	Acequia
4	RTT-2	646693,5	4636983,2	Camino del monte	Camino
5	RAT-3	647713,8	4635873,8	Canal de Tauste	Encharcamiento/ Surgencia
6	RTT-3	649589,5	4634158,1	Camino E Acequia Mejana	Campo
7	RAT-4	649589,5	4634158,1	Camino E Acequia Mejana	Encharcamiento/ Surgencia
8	RAT-5	652727	4630496,7	Rio Ebro	Ribera Rio Ebro
9	RTT-4	652587	4630959,8	NE Rio Ebro	Campo Rio Ebro
10	RTT-5	652757,4	4630959,1	Carretera Tudela-Alagon	Campo cultivado
11	RTL-1	653437,8	4631735,9	Barranco Marquesa	Campo
12	RTL-2	653582,9	4631457,4	Campo Barranco Marquesa	Campo cultivado
13	RTL-3	651484,5	4634352,5	B. Arroyo de las Salinas	Barranco
14	RTL-4	651227,9	4634214,8	B. Arroyo de las Salinas	Barranco
15	RAL-1	651053,3	4634064,3	B. Arroyo de las Salinas	Encharcamiento/ Surgencia
16	RAL-2	648422,6	4637596	Barranco de la Lengua	Rio estancado
17	RTL-5	647781,4	4637914,5	Carretera Tudela-Alagon	Escarpe
18	RTL-6	654627,6	4629606,2	Camino Alagon-B. Casa	Campo
19	RAL-3	655466,2	4630928,2	Camino Alagón	Encharcamiento/ Surgencia
20	RTL-7	655565,2	4631213,7	Camino Alagon	Campo
21	RTT-6	654006,5	4629131,8	Riego de Pola	Campo cultivado
22	RTL-8	651356	4634273,4	B. Arroyo de las Salinas	Barranco
23	RTL-9	650923,4	4634835,3	Sin nombre	Campo
24	RTL-10	650314,9	4635251,8	Sin nombre	Barranco
25	RTT-7	649732,7	4635005,2	Sin nombre	Campo
26	RAT-6	650081,5	4634470,2	Sin nombre	Encharcamiento/Surgencia
27	RTT-8	650493,8	4634176,9	Sin nombre	Acequia
28	RAT-7	650493,8	4634176,9	Sin nombre	Acequia