

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del
Medio Natural

Máster Universitario en Ingeniería Agronómica



Trabajo de Fin de Máster:

**Evaluación de las propiedades físico-químicas de
suelos hídricos mediterráneos: El caso de la Albufera de Valencia**

Curso: 2020/2021

Autor: Jaime Bustamante Albert

Tutor: Héctor Moreno Ramón

En Valencia a Julio de 2020

Evaluación de las propiedades físico-químicas de suelos hídricos mediterráneos: El caso de la Albufera de Valencia.

Resumen:

El presente trabajo de fin de máster ha consistido en el muestreo, análisis y cartografiado de los suelos hídricos de todo el Parque Natural de la Albufera de Valencia. Se han realizado un total de 113 sondeos mediante barrena helicoidal, obteniendo de cada uno de ellos cuatro muestras correspondientes a las profundidades 0-20cm, 20-40cm, 40-60cm y 60-80cm. De cada una de estas muestras se han analizado las siguientes propiedades físico-químicas: $pH_{1/2.5}$, conductividad eléctrica 1/5, carbonatos totales, materia orgánica total, nitrógeno total, hierro total y fracciones y clase textural. Con los resultados obtenidos se ha realizado un análisis estadístico para estudiar sus valores medios, máximos y mínimos, así como su variabilidad y las correlaciones existentes entre ellos. Además se han cartografiado las propiedades en cada uno de las 4 profundidades y se ha analizado la distribución espacial.

Palabras clave: suelos hídricos, Albufera, propiedades físico-químicas, cartografiado, correlaciones.

Summary:

This master thesis has consisted on the sampling, analysis and mapping of hydric soils from the whole Albufera de Valencia Natural Park. A total amount of 113 explorations has been made with the help of an helical drill. From each exploration, four samples have been taken, covering the following depths: 0-20cm, 20-40cm, 40-60cm and 60-80cm. Every sample has then been analyzed in the laboratory in order to find out about their physical and chemical properties, specifically $pH_{1/2.5}$, electric conductivity 1/5, total carbonates, total organic matter, total nitrogen, total iron and textural fractions as well as textural classification. Once the results were ready, a statistical analysis has been carried out with the aim of determining mean, maximum and minimum values, as well as their variability and the existing correlations between them. In addition to this, all properties have been mapped in every depth and the special distribution of the results analyzed.

Key words: hydric soils, Albufera, physical properties, chemical properties, mapping, correlations.

Autor: Jaime Bustamante Albert.

Tutor: Héctor Moreno Ramón.

Fecha: Valencia, Julio de 2020.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a mis tutores Héctor Moreno y Sara Ibañez la oportunidad que me han dado para la realización de este trabajo, gracias al cual he tenido la posibilidad de aprender mucho, tanto a nivel de trabajo de campo como de laboratorio. Siempre se han mantenido involucrados en el desarrollo y me han ofrecido su ayuda en todo momento.

También a mis compañeros de laboratorio, sin los que no hubiese sido capaz de llevar a cabo todo el trabajo yo solo y a mis compañeros de máster en general que me han acompañado hasta ahora.

Por supuesto también a mi familia que se han esforzado para que yo pudiera hacer este Máster fuera de casa y que siempre me apoyan y me aguantan. Especial dedicatoria a mi abuela que es la última que me queda.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. Los humedales.....	1
1.1.1. Características generales de la Albufera de Valencia.....	1
1.1.2. La evolución de la Albufera de Valencia	2
1.1.3. Hidrología.....	2
1.1.4. Geología y geomorfología.....	3
1.2. Los suelos hídricos	3
1.2.1. La formación de suelos hídricos.....	4
1.2.3. Las características redoximorfológicas	4
1.2.4. Los suelos hídricos en la Albufera de Valencia	6
1.3. Cartografiado y mapas de suelos.....	7
1.3.1. Definición y utilidad de los mapas de suelos	7
1.3.2. Elaboración de los mapas de suelos	8
1.3.3. Propiedades de los mapas de suelos	8
1.3.4. El cartografiado de suelos hídricos en la Albufera.....	9
2. Justificación y objetivos.....	10
3. Materiales y métodos.....	11
3.1. La zona de estudio.....	11
3.2. Metodología de trabajo.....	11
3.2.1. Primera fase de gabinete.....	12
3.2.2. Fase de campo.....	12
3.2.3. Fase de laboratorio	13
3.2.4. Segunda fase de gabinete	16
4. Resultados y discusión.....	17
4.1. Análisis estadístico por propiedades.....	17
4.1.1. $pH_{1/2.5}$	17
4.1.2. Conductividad eléctrica $CE_{1/5}$	19
4.1.3. Carbonatos.....	21
4.1.4. Materia orgánica.....	23
4.1.5. Nitrógeno total.....	26
4.1.6. Hierro total.....	28
4.1.7. Textura.....	29
4.2. Análisis de correlaciones entre propiedades.....	32
5. Conclusiones	35
6. Bibliografía.....	37

1. Introducción

1.1. Los humedales

El concepto de humedal ha experimentado una evolución durante las últimas décadas, que ha permitido que estos enclaves naturales se tengan en consideración más allá de sus funciones naturales como soporte de biodiversidad. Las zonas húmedas constituyen un factor transcendental dentro de la sociedad y la economía locales, además de estar directamente implicadas en el ciclo global del agua. Como indican Durán *et al.* (2005), citando al Ministerio de Medio Ambiente, la productividad de las zonas húmedas “*les hace figurar entre los sistemas naturales que más cantidad de bienes y servicios pueden aportar a la sociedad, significando en sí mismos, un patrimonio natural y cultural indiscutible*”.

Según la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional (RAMSAR), “*se consideran humedales las extensiones de marismas, pantanos, turberas o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros.*” (RAMSAR 1994).

España goza de una gran diversidad de tipos de humedales, pudiendo encontrarse desde naturales a artificiales, o bien costeros o continentales y también desde mediterráneos a atlánticos. Dentro de este conjunto, la Albufera de Valencia se clasifica como un humedal de ámbito costero mediterráneo, cuya génesis y evolución están dominadas por una dinámica litoral. Es decir, la formación de este tipo de zonas húmedas es debida al cierre de una bahía mediante la formación de una restinga arenosa, provocando de esta manera su separación del mar (Durán *et al.*, 2005).

1.1.1. Características generales de la Albufera de Valencia

La Albufera de Valencia es la mayor zona húmeda de la Comunidad Valenciana, abarcando una superficie total de 21120 ha, lo que representa un 46% de la superficie total de zonas húmedas españolas. Fue declarada Parque Natural por el Decreto 89/1986 de 8 de julio de 1986 de la Generalitat Valenciana (derogado y sustituido por el Decreto 71/1993 y modificado por D.259/2004).

El Parque se ubica a unos 15 km al sur de la ciudad de Valencia, localizándose entre los paralelos 39°19' y 39°22' de latitud norte y los meridianos 3°18' y 3°22' de longitud oeste. Abarca 13 términos municipales (todos dentro de la provincia de Valencia), de los cuales los más relevantes son, por orden de superficie: Sueca (34.4%), Valencia (27.8%) y Sollana (12.8%) (GVA, 2021).

Dentro de la totalidad del Parque Natural se pueden distinguir 4 ambientes diferenciados:

- La restinga arenosa (3300 ha) que forma un cordón litoral que recorre el Parque de norte a sur y hace de barrera entre el mar y el propio humedal.
- El más extenso lo constituye el marjal (15000 ha), que incluye los arrozales, la huerta, las acequias y los *ullals* (surgencias naturales de agua dulce).
- El lago, con una superficie de 2500 ha y que constituye el ambiente más representativo del Parque.
- Por último, muy reducido (6.27 ha), está representado por la *Muntanyeta dels Sants*, una elevación carbonatada en medio de una llanura aluvial.

Además de ser Parque Natural, también fue reconocida en 1989 como “Humedal de importancia internacional” según la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional (RAMSAR) por su relevancia como hábitat de aves acuáticas. También forma parte de la Red Natura 2000 al ser declarada como “Zona de especial protección de las Aves” (ZEPA) en 1990 y seleccionada como “Lugar de Importancia Comunitaria” (LIC) en 2001.

1.1.2. La evolución de la Albufera de Valencia

El origen de la Albufera fue un golfo marino de amplia extensión situado entre Valencia y Cullera, que se fue cerrando debido a la deposición de los sedimentos del río Turia hace entre 6000 y 3000 años. Según Boira (2012), la causa radica en la deriva marina existente en el litoral valenciano, que flexiona hacia el sur las desembocaduras de sus principales ríos (Turia, Júcar y Serpis), creándose así restingas arenosas paralelas a la costa. Estas aíslan depresiones que dan lugar a áreas lacustres receptoras de aguas continentales y que disponen de alguna salida al mar a través de canales o golgas.

Este proceso dio lugar a un lago que, en tiempos de los romanos (s. IV), abarcaba unas 30000 ha (Gómez-Senent, 2002). Desde entonces, la superficie lacustre se encuentra en continuo decrecimiento como resultado del aterramiento natural y del ejercido de forma antrópica, siendo la superficie actual de aproximadamente 2500ha. Es remarcable el retroceso que se produce desde finales del siglo XIX (8190 ha en el año 1863) como consecuencia de la transformación de superficie del lago en tierras cultivables (Moreno, 2013).

La implantación del cultivo del arroz es la principal causa de la regresión de la superficie del lago en los últimos siglos. Pese a ello, desde su introducción se estableció una coexistencia armoniosa entre el ecosistema natural original y el antrópico (generado por las técnicas de cultivo). Esta relación resultó beneficiosa para la biodiversidad, favoreciendo el desarrollo de flora y fauna, y la estabilidad de las cadenas tróficas (Boira, 2012).

Este aprovechamiento agrícola del terreno, pese a provocar una intensa alteración del régimen natural hídrico del humedal, ha permitido a su vez, su conservación a lo largo del tiempo, ya que las principales contribuciones hídricas al lago provienen de los caudales de los ríos Júcar y Turia empleados para el cultivo del arroz (Durán *et al.*, 2005).

Actualmente, el lago se encuentra en un mal estado de conservación ecológica desde mitades del siglo XX. Las reducciones drásticas de los caudales de riego y la pérdida de calidad de las aguas recibidas, derivada de los vertidos procedentes de la industria local en desarrollo, redujeron de forma drástica la biodiversidad a partir de los años sesenta. Esto se suma al proceso de aterramiento y abandono sufrido por la mayoría de los ullals y al aumento en las tasas de contaminación y eutrofización de las aguas, que también contribuyen a la degradación del lago (Boira, 2012).

1.1.3. Hidrología

El Parque Natural de la Albufera de Valencia se encuentra situado sobre la Unidad Hidrogeológica Plana de Valencia, un sistema hidrogeológico que abarca alrededor de 1200 km², de los cuales la Albufera supone un 23.4%. Este se caracteriza porque sus límites son abiertos, existiendo permanentemente una relación hídrica con los acuíferos calcáreos colindantes, con las cuencas de los ríos Turia y Júcar y con el Mar Mediterráneo. Los terrenos que engloba están por debajo de los 10 msnm y poseen poca pendiente (Moreno, 2013).

El régimen hídrico en el Parque Natural está definido por las aportaciones de la lluvia, la infiltración proveniente de acuíferos colindantes y los retornos que proceden de las aguas de regadío. Estas últimas son de especial importancia pues suponen un 80% de la recarga de los acuíferos y del lago y se producen a través de una extensa red de acequias. En los últimos años los módulos de riego no han dejado de reducirse, lo que ha causado un problema hídrico para mantener un buen estado del ecosistema de la Albufera (Boira, 2012; Durán *et al.*, 2005).

Además de los retornos de las aguas de riego, se deben tener en cuenta las aportaciones provenientes de los ullals, que son afloramientos superficiales de los acuíferos. Esto sucede, gracias a que las condiciones naturales del humedal están directamente relacionadas con el estado de los acuíferos conectados a él. Estas redes funcionan en ambos sentidos, pudiendo tanto el

humedal como el acuífero actuar como receptores o fuentes de agua. La aportación de estos últimos no es significativa a nivel cuantitativo, pero la elevada calidad de sus aguas es determinante para permitir la existencia de las cadenas tróficas típicas de este ecosistema (Durán *et al.*, 2005).

La gestión del nivel del agua se realiza mediante el empleo de un sistema de compuertas situadas en las tres golas existentes (Perelló, Perellonet y Puchol), en coordinación con el cultivo del arroz. Esto permite además mantener el carácter dulce del agua del lago al evitar la entrada de agua salada del mar (Boira, 2012).

1.1.4. Geología y geomorfología

La Albufera de Valencia se encuentra en la plana aluvial situada entre los ríos Turia y Júcar. La zona englobada en el marjal constituye un área de relleno de materiales procedentes de zonas altas de las cuencas del Júcar y el Turia, que están dispuestos en transición desde el medio continental hasta el marino (Roselló, 1972).

Estos materiales son casi en su totalidad limos pertenecientes al Holoceno (Cuaternario), a excepción del afloramiento rocoso denominado “Muntanyeta dels Sants”. Este se trata de un promontorio de unos 27 metros de altura y 6 hectáreas de superficie, formado por materiales del Cretácico superior (Moreno, 2013).

La transición entre el medio continental y el marino queda patente al dar los limos paso a materiales más arenosos según te acercas a la restinga arenosa. Una vez se alcanza el cordón dunar, prácticamente lo único que queda presente son arenas (Sanchís *et al.*, 1998).

1.2. Los suelos hídricos

El desarrollo de las civilizaciones como las conocemos hoy en día viene ligado al descubrimiento de la agricultura hace unos 11000 años y, por tanto, también al desarrollo del manejo del suelo como soporte vital de los cultivos.

El estudio de los suelos es intrincado y depende de muchos factores combinados que varían con el tiempo y la ubicación. Como consecuencia, la definición de suelo está en constante revisión, pero una de las más ampliamente difundidas es la del Departamento de Agricultura de los EEUU (USDA):

“Un suelo es un cuerpo natural compuesto de sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que se encuentra sobre la superficie terrestre ocupando su espacio y que está caracterizada por uno o ambos de los siguientes conceptos: horizontes o capas que se diferencian del material inicial o parental como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia o por la habilidad de soportar plantas en un medio natural” (Soil Survey Staff, 2014).

En los humedales, el factor ecológico y formador más determinante es el agua. Sin ella no existirían, ni la flora y fauna propia de estas zonas, ni los suelos hídricos que las caracterizan. La presencia continuada o predominante de agua en superficie es la causante de las características de este tipo de suelos, que tienen un comportamiento que difiere de los presentes en hábitats terrestres (Durán *et al.*, 2005). Una vez más, el USDA ofrece una definición de lo que son estos suelos:

“Aquellos que se han formado bajo condiciones de saturación, inundación y encharcamiento y que han mantenido el agua el tiempo suficiente durante la estación de crecimiento de las plantas para desarrollar condiciones anaeróbicas en su parte superior, presentando características morfológicas que son resultado de períodos de inundación que duran bastantes días.” (USDA-NRCS, 2010).

1.2.1. La formación de suelos hídricos

La génesis de los suelos hídricos está completamente condicionada por la presencia de agua en condiciones de saturación. Un suelo se considera que está saturado cuando la presión hídrica del suelo es nula o positiva (el agua expulsa el aire de los poros del suelo), lo que se produce cuando el suelo en cuestión se encuentra por debajo de la capa freática (Moreno, 2013).

Esto implica que la concentración de oxígeno presente en el espacio poroso se reduce casi a cero, por lo que el intercambio de oxígeno debe producirse por difusión a través del agua. Bajo estas condiciones y siempre que exista temperatura y materia orgánica suficiente, los microorganismos anaerobios llevan a cabo procesos de reducción de los componentes inorgánicos del suelo (nitratos, manganeso, hierro, sulfatos...), que abundan en los horizontes superficiales. En el caso de que el nivel de la capa freática varíe con el tiempo, los procesos de oxidación y reducción de estos compuestos tienen lugar de manera cíclica, acompañados con los periodos secos y húmedos (Vepraskas, 1996).

Esta alternancia entre las condiciones reductoras y oxidantes crea unas coloraciones típicas de los suelos hídricos. A estas variaciones en el color se les denomina características redoximorfológicas.

Esta capacidad reductora de los suelos hídricos influye también en la cantidad de materia orgánica presente en el suelo. En las zonas húmedas la eficiencia en la descomposición de los compuestos orgánicos es menor, debido a la ausencia de actividad de microorganismos aerobios. La descomposición sí que se produce, teniendo lugar los procesos de humificación y desmineralización de la materia orgánica, pero en menor escala. Los suelos que acumulan mucha materia orgánica adoptan colores oscuros, incluso negros. Esta característica de los suelos hídricos demuestra que los humedales funcionan como sumideros de carbono, lo que les otorga gran valor ecológico (Grasset *et al.*, 2017).

Otro proceso formador relevante es la salinización que tiene lugar en los humedales costeros, en los que la intrusión marina puede aumentar la concentración de sales presentes en la capa freática, que al fluctuar aporta sales al suelo (Moreno, 2013).

1.2.3. Las características redoximorfológicas

Según Vepraskas (2015), las características redoximórficas son aquellas que se forman debido a la reducción, movimiento y oxidación de óxidos de Fe y Mn. Estas implican variaciones en la coloración del suelo que son lo suficientemente grandes como para ser apreciadas a simple vista.

La utilidad de las características redoximorfológicas radica en el carácter dinámico del color del suelo, que cambia si lo hace la hidrología. Gracias a la relativamente rápida formación de estas coloraciones, se puede estimar el tiempo que los suelos han permanecido saturados y reducidos. No obstante, estas correlaciones deben calibrarse según el nivel de la capa freática y la región (Lindbo *et al.*, 2010).

Vepraskas (1996), en sus ensayos de campo, determinó que pueden producirse dos tipos de características:

- Agotamientos o disminuciones redox: indican dónde ha ocurrido la saturación y reducción.

Estos se producen cuando las condiciones son de saturación y los óxidos de hierro y manganeso son reducidos, aumentando su solubilidad y provocando su difusión hacia los horizontes más profundos. Las observaciones características de este proceso, llamado gleyzación, son una pérdida de color por la ausencia de óxidos que vuelve el suelo gris, y una coloración verde en los lugares donde se acumulan las formas reducidas. La reducción del hierro causa también que la estabilidad

de las arcillas decaiga, teniendo lugar una mayor dispersión e iluviación hacia horizontes inferiores.

Estas regiones pueden darse en la matriz del suelo o solo en los poros. En este último caso, el aspecto de los agotamientos de Fe dependerá de la naturaleza del canal formado, las raíces grandes provocan agotamientos grandes y espaciados, mientras que las pequeñas causan agotamientos pequeños y concentrados en poco espacio. Los agotamientos no tienen por qué producirse en canales estables (Lindbo *et al.*, 2010).

- Concentraciones redox: indican dónde ha ocurrido la oxidación.

Estas ocurren al terminar la fase de saturación, cuando el oxígeno vuelve a estar presente en el suelo y causa que los elementos químicos que habían sido reducidos precipiten. Esto causa de nuevo coloraciones características en tonos marrones, rojos y amarillos. Este proceso se llama pseudogleización (USDA-NRCS, 2018) y puede aparecer bajo las siguientes formas:

Se producen acumulaciones de óxidos de Fe/Mn que pueden formar cuerpos duros como nódulos y concreciones irregulares, que habitualmente tienen forma esférica. Sus bordes indican su estado de formación, siendo difusos cuando el nódulo se está aún creando y definido cuando es estable. Una vez que se forman son difíciles de alterar. También se producen masas blandas de óxidos de Fe/Mn en el interior de la matriz, a menudo en forma de moteados. Otro lugar en el que se acumulan los óxidos son en el interior de los poros, fisuras o canales que se producen en la matriz del suelo, habitualmente por la acción de las raíces.

Para que se produzcan condiciones adecuadas para la formación de características redoximorfológicas no existe un mínimo de duración que deba estar el suelo en condiciones de saturación. No obstante, (Vepraskas, 1996) en sus ensayos de campo estimó la duración de cada proceso en condiciones ideales:

- Concentraciones: 30 días.
- Agotamientos: 8 días.
- Reducción de matriz: 7 días.

A continuación, se presentan dos ejemplos de las características redoximorfológicas observadas en suelos extraídos en los muestreos. La Figura 1 contiene una acumulación de hierro (color rojo), mientras que la Figura 2 exhibe un agotamiento de hierro por condiciones reductoras (color gris y tonalidades verdes):

Figura 1. Muestra de suelo con acumulación de hierro.



Figura 2. Muestra de suelo con agotamiento de hierro.



El ejemplo más simple para ilustrar la formación de características redoximorfológicas se produce en un poro creado por una raíz (Lindbo *et al.*, 2010): Cuando esta muere, si el suelo no está saturado, las bacterias encargadas de descomponer la raíz liberan electrones que reducen oxígeno a agua. En este momento la matriz tendrá un color marrón.

Al saturarse el suelo, ya que no hay presencia de oxígeno, estos electrones reducirán el Fe presente en la matriz a lo largo del poro creando un revestimiento de color grisáceo. Mientras el suelo permanezca inundado, el Fe reducido podrá difundirse hacia el interior de la matriz.

Cuando este suelo se drena, el oxígeno penetra en el poro y desde allí en la matriz del suelo, causando que el Fe reducido, que ha difundido en la matriz, se oxide formando masas de Fe.

Si la raíz que ocupa el poro pertenece a una planta viva parte del oxígeno que la planta absorbe a través de las hojas se transmite hasta las raíces y desde allí al suelo. Si el suelo se encuentra reducido, la presencia de oxígeno provoca que el Fe^{2+} se oxide, adquiriendo un color rojizo únicamente en la superficie en contacto con la raíz. En las Figuras 3 y 4 se exponen ejemplos de este fenómeno observados en muestras obtenidas en los sondeos realizados:

Figuras 3 y 4: Efecto de las raíces sobre las características redoximorfológicas.



1.2.4. Los suelos hídricos en la Albufera de Valencia

El suelo de la Albufera de Valencia sea posiblemente el recurso menos estudiado del Parque Natural. La calidad de las aguas, la fauna, la vegetación, la contaminación han sido a lo largo de la historia la parte principal de las investigaciones sobre el estado del parque, dejando de lado los suelos. Según Moreno (2013), los suelos de la Albufera pueden agruparse en tres tipos distintos:

Los primeros corresponden a los localizados en la Devesa, que son aquellos territorios situados dentro de la restinga arenosa. Todos ellos coinciden en varias de sus propiedades: en primer lugar, presentan textura arenosa. Esto sucede, como indica Sanjaume (1974), debido a que su formación es provocada por la acción del viento, que acumula la arena marina contra la playa, creando crestas paralelas y alargadas perpendiculares a la acción del viento dominante. La segunda característica es el hidromorfismo, es decir, existen permanente o de forma temporal condiciones de saturación asociadas a actividad reductora. Como se ha indicado anteriormente, esto es la principal característica de los suelos hídricos. El tercer aspecto es el régimen de salinidad afectado por la actividad de la capa freática. La cercanía al mar y la textura arenosa favorecen la intrusión marina, que saliniza los suelos.

Dentro de los suelos pertenecientes a la Devesa, hay que distinguir entre los que constituyen las propias dunas y zona de bosque y los llamados *mallaes*. Estas son depresiones interdunares que a menudo se sitúan por debajo del nivel del mar, esto provoca que la capa freática aflore, dándose

condiciones de muy elevada salinidad. En este contexto se produce el afloramiento de una vegetación halófila característica (Sanchís *et al.*, 1998).

La segunda clase de suelos se encuentran en las zonas más elevadas del Parque (ubicadas en la parte oeste) y que se emplean para cultivos hortícolas y de cítricos. Estos suelos de cultivo se componen de limos principalmente y tienen un gran potencial agrícola, gracias a su textura franca, su pH básico y sus niveles equilibrados de materia orgánica, fósforo y nitrógeno. Además, estos suelos presentan baja salinidad, pues se benefician de su posición ligeramente elevada, con respecto al resto del Parque, para evitar el efecto de la capa freática. Dentro de esta clase también se cuentan los relieves aislados, como la Muntanyeta dels Sants, donde se encuentran afloramientos rocosos o suelos que no alcanzan una profundidad superior a los 30cm (Moreno, 2013).

El tercer tipo de suelos es el que tiene mayor extensión dentro del Parque, ya que son los correspondientes a los arrozales colindantes a la laguna y al marjal. Moreno (2013) los define como suelos francos y franco-arcillosos y con escasa presencia de elementos gruesos. Los niveles de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico se muestran elevados y la salinidad es destacable. Considera los valores de potasio, calcio y magnesio óptimos, además de encontrarse elevados valores de nitrógeno y fósforo en las zonas situadas al norte del lago.

A esta última clase pertenecen los suelos localizados en los *tancats*. Un *tancat* es una unidad hidrológicamente cerrada y limitada perimetralmente por una mota de barro. Están compuestos por un conjunto de arrozales por los que circula el agua de forma continua. La lámina de agua entra al *tancat* desde el punto más elevado y fluye hasta el más deprimido, que se encuentra habitualmente por debajo del nivel del lago (Moreno, 2013). Estos recintos se crearon ganando superficie al lago, mediante la técnica del aterramiento, incorporando sedimentos del fondo del lago o tierra procedente de las zonas altas hasta que se disponía de suelo apto para cultivar el arroz (Boira, 2012).

1.3. Cartografiado y mapas de suelos

1.3.1. Definición y utilidad de los mapas de suelos

Los usos que se pueden dar a un terreno son diversos y las actuaciones que sobre ellos se realizan tienen repercusiones tanto económicas como medioambientales. La dificultad estriba en determinar qué uso, de todos los posibles, se adecúa mejor a ese tipo de terreno. Para eso es necesario un amplio conocimiento del mismo y de los suelos que lo componen, pues cada suelo tiene aptitudes y necesidades de conservación diferentes.

Con el fin de comprender cómo funcionan aquellos sistemas ligados a las propiedades de los suelos, desde finales del s. XIX se llevan desarrollando inventarios y mapas de suelos que ayudan a elaborar una planificación más eficiente y equilibrada del uso de los recursos. Esta debe tener en cuenta tanto el potencial como la fragilidad de los recursos y debe guiarse por criterios que eviten la degradación de los mismos, es decir, sostenible.

El empleo de los mapas de suelos está extendido por muchas disciplinas profesionales, desde la ordenación del territorio hasta la ingeniería civil y la agrícola. Representa una de las bases para la toma de decisiones sobre el uso del territorio, ya que permite evitar errores que pueden aumentar el riesgo de producir impactos medioambientales indeseables o de degradar el medio en general.

Porta *et al.* (1999) definen un mapa de suelos como “*una representación plana, simplificada, de un determinado territorio. Al levantar un mapa de suelos, se identifican, definen, describen y se delinean las unidades obtenidas, con el fin de poder hacer predicciones de uso acerca de ellas*”.

Los mapas de suelos proporcionan información sobre los tipos de suelos, su distribución espacial y sus características morfológicas, físicas y químicas. El objetivo de su elaboración es la de crear una cartografía que caracterice la región a partir de variables que tienen que ver con el rendimiento de la actividad agrícola o de otro tipo. Disponer de las características del suelo permite valorar de forma adecuada el suelo y su estado actual, así como hacer una proyección de futuro en función de su potencial para el cultivo (Kurtz, 2015).

1.3.2. Elaboración de los mapas de suelos

El estudio de los mapas de suelos es el estudio de la variabilidad que existe dentro de un territorio y puede abordarse mediante diversas técnicas, dependiendo del problema a resolver.

Se producen unos mapas donde el espacio queda dividido en un conjunto de áreas contiguas llamadas unidades cartográficas, a las que se les asigna una categoría determinada según el suelo que haya presente. Estos mapas pueden dar información mediante áreas disyuntas (unidades cartográficas), pero también como puntos aislados con valores asignados, o como isolíneas (Porta *et al.*, 1999).

Un mapa de suelos se construye a partir de una visita en campo en la que se busca un punto representativo del suelo en cada una de las diferentes cuadrículas de muestreo que se han elaborado previamente. En cada uno de esos puntos se realiza una calicata o un sondeo con una barrena (Vera *et al.*, 2017).

Con tecnologías como la teledetección se ha podido optimizar y acelerar la toma de datos clásica, realizándose un muestreo más dirigido y con una densidad de puntos adecuada a la diferente tipología o variabilidad de suelos existente en la parcela. Además, los Sistemas de Información Geográfica permiten una explotación más exhaustiva de la información de suelos y su combinación con otros datos de diversa procedencia (Moreno, 2013).

1.3.3. Propiedades de los mapas de suelos

La finalidad de los mapas de suelos está directamente relacionada con dos de las propiedades más importantes de los mismos: el nivel de detalle y la escala. Previamente a comenzar la toma de datos y la elaboración del mapa, se debe estudiar cuáles son el nivel de detalle y la escala más adecuadas, pues influirá en gran medida sobre la utilidad real que tendrá el mapa.

La elaboración de un mapa de suelos es una tarea vasta, que se puede abordar de muchas maneras y mediante el empleo de diversas técnicas y tecnologías. Sin embargo, existen ciertas propiedades inherentes a los mapas que se deben determinar atendiendo a la finalidad que tendrán los mismos y a los recursos y capacidades de las que se dispone. A continuación, se relacionarán entre sí las propiedades siguientes:

- El nivel de detalle.
- La escala.
- La precisión.

El nivel de detalle se refiere a la cantidad de información geográfica que muestra el mapa. El detalle con el que se elabore un mapa es función de la finalidad que se le asigne al mismo y del espacio disponible para situar elementos en el mapa sin que cause confusión visual (Porta *et al.*, 1999).

Aunque no depende de la escala, en general, los mapas de escala grande muestran más detalle que los de escala pequeña, por lo que ambos conceptos están relacionados. La escala a la que se trabaja será menor en planificaciones que abarquen grandes superficies, que en áreas locales. Esto implica que se pueda representar una mayor cantidad de información por unidad de superficie cuando las

escalas que se utilizan son más grandes. El resultado es que las unidades representadas en un mapa con mayor escala son más homogéneas que las de uno con escala menor (Vera *et al.*, 2017).

Respecto a la escala también hay que considerar que el valor predictivo de un mapa se incrementa según la escala aumenta, si bien dentro de las escalas grandes este incremento va siendo cada vez menor. Sin embargo, el empleo de escalas muy grandes supone un gran aumento del coste de realización, por lo que se desaconsejan habitualmente, estando justificadas en casos como los de las fincas experimentales (Porta *et al.*, 1999).

El nivel de detalle no debe confundirse con la precisión, que define la calidad de la información disponible. Elaborar mapas con precisión elevada exige un gran coste en tiempo y en recursos (tanto humanos como económicos). Hay que tener en cuenta que pretender realizar mapas rápidamente repercute en la cantidad y calidad de la información que presentan, por lo que la planificación previa es muy importante (Porta *et al.*, 1999).

1.3.4. El cartografiado de suelos hídricos en la Albufera

Dentro del cartografiado de suelos, el caso de los suelos hídricos es de particular complejidad a causa de la homogeneidad presente y la dificultad para establecer unidades cartográficas distinguibles unas de otras.

La explicación de la falta de variabilidad se basa en los procesos y factores formadores de suelos, que, según (Moreno, 2013), son los siguientes seis:

- El clima, tanto actual como pasado.
- La geomorfología de la zona de estudio y su entorno.
- El material parental.
- El tiempo de formación.
- Los factores bióticos (flora y fauna) que influyen en el perfil
- Algunos autores consideran también el efecto antrópico.

En el caso de los suelos hídricos, las implicaciones sobre cada uno de los factores son:

El clima supone un factor con importancia secundaria en los ecosistemas acuáticos y palustres. El efecto de las precipitaciones, como se ha indicado anteriormente, no supone un aporte significativo al nivel de las zonas inundadas y la humedad relativa es muy estable. Al tratarse de un humedal costero, las temperaturas tampoco varían en gran medida (18°C de media anual) (Durán *et al.*, 2005), aunque el efecto del viento sí que supone un factor relevante. Este tiene un papel central en la formación de la restinga arenosa, acrecentado además por el hecho de que el Mar Mediterráneo no sufre grandes variaciones en las mareas Sanjaume (1974).

La geomorfología no ofrece tampoco una amplia variabilidad de datos, pues la zona de la Albufera carece apenas de pendiente y no cuenta con elevaciones a excepción de la Muntanyeta dels Sants. La variabilidad disponible la aporta la distinción entre los tres ambientes principales, que ya se han descrito, (la restinga arenosa, el marjal y las zonas altas) pero dentro de ellas no se encuentra heterogeneidad.

El material parental también es homogéneo, además de tratarse principalmente de sedimentos aportados constantemente por los cauces de los ríos, por lo que no se han producido procesos transformadores sobre ellos que puedan distinguir claramente unos a unos suelos de otros. Esto implica que el tiempo de formación es común para todos.

Los factores bióticos están directamente relacionados con el efecto antrópico, ya que desde que se implantó el cultivo del arroz, la biodiversidad está acotada y ligada directamente a esta actividad. Sí que es cierto, que dentro de la totalidad del Parque se aprecian diferencias en la vegetación presente en el parque, apareciendo cultivos leñosos en las zonas altas, arrozales en el

marjal y zona forestal en la devesa. Dentro del cordón dunar también se intercalan biotipos, por ejemplo, en las *mallaes* (Boira, 2012).

Todos estos condicionantes provocan que la elaboración de mapas de los suelos hídricos de la Albufera resulte compleja y requiera enfocar el estudio de la variabilidad en propiedades físicas y químicas específicas, pues las generales son, en general, demasiado homogéneas.

2. Justificación y objetivos.

La principal justificación para la realización de este Trabajo de Fin de Máster es la ausencia de cartografía de suelos de todo el Parque Natural de la Albufera de Valencia. Hasta el momento, los trabajos realizados al respecto son, o muy generalistas o no cubren la superficie completa del Parque Natural.

Concretamente a nivel del Parque natural solamente existe la cartografía del proyecto LUCDEME (Proyecto de Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo) (Mondria, 2003) que caracteriza los suelos del sureste español a escala 1:100000. Pese a tratarse de cartografía relativamente actual, la escala resulta demasiado pequeña para la superficie que abarca la Albufera de Valencia, solamente estando cartografiada la hoja 722, es decir la mitad norte del Parque Natural.

Por otro lado, y ya referidos a la Albufera en concreto, existen los dos mapas recopilados por Valles (1979), que constituyen la cartografía histórica de los suelos de la Albufera y que no resultan compatibles para trabajar con los Sistemas de Información Geográfica con los que se trabaja hoy en día. Por último, se encuentran los mapas realizados por Moreno (2013) en su tesis doctoral que, aunque actualizados y con gran nivel de detalle, sólo se refieren a la superficie norte del Parque y a la colindante a la laguna.

Por lo tanto, con este Trabajo se pretende realizar una cartografía actualizada y pormenorizada, con un nivel de detalle considerable que abarque toda el área que cubre el Parque Natural de la Albufera de Valencia. Estos mapas ayudarán a expandir el conocimiento existente sobre los suelos hídricos de la Albufera que es uno de los principales pilares de la biodiversidad regional, y que a día de hoy presenta una falta de información que es requerida a nivel particular por parte de muchos agricultores que desconocen el perfil del suelo y las propiedades de los suelos hídricos. También servirá para facilitar datos objetivos sobre sus propiedades de cara a la gestión por cualquier actor del parque para la toma de decisiones en base a un mayor número de variables conocidas.

Los objetivos concretos de este Trabajo son, por lo tanto:

- Caracterizar las propiedades físico químicas de los suelos hídricos del Parque Natural de la Albufera de Valencia espacial y en profundidad.
- Cartografiar las variables edáficas mediante técnicas geoestadísticas que permitan generar una base de datos dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG) que pueda ser actualizable en el futuro.
- Definir las correlaciones entre las variables edáficas de cara a conocer con más profundidad las interrelaciones que se puedan generar en los suelos hídricos mediterráneos.

3. Materiales y métodos.

3.1. La zona de estudio.

El área que se cubre en el trabajo abarca el Parque Natural de la Albufera al completo recogiendo un entorno de 21000 ha. Para poder muestrear de forma homogénea todo el parque se realizaron sondeos de acuerdo a un patrón sistemático en forma de cuadrícula, formando una malla de puntos separados entre sí 2 km. De esta manera se localizaron 95 puntos distribuidos por los arrozales y resto de cultivos, además de por la zona forestal del cordón dunar. Inicialmente, la equidistancia de la malla se diseñó para una distancia entre puntos de 1km, pero el elevado número de muestras era excesivo para los medios (coste económico y temporal) de los que se disponían para realizar el trabajo. Además de los 95 sondeos correspondientes a la malla, se llevaron a cabo otros 18 sondeos en zonas de especial interés para el estudio, ascendiendo el número total a 113.

La distribución de los puntos se realizó mediante un SIG, aplicando la capa de puntos sobre una ortofoto actualizada, tal y como se observa en la Figura 5:

Figura 5: Ubicación de los sondeos.



3.2. Metodología de trabajo.

La metodología de trabajo se dividió en cuatro fases diferenciadas:

- La primera fase de gabinete: fase preparatoria y de planificación del trabajo.
- La fase de campo: correspondió a los sondeos y toma de muestras.
- La fase de laboratorio: preparación y análisis de todas las muestras.
- La segunda fase de gabinete: análisis estadístico de los resultados y cartografiado de propiedades.

A continuación, se expone el esquema de trabajo (Tabla 1):

Tabla 1: Planificación del trabajo.

Fase	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Gabinete 1						
Campo						
Laboratorio						
Gabinete 2						

3.2.1. Primera fase de gabinete.

En esta fase se estudió la forma más óptima para realizar el resto de fases, teniendo en cuenta los medios disponibles y el tiempo que supondría llevar a cabo el trabajo. Se debe tener en cuenta que la planificación del trabajo estuvo condicionada por el ciclo de cultivo del arroz. La toma de muestras es necesario realizarla en un periodo en el que los campos de cultivo están secos. Eso determinó que los sondeos debían realizarse antes de mayo, que era cuando se realizó la inundación de las parcelas para la siembra.

3.2.2. Fase de campo.

Para la toma de muestras se llevaron a cabo 14 salidas de campo durante los meses de marzo y abril, en las que se tomaron los 113 sondeos correspondientes. Previamente a cada una de las salidas se estudió la ruta más adecuada para acceder a cada una de las parcelas objetivo. Esto era necesario, pues los caminos dentro del Parque son, a menudo, irregulares y nada intuitivos. El trabajo realizado fue:

Se accedió en coche a cada una de las parcelas, de las cuales se tomaron cuatro muestras de suelo por sondeo mediante una barrena tipo helicoidal de la marca comercial Eijelkamp específica para la toma de suelos desde arenosos a arcillosos. El método de muestreo ha sido el mismo para todos los suelos obtenidos, ya que la homogeneidad vigente no exige el empleo de técnicas de extracción específicas.

Las profundidades a las que se tomaron muestras fueron 0-20cm, 20-40cm, 40-60cm y 60-80cm. Se decidió que la profundidad máxima fuesen 80cm, dado que la mayoría de sondeos se realizaron en arrozales y este cultivo no explora el suelo hasta más allá de esta profundidad. Se debe puntualizar que la capa freática a menudo se encuentra por encima de los 80cm de profundidad. En estos casos, sólo fue posible obtener suelo hasta el punto en el que apareció la zona inundada, porque el suelo se encontraba en estado fluido y la barrena ya no era efectiva.

En cada uno de los sondeos se tomaron las coordenadas y la cota mediante un GPS Leica Zeno FLX100, y se fotografió el estado de la parcela, además de registrarse como datos de campo:

- El cultivo o uso de la parcela.
- El estado del suelo en superficie (seco/húmedo/labrado/sin labrar).
- Observaciones relevantes para la posterior interpretación de los resultados de análisis (presencia de horizontes orgánicos, sales en superficie, abundancia de conchas, procesos de reducción llamativa, etc).

En las siguientes Figuras se ilustra la fase de campo, tanto de la toma de muestras mediante el empleo de la barrena (Figura 6), como de la georreferenciación de los puntos de muestreo con el GPS (Figura 7):

Figura 6. Extracción de muestras mediante barrena.



Figura 7. Georreferenciación de los sondeos mediante GPS.



3.2.3. Fase de laboratorio

Esta segunda fase englobó tanto la preparación de las muestras de suelo para su posterior análisis, como el análisis en sí mismo.

3.2.3.1. Preparación de las muestras:

Una vez realizada la toma de muestras, se procedió a acondicionar las mismas hasta alcanzar un estado adecuado para su análisis de laboratorio. Básicamente se secaron y tamizaron porque, a su llegada al laboratorio, se encontraban húmedas e incluso saturadas y formando un bloque compacto a causa de su transporte en bolsas herméticamente cerradas.

En primer lugar, y una vez asignado un número de referencia en el registro de muestras del laboratorio, las bolsas se abrieron y se volcaron en bandejas individuales debidamente etiquetadas. Además, se desmenuzaron los agregados de suelo manualmente en la medida de lo posible. Esto aceleró el secado, al aumentar la superficie específica de la muestra y facilitó el tamizado posterior. Este también fue el momento para anotar cualquier característica llamativa de las muestras, dado que, una vez tamizadas, ya no serían apreciables. Las bandejas se colocaron en estanterías y se dejaron secar al aire durante una semana aproximadamente (el número de días dependió de la temperatura y humedad relativa ambientales del invernadero).

Una vez secas las muestras, se procedió a su tamizado, pero previamente fue necesario un segundo desmigajado de los agregados de suelo, mediante la acción de una maza/martillo, rompiendo los agregados en porciones mucho más pequeñas.

Para tamizar se empleó un molino de rodillos eléctrico con dos tambores. En cada uno de ellos se encuentra un cilindro metálico hueco, con las paredes de tamiz con tamaño 2mm, en los que se

introduce la muestra y dos cilindros metálicos que actuarán como un martillo. Los cilindros están colocados horizontalmente sobre los rodillos que los hacen girar e ir liberando la muestra tamizada hacia un embudo situado debajo de ellos. Bajo el embudo se coloca un recipiente de plástico donde se recoge el suelo y después se trasvasa a botes con cierre hermético.

Este proceso sirve también para la determinación de elementos gruesos, que quedan retenidos dentro del cilindro al no poder atravesar el tamiz. Para el cálculo de su porcentaje, se pesa la muestra distinguiendo entre los elementos gruesos y los finos. También se optó por no tamizar algunos de los agregados, para poder estudiar posteriormente sus características en un estado relativamente inalterado.

3.2.2.2. Análisis de suelos:

Con las muestras ya preparadas para su análisis se procedió a evaluar una serie de propiedades químicas y físicas según metodologías estandarizadas. A continuación, se detalla cada una de ellas y se explica brevemente su relevancia para el estudio de los suelos hídricos:

- pH.

El pH es una medida de acidez o alcalinidad que indica la cantidad de iones hidrógeno presentes en una solución. Se trata de uno de los factores físico-químicos que determinan la fertilidad del suelo, siendo especialmente importante a la hora de seleccionar un cultivo y para realizar un buen manejo de la fertilización (Prat, 1981).

La medida se realizó en una suspensión de suelo en agua destilada en relación suelo/agua 1/2.5 por el método de la electrometría mediante el micro-pH 2001.

- Conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica mide la capacidad de transmisión de la corriente eléctrica de una solución y está directamente relacionada con la cantidad de sales disueltas. Resulta muy relevante conocer sus valores, pues la salinidad presente en el suelo afecta a la capacidad que tienen las raíces de los cultivos para absorber nutrientes. Cada cultivo posee un umbral de tolerancia a la salinidad determinado y superarlo supone un estrés para la planta que comienza con una reducción en su desarrollo y puede llevar a su muerte (Partida-Ruvalcaba *et al.*, 2006).

Se midió en una suspensión de suelo en agua destilada en relación suelo agua 1/5 por el método de la electrometría mediante el conductímetro micro-CM 2202.

- Textura.

Se define la textura del suelo como la proporción (en porcentaje de peso) de las partículas menores a 2mm de diámetro (arena, arcilla y limo) existentes en los horizontes del suelo. Es una característica que influye en numerosas propiedades del suelo como la capacidad de retención de agua y nutrientes, su permeabilidad, su aptitud para el cultivo, etc (Porta *et al.*, 1999).

Para su determinación se empleó el método analítico de Bouyoucos, que permite determinarla mediante el empleo de un densímetro en una solución de hexametáfosfato de sodio. Se midió el tiempo de sedimentación de las partículas desde el momento inicial en el que estaban completamente dispersas hasta más de ocho horas después, tras las cuales ya se había producido la deposición de la gran mayoría de partículas.

- Materia orgánica.

Se puede definir la materia orgánica del suelo como aquellos materiales orgánicos que se encuentran en los suelos independientemente de su origen o estado de descomposición. Su presencia tiene diversas ventajas. Por un lado, un suelo con mayor porcentaje de materia orgánica

es capaz de liberar compuestos nutritivos (principalmente nitrógeno) que servirán de alimento a los microorganismos y a los cultivos. Por otro lado, también tiene efecto sobre las propiedades del suelo en sí, mejorando su estructura y aumentando la estabilidad de los agregados, además de reducir la erosión y mejorar la infiltración y capacidad de retención de agua (Trinidad-Santos y Velasco-Velasco, 2016).

Para la determinación de la cantidad de materia orgánica presente en los suelos se ha empleado la técnica de la calcinación en mufla. Las muestras secas a 105°C se pesaron y se introdujeron en mufla a 450°C para carbonizar toda la materia orgánica presente. Después se calculó su cantidad atendiendo a la diferencia de peso antes y después de la mufla.

- Hierro (Fe^{2+} y Fe total).

El hierro es un micronutriente esencial para el desarrollo de las plantas ya que interviene en la formación de la clorofila, además de formar parte del primer fotosistema fotosintético (ferredoxina). El hierro puede encontrarse en el suelo en forma ferrosa (Fe^{2+}) o férrica (Fe^{3+}) y puede provocar un empardamiento de las hojas del arrozal cuando hay exceso en el suelo (Doberman y Faihurst, 2001). De ambas dos formas, la ferrosa es la más asimilable por la planta, pero la más abundante en la corteza terrestre es la férrica. Esto sucede porque Fe^{2+} se oxida fácilmente a Fe^{3+} y tiende a precipitar. Por eso, en los análisis se determinó por separado el contenido de hierro férrico y el contenido de hierro total para evaluar su disponibilidad para la planta (Esquivel, 2018). Además, el hierro es uno de los componentes principales responsables de las características redoximorfológicas, típicas de los suelos hídricos (Vepraskas, 1996).

La cantidad de iones presentes en la muestra se determinó mediante su extracción en una solución ácida y su cuantificación por colorimetría. Tras la extracción de los mismos mediante ácido clorhídrico, estos forman un complejo colorido en presencia de ortofenantrolina, cuya absorbancia se midió a 510nm.

- Nitrógeno total.

El nitrógeno es un elemento esencial en la nutrición vegetal, estando considerado como un macronutriente junto con el fósforo y el potasio. Todo el nitrógeno que hay presente en el suelo deriva del existente en la atmósfera y es fijado a través de distintos procesos, principalmente de tipo biológico. Por eso, la mayoría del nitrógeno presente en el suelo forma parte de la materia orgánica y representa entre el 85 y el 95% del total. Sin embargo, es la fracción inorgánica (normalmente por debajo del 10%) la que se encuentra en una forma asimilable por las plantas, especialmente como nitratos y amonio (Benimeli *et al.*, 2019).

Para la cuantificación del nitrógeno total se empleó el método Kjeldahl, que se basa en la oxidación de la materia orgánica mediante ácido sulfúrico concentrado, convirtiendo los compuestos nitrogenados en sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Después se liberan los iones amonio a través de la destilación en presencia de NaOH y ácido bórico. Por último, se valora la solución empleando ácido sulfúrico.

- Carbonatos totales.

La presencia de carbonato cálcico tiene una gran influencia sobre la asimilabilidad de ciertos compuestos y elementos como pueden ser el Fe, el P, el Mg y el B. Si la concentración de carbonatos es elevada y el pH se encuentra dentro de unos niveles, la absorción de estos elementos puede verse comprometida. Por ejemplo, la clorosis férrica se manifiesta a menudo con concentraciones de CaCO_3 entre 30 y 50% y con un pH entre 7 y 8 (Montañés y Heras, 1971).

Para su determinación se empleó el método del calcímetro de Bernard, que emplea el volumen de CO_2 liberado por la reacción del suelo con ácido clorhídrico al 50% para estimar el porcentaje de

carbonatos totales presentes. El valor de volumen de gas desprendido por el suelo se compara con el volumen producido por la misma reacción, pero empleando CaCO_3 puro, a temperatura y presión constantes.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los métodos empleados (Tabla 2):

Tabla 2: Metodologías analíticas de suelos.

Parámetro	Técnica	Referencia al método	Unidades habituales
Conductividad 1/5	Electrometría	Nº 3c y 4a *	dS/m
pH 1/5	Electrometría	Nº 3c *	Ud. pH
Hierro	Extracción (Ditionito) y Titulación (EDTA)	USDA 6C1b ****	g/kg
Textura	Bouyoucos	USDA 3.2 **	% Fracción
Materia orgánica	Contenido Mineral	USDA 5A ****	%
Carbonatos Totales	Calcímetro de Bernard	UNE 103200:1993 ***	% CaCO_3
Nitrógeno total	Kjeldahl	USDA ****	%

Todas las metodologías han sido extraídas de: * (Richards, 1954); ** (Soil Survey Staff, 2009); *** (AENOR, 1993) y **** (Soil Survey Staff, 2004) las cuales han sido testadas internacionalmente por otros muchos científicos de la ciencia del suelo.

3.2.4. Segunda fase de gabinete

Una vez obtenidos todos los resultados, se procedió a realizar un análisis estadístico de los mismos para saber si existía alguna correlación significativa entre ellos. Además, se realizó el cartografiado de las propiedades de los suelos.

Tras completar la fase de laboratorio se realizaron todos los cálculos pertinentes para obtener los resultados adecuados para su análisis estadístico. En los experimentos se obtienen lecturas que requieren de una serie de procesado para obtener los valores que realmente se desean, por ejemplo, en el caso del hierro se realiza una lectura de la absorbancia a 510nm de la disolución preparada pero el dato que aporta verdadera información es la cantidad de hierro en g/kg. Las transformaciones correspondientes dependerán de cada método de medida empleado y en ocasiones no son necesarias como en el caso del pH o la conductividad eléctrica.

Después de preparar los datos para el análisis estadístico, se empleó el programa Statgraphics 18 para obtener los promedios, los valores máximos y mínimos, las medianas y los coeficientes de variación y desviaciones típicas. Esto permitió comparar los resultados entre sí pero dentro de la misma categoría, sin comparar entre propiedades.

El siguiente paso, también mediante el uso de Statgraphics, fue evaluar las posibles correlaciones que existen entre las distintas propiedades. Se comprobó inicialmente que los datos no cumplían con una distribución normal, por lo que se emplearon métodos de medida de la correlación no paramétricos. Concretamente se usó el coeficiente rho de correlación de Spearman, que es una medida de la correlación entre dos variables aleatorias. Este coeficiente oscila entre -1 y 1, indicando asociaciones negativas o positivas y su nivel de intensidad.

En último lugar se procedió al cartografiado de las propiedades analizadas mediante el empleo del programa de SIG ArcMap. Se realizaron cuatro mapas por cada una de las propiedades, correspondiendo cada uno a las cuatro profundidades muestreadas. El método de cartografiado empleado fue el Kriging Bayesiano Empírico (EBK por sus siglas en inglés), que es un método de interpolación de geoestadística que ajusta y calcula automáticamente una serie de parámetros

complejos mediante simulaciones, permitiendo la creación de un modelo preciso en el que cada punto del espacio tiene un valor de la propiedad representada. Al terminar los mapas se analizó la distribución espacial de las propiedades.

4. Resultados y discusión.

La cantidad total de muestras caracterizadas asciende a 443, siendo los parámetros estudiados los siguientes: $pH_{1/2.5}$, $CE_{1/5}$, carbonatos (%), materia orgánica (%), nitrógeno total (%), hierro total (g/kg) y textura que se divide en: fracción de arcilla (%), fracción de limo (%), fracción de arena (%) y clase textural. Esto arroja un conjunto de 4430 resultados obtenidos de los cuales todos a excepción de la clase textural son cuantitativos.

4.1. Análisis estadístico por propiedades.

4.1.1. $pH_{1/2.5}$.

El pH es una propiedad muy importante en el análisis de suelos, pues está estrechamente relacionada con su reactividad, lo que influye directamente con los procesos formadores que se producirán en ellos. Dependiendo del valor del pH los compuestos presentes en el perfil se comportarán de una manera u otra, afectando así a los iones del complejo de cambio e interviniendo en las reacciones de oxidación y reducción. Esto es especialmente relevante en suelos hídricos, en los que las inundaciones periódicas acentuarán los valores de acidez o basicidad (Prat, 1981).

Los análisis realizados, como se puede observar en la Tabla 3, ofrecen un valor medio de 8.093 clasificado según los criterios USDA como moderadamente básico (entre 7.8 y 8.5) (USDA, 1999). Este carácter alcalino está relacionado con el origen calcáreo de los materiales que forman el suelo, pues la presencia de carbonatos aumenta los valores del pH (Prat, 1981). En cuanto a los valores extremos, el máximo registrado es de 9.53, clasificado como alcalino y el mínimo de 6.96, es decir, neutro. Estos niveles de pH tendrán implicaciones para el cultivo del arroz, pues el valor ideal para este vegetal se sitúa entre 5 y 6.5 (Ponnamperuma, 1981), un dato inferior al mínimo obtenido.

Los resultados obtenidos se corresponden con los publicados anteriormente por otros autores como Boira (2012), cuyos datos se mueven en el rango 5.99-8.45, Martínez (2003) con 7.7-8.7, o Moreno (2013) con 6.96-8.90.

Tabla 3. Datos estadísticos de pH.

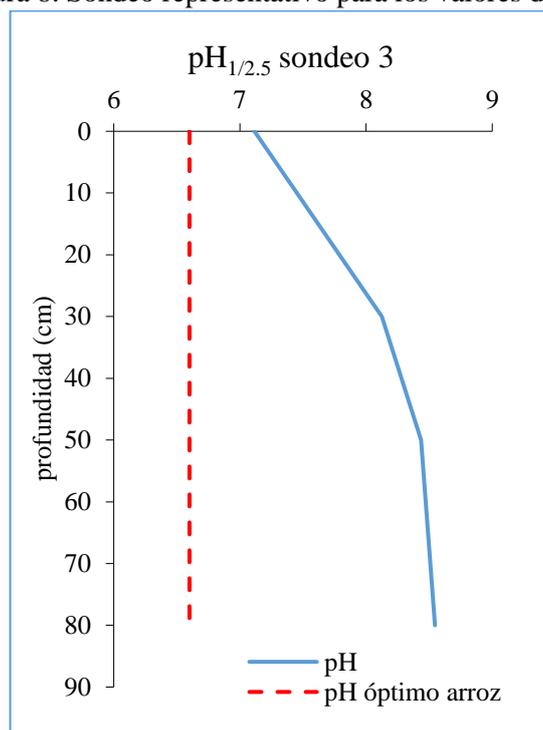
Dato estadístico	$pH_{1/2.5}$
Máximo	9,53
Mínimo	6,96
Media	8,093
Mediana	8,125

Resulta interesante observar el comportamiento de los valores en profundidad, pues se constata que el pH aumenta según lo hace la profundidad, como se indica en la Tabla 4 y la Figura 8. Esto está ligado a la presencia de materia orgánica y de oxígeno en el perfil, las cuales disminuyen según aumenta la profundidad. La descomposición de la materia orgánica es uno de los factores que producen la acidificación del suelo (Campillo *et al.*, 2006). En la Tabla 4 se puede apreciar también que los coeficientes de variación de los datos se encuentran entre un 4.95% y un 6%, por lo que se corrobora que los cifras son homogéneas para todo el Parque Natural.

Tabla 4. Datos estadísticos de pH por profundidades.

Profundidad	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
0-20	7,90	0,47	6,00%	6,96	8,97
20-40	8,04	0,40	4,95%	7,08	8,74
40-60	8,16	0,45	5,49%	7,092	9,511
60-80	8,27	0,48	5,84%	7,258	9,53
Total	8,09	0,47	5,81%	6,96	9,53

Figura 8. Sondeo representativo para los valores de pH.



Los valores de pH, como se ha indicado anteriormente, no experimentan grandes variaciones. Los niveles son bastante homogéneos tanto en su distribución espacial a lo largo del Parque como en profundidad (ver mapas de pH en el anejo de cartografía). En superficie se observa una división clara de los niveles de pH entre la mitad norte del Parque, con unos valores más ácidos (aunque cercanos a la neutralidad), y la mitad sur, con un pH más elevado (más en torno a 8). La divisoria se encuentra aproximadamente a la altura del municipio de Sollana. Se aprecia también que en la zona este del lago los valores son más acordes a la mitad sur que a la mitad norte, como sería de esperar por su localización.

Estos datos están relacionados con la cota real del terreno, estando la zona circundante al lago más deprimida que la zona sur y también que la zona este del lago. Unos niveles mayores en salinidad y materia orgánica reducen el pH del suelo, y resulta precisamente que en la zona norte y noroeste del Parque se encuentran valores elevados de ambas propiedades. Como comprobación de que la cota es muy relevante en este aspecto, se puede tomar la zona situada al este del lago, la cual posee una cota de dos a cuatro metros superior al resto de zonas colindantes de la laguna y que muestra una conductividad y una fracción orgánica inferior al resto. Es decir, este comportamiento se repite a lo largo de toda la superficie. También es interesante remarcar que la zona situada a lo largo de la gola del Perelló, el desagüe natural del lago de la Albufera (las otras dos golas son de manufactura antrópica), tiene características similares a las de la zona norte.

Según se aumenta la profundidad el pH aumenta también y la frontera entre la zona sur (más básica) y la norte (más ácida) se desplaza hacia el norte. En el segundo horizonte (20-40cm) el área con pH en torno a 8 ya alcanza hasta la zona colindante situada al norte del lago, a excepción de la zona oeste y un reducto en torno al Palmar, que aún mantienen un pH más ácido. Los últimos dos horizontes son bastante parecidos, ascendiendo la zona básica hasta la altura de Catarroja, además de aparecer en la parte más meridional del Parque (a la altura de Sueca) un área con pH máximo con valores en torno a 9.

4.1.2. Conductividad eléctrica $CE_{1/5}$.

El estudio de la conductividad eléctrica es el estudio de la salinidad del suelo, que resulta altamente importante cuando se trata de lugares en los que se llevan a cabo cultivos. Toda planta tiene un umbral de tolerancia a la salinidad a partir del cual su rendimiento comienza a disminuir y que en el caso del arroz se sitúa en una conductividad del extracto de saturación de 3 dS/m (Aguilar *et al.*, 2016). A la hora de clasificar un suelo en cuanto a su nivel de conductividad, se considera que un suelo es salino cuando su $CE_{1/5}$ está por encima de 0.65 dS/m (Saña *et al.*, 1996). Esto supone que los suelos de la Albufera de Valencia son en promedio salinos, atendiendo al valor medio obtenido de 0.966 dS/m (Tabla 5). Dentro del conjunto de datos se han determinado un 53.4% de muestras clasificadas como salinas y un 28.9% como muy salinas ($CE_{1/5} > 1.15$ dS/m). Se observa además una amplia variabilidad en los datos, siendo el mínimo obtenido de 0.089 dS/m y el máximo de 6.05 dS/m. Esta heterogeneidad queda reflejada en los altos coeficientes de variación expuestos en la Tabla 6.

Otros autores que han llevado análisis de salinidad anteriormente ofrecen datos que son similares a los obtenidos en este trabajo, como pueden ser los de Martínez (2003) 0.545-2.294 dS/m, o Moreno (2013) 0.1-10.09 dS/m.

Tabla 5. Datos estadísticos de $CE_{1/5}$.

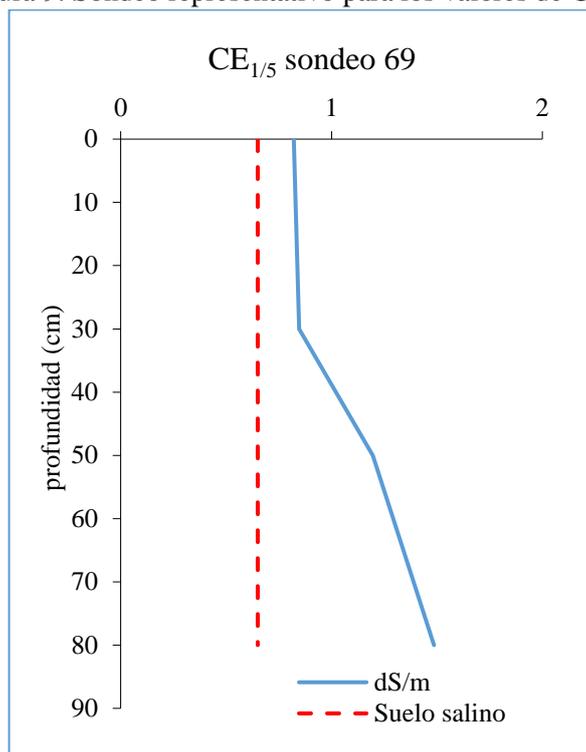
Dato estadístico	$CE_{1/5}$ (dS/m)
Máximo	6,050
Mínimo	0,089
Media	0,966
Mediana	0,741

El análisis de los datos además indica que la salinidad aumenta con la profundidad, como se puede observar tanto en la Tabla 6 como en la Figura 9. Principalmente puede deberse por un lado a la existencia de una capa freática salina que alcanza cotas elevadas y que está muy relacionada con la intrusión de agua marina que saliniza el perfil (Moreno *et al.*, 2015), y por otro lado a que el cultivo del arroz y la inundación de los campos provoca un cierto lavado de las sales hacia capas más profundas del suelo.

Tabla 6. Datos estadísticos de $CE_{1/5}$ por profundidades.

Profundidad	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
0-20	0,853	0,491	57,62%	0,100	2,320
20-40	0,877	0,643	73,28%	0,104	3,610
40-60	1,057	1,077	101,84%	0,089	5,890
60-80	1,095	1,134	103,52%	0,104	6,050
Total	0,968	0,878	90,68%	0,089	6,050

Figura 9. Sondeo representativo para los valores de $CE_{1/5}$.



Los mapas de conductividad (ver mapas de conductividad eléctrica en el anejo de cartografía) reflejan una heterogeneidad considerable en los valores de salinidad de los suelos del Parque Natural. Entre las cuatro profundidades muestreadas, se encuentran zonas clasificadas desde no salinas hasta muy salinas, aunque se debe destacar que, salvo algunas excepciones, los suelos de la Albufera se consideran como mínimo ligeramente salinos. Esto está muy influenciado tanto por estar situado el Parque junto al mar, como por la condición calcárea de los materiales originarios de la zona.

En superficie ya se observa la distribución de estas áreas que se repetirá de forma parecida también en profundidad. Se aprecia que la zona norte y noroeste, abarcando la parte colindante al lago, contiene unas concentraciones de sales que la clasifican como muy salina. Una vez más, y como sucede con los niveles de pH, la parte de la restinga arenosa yuxtapuesta al este del lago (gola del Puchol), muestra valores de salinidad inferiores, considerados ligeramente salinos. Esta clasificación aparece también en la mitad sur del Parque, concretamente en las zonas altas de la parte suroeste, entre Sollana y Sueca, y en el área que forma la restinga arenosa desde su punto más meridional hasta la altura del lago, a excepción de la zona que rodea la gola del Perellonet, que exhibe valores ligeramente salinos. Desde el lago hacia el sur y formando un cordón entre la restinga y las zonas altas se encuentran suelos ligeramente salinos que están también asociados a unas cotas más bajas que las que se observan tanto al este (cordón dunar), como al oeste (zonas altas). Además de estar relacionada con la cota del terreno, la salinidad en superficie está influida en gran medida por el agua empleada para el riego de los campos. Esto es especialmente relevante en el caso de la zona norte, que muestra los valores más elevados, pues el agua empleada en el regadío proviene de la depuración de aguas empleadas en la industria de la zona de Pinedo y por lo tanto contiene más solutos, que aumentan la conductividad eléctrica.

Cuando se evalúa la variación de la salinidad en profundidad se observa que en el segundo horizonte (20-40cm) los valores de conductividad se reducen debido a que la influencia de la salinización por las aguas de riego no es tan pronunciada, ya que las sales por evaporación tienden a acumularse en el top soil. Estos tienen una distribución espacial similar a la descrita en

superficie, con la zona noroeste y circundante al lago mostrando valores salinos y muy salinos y la zona suroeste y la restinga ligeramente salinos. Pero en general los valores más altos disminuyen, llegando incluso a aparecer una zona junto al área urbana de Sueca clasificada como no salina.

En el tercer horizonte (40-60cm) la tendencia cambia parcialmente, produciéndose un aumento de la conductividad generalizado en toda la mitad norte del Parque y parte de la mitad sur. Los suelos muy salinos aumentan significativamente y los considerados como ligeramente salinos prácticamente desaparecen. El área colindante al lago y también la situada entre el lago y Valencia son de nuevo las que más salinidad muestran, junto con una zona situada ligeramente al sur del Palmar. En cambio, en las zonas altas del suroeste la tendencia descrita en el segundo horizonte se repite, incrementándose el área considerada como no salina. Estas variaciones en la conductividad se explican por la acción de la intrusión marina, pues a esta profundidad ya se están estudiando muchos suelos que están por debajo del nivel del mar. A esta cota, es habitual que la capa freática ascienda, inundando estos horizontes y salinizándolos. La validación de esta teoría es que en las zonas más altas del suroeste, que tienen cotas de dos y hasta tres metros superiores, no se ven afectadas por este fenómeno y su salinidad se reduce en lugar de aumentar.

En el último horizonte (60-80) se observan tendencias similares a las del tercero, salvo en ciertos puntos de la restinga arenosa, en los que la salinidad vuelve a reducirse, disminuyendo hasta valores incluso no salinos. Una explicación que podría darse a este hecho es que la capa freática estuviera entre ambas profundidades y se hubiera producido una bajada de la capa freática, dejando sales acumuladas en 40-60 cm debido a la trasmisividad de la arena y el efecto de la evaporación, o bien debido al efecto de los episodios de lluvia que se habían producido días antes y que pudieron provocar un retroceso de la capa salina procedente de la interfase dulce-salina en la interfase.

4.1.3. Carbonatos.

Los materiales que forman los suelos de la Albufera de Valencia son principalmente sedimentarios de las cuencas del Júcar y del Turia, las cuales son principalmente calcáreas. Por lo tanto, se espera que el contenido en carbonatos sea relativamente elevado. Resulta transcendental conocer los niveles presentes de caliza, pues una cantidad excesiva puede afectar al rendimiento de los cultivos, especialmente cuando se trata de cultivos herbáceos como lo es el arroz. Un exceso de carbonatos impedirá la correcta absorción de otros cationes como puede ser el hierro (Garrido, 1994).

La media de carbonatos presentes en los suelos del Parque Natural se encuentra en un 12.47%, como se muestra en la Tabla 7, lo que se califica como un valor normal (entre 10 y 20%), por lo que en general no deberían resultar problemáticos. Sin embargo, se aprecia que los valores extremos fluctúan en gran medida, siendo el dato máximo registrado de 32.39% (a partir del 35% resulta perjudicial para el cultivo) y el mínimo de 0.24%, es decir, despreciable. Los valores mínimos corresponden a suelos pertenecientes al cordón dunar, con prácticamente un 100% de arenas y carentes de sedimentos limosos de las cuencas fluviales. En cuanto a los valores máximos, se debe tener en cuenta que los suelos calizos pueden resultar muy heterogéneos (Garrido, 1994), hallándose la cal en forma de nódulos que pueden aumentar los resultados del análisis enormemente, además de encontrarse en determinados horizontes del suelo numerosas conchas de bivalvos y caracoles en la matriz que, de ser tamizados aumentan también en gran medida el valor obtenido. Este aporte conocido como bioacumulación de carbonatos es típica en zonas de arrozal denominándose a este proceso como biocalcificación (Asio y Badayos, 1998).

Los resultados se han comparado con los de otros autores y se ha constatado que los valores obtenidos están dentro de la normalidad. Esto queda patente al observar los datos de Moreno (2013): 6.55-85.84% y Boira (2012): 0.46-52.90%.

Tabla 7. Datos estadísticos de carbonatos.

Dato estadístico	Carbonatos (%)
Máximo	32,39
Mínimo	0,24
Media	12,47
Mediana	11,88

En cuanto al análisis en profundidad, como se indica en la Tabla 8, el porcentaje promedio es bastante estable, entre un 12 y un 13% con una ligera subida según aumenta la profundidad. Aun así, se nota que la variación es elevada en todos los horizontes (superior a un 30%).

Tabla 8. Datos estadísticos de carbonatos por profundidades.

Profundidad	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
0-20	12,23	4,08	33,34%	1,92	32,396
20-40	12,28	4,07	33,17%	0,24	27,548
40-60	12,53	4,84	38,66%	2,02	28,248
60-80	12,85	4,73	36,82%	5,21	30,4
Total	12,46	4,43	35,54%	0,244	32,396

En el caso de los carbonatos se da una considerable homogeneidad en los valores obtenidos y a menudo en su distribución espacial (ver mapas de carbonatos en el anejo de cartografía), sin embargo, no existen tendencias claras en la mayoría de zonas del Parque. Aun así, se dan áreas que resultan estables en cuanto a su contenido, manteniéndose máximas o mínimas cuando se observan en profundidad.

En superficie se observa una gran homogeneidad del contenido en carbonatos a lo largo del Parque, con valores que superan el 11% en su mayoría. Existen no obstante dos zonas con una proporción menor situadas al este y al oeste de la laguna, disminuyendo los datos hasta un 8-9% en determinados puntos. En la mitad sur del Parque, aunque los valores son bastante homogéneos, se aprecia también que, en las zonas más elevadas, como la situada entre Sollana y Sueca y parte de la restinga arenosa contienen menos carbonatos que las zonas más deprimidas.

En el segundo horizonte la homogeneidad es mayor, siendo los valores de prácticamente todo el Parque de un 12% aproximadamente. El área al oeste de la laguna adopta valores equivalentes a los de la mayoría del territorio, mientras que la zona noreste sigue siendo la que menores porcentajes presenta, dándose contenidos del 9-10%.

En la tercera profundidad se produce un cambio bastante pronunciado, en el que las zonas noreste y sureste reducen sus porcentajes claramente, además de la zona occidental colindante al lago. En cambio, en la parte central, así como en la directamente por encima de la laguna los contenidos se intensifican. Esta heterogeneidad se repite de forma relativamente parecida en el cuarto horizonte, siendo la zona central la única que mantiene claramente sus contenidos anteriores.

Tras la descripción de la distribución espacial se llega a la conclusión de que los carbonatos están ligados a los flujos de agua tanto de riego como de desagüe del lago. En los primeros dos horizontes la aplicación de aguas de riego carbonatadas provoca una homogeneidad bastante elevada en los contenidos observados, así como la zona de desagüe natural del lago se mantiene con contenidos elevados en todas las profundidades (esta zona corresponde a la citada área céntrica del Parque).

4.1.4. Materia orgánica.

La materia orgánica presente en un suelo es de gran importancia cuando se considera su capacidad para soportar la vida tanto vegetal como animal. Unos niveles elevados mejoran numerosas propiedades tanto físicas como químicas de los suelos, como pueden ser la capacidad de infiltración, la retención de agua o la estabilidad de su estructura. Además, esta promueve la presencia de microorganismos que, al alimentarse de ella descomponiéndola, ponen a disposición de los cultivos formas asimilables de nutrientes como el nitrógeno que son cruciales para su crecimiento. En la mayoría de suelos, el contenido en materia orgánica es bajo y las prácticas tradicionales de cultivo tienden a reducirlo aún más (Trinidad-Santos y Velasco-Velasco, 2016).

En el caso de la Albufera de Valencia, al tratarse de un humedal, se considera un sumidero de carbono gracias a la capacidad de almacenar materia orgánica. Esto sucede por un lado gracias a la biodiversidad que presentan las zonas húmedas, que generan material vegetal rápidamente, a la par que las condiciones de inundación y anaerobiosis ralentizan la descomposición de la misma. Esto provoca que se formen horizontes orgánicos en los perfiles del suelo, que a menudo se encuentran enterrados. Se pueden hallar acumulaciones de materia orgánica en cualquier estado de descomposición además de bolsas aisladas a cualquier profundidad. El cultivo del arroz y la prohibición de la quema de sus rastrojos ha contribuido también a aumentar sus niveles en los últimos años (Moreno, 2013).

Los resultados obtenidos en los análisis y presentados en la Tabla 9, muestran una media de un 5.7% de materia orgánica, lo que se encuentra por encima de la media de los suelos españoles (Romanyà *et al.*, 2007), reforzando la concepción de los humedales como sumideros de carbono. En cuanto a los valores extremos, se encuentran distribuidos en un rango muy amplio debido a la distinta naturaleza de suelos que se encuentran en el Parque Natural de la Albufera de Valencia. Los resultados más bajos corresponden en general (no siempre) a suelos que se encuentran en el cordón dunar y que se componen casi al 100% de arena, con valores cercanos al 0%, por ejemplo, del 0.28%. Es llamativo aun así que el resultado mínimo, de 0.19% pertenezca al horizonte más profundo de una parcela de arrozal. Los máximos, lógicamente pertenecen a horizontes orgánicos enterrados, llegando a alcanzarse el valor de 60.4%.

Si comparamos los valores obtenidos con otros estudios parciales del Parque, vemos que Boira (2012) registro valores entre el 0 y el 46.90%, Moreno (2013) entre el 0.01 y el 15.51% y Martínez (2003) entre el 1.67 y el 9.23%. Por tanto, los datos del presente estudio se consideran normales y dentro del rango de los otros estudios.

Tabla 9. Datos estadísticos de materia orgánica.

Dato estadístico	Materia orgánica (%)
Máximo	60,4
Mínimo	0,28
Media	5,7
Mediana	4,9

Cuando se observa el comportamiento de la materia orgánica en profundidad (Tabla 10), los datos promedio revelan que los horizontes superficiales son los que mayor cantidad poseen a causa de la presencia de los restos vegetales del cultivo de la campaña anterior del arroz. Según aumenta la profundidad, la materia orgánica se reduce hasta llegar al último horizonte en el cual repunta. La razón que se esconde detrás de esto son los horizontes orgánicos enterrados que se ubican mayormente a mayor profundidad, entre otros motivos debido a que las condiciones de anaerobiosis son más frecuentes y, por lo tanto, la descomposición de los compuestos orgánicos más lenta. Es llamativo que los horizontes superficiales (0-20cm) muestran tanto el mayor mínimo como el menor máximo, siendo las variaciones entre sondeos más reducidas. Justo lo contrario

ocurre con los horizontes más profundos (60-80), en los que se encuentran tanto el valor más bajo como el más alto de todos los presentes en el Parque.

Tabla 10. Datos estadísticos de materia orgánica por profundidades.

Profundidad	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
0-20	6,32	2,36	37,26%	0,49	11,01
20-40	5,58	3,46	62,07%	0,45	21,64
40-60	5,40	4,43	82,14%	0,34	22,42
60-80	5,68	8,63	151,80%	0,19	60,41
Total	5,75	5,21	90,59%	0,19	60,41

A continuación, se muestran dos representaciones del nivel de materia orgánica en profundidad. La Figura 10 enseña un perfil representativo de los valores medios obtenidos para todo el Parque Natural, mientras que la Figura 11 contiene un horizonte orgánico enterrado en la profundidad 40-60cm, con un gran pico en el porcentaje obtenido. En la Figura 12 se muestra un ejemplo de bolsas de materia orgánica sin descomponer integradas en la matriz del suelo.

Figura 10. Sondeo representativo de materia orgánica.

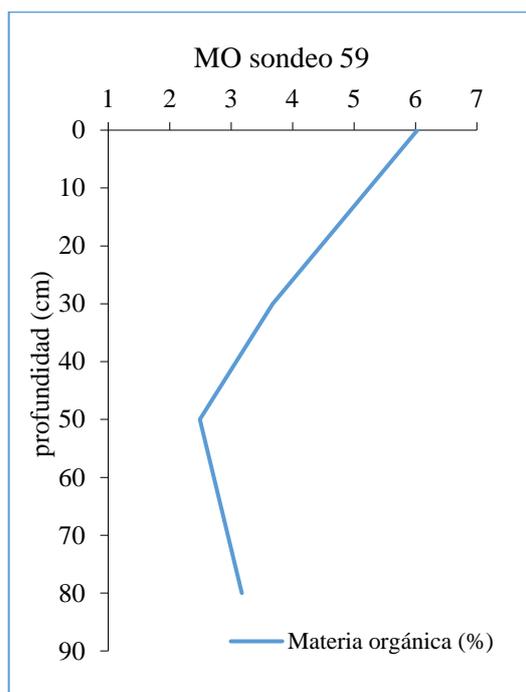


Figura 11. Sondeo representativo de materia orgánica con horizonte orgánico enterrado.

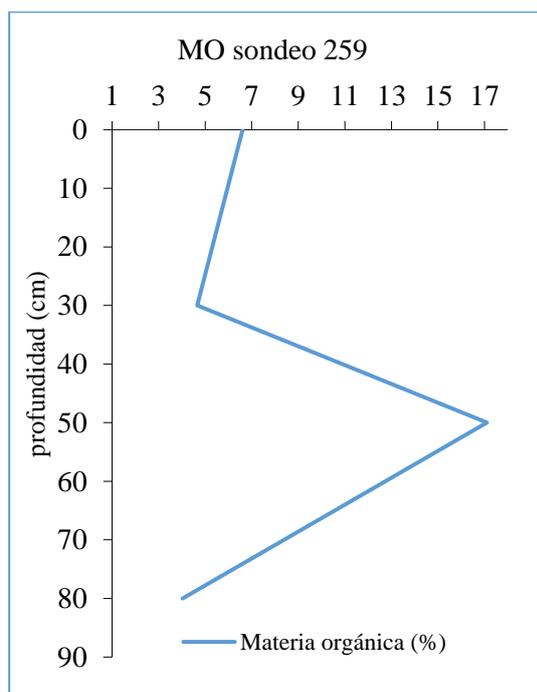


Figura 12. Sondeo representativo con horizonte orgánico enterrado.



A grandes rasgos, existe una considerable heterogeneidad en los valores de materia orgánica presente en los suelos del Parque Natural (ver mapas de materia orgánica en el anejo de cartografía), oscilando entre valores inferiores al 1% y superiores al 8% (en algunos casos muy superiores). Esta variabilidad se produce tanto en su distribución espacial al nivel como en profundidad. A pesar de ello, hay patrones que se repiten en todos los horizontes.

En primer lugar, se debe considerar que a mayor salinidad menor actividad microbiológica y por tanto menor tasa de descomposición de la materia orgánica. Esto provoca que la distribución de la fracción orgánica será a menudo similar a la de la salinidad.

En superficie, y como ocurre con la conductividad eléctrica, la materia orgánica se acumula en la zona norte del Parque, además de en la zona circundante del lago (a excepción de la parte oriental) y en el área más deprimida de la zona sur, formando un cordón entre las zonas altas del suroeste y la restinga arenosa. En estos primeros 20cm de suelo, los valores medios de materia orgánica son superiores a los determinados en profundidad debido a la presencia de los restos de la cosecha. Tanto los tocones del arroz como las raíces abundan en este horizonte, lo que aumenta en gran medida los porcentajes obtenidos. Esto resulta evidente cuando se comparan los valores del marjal (elevados) con los presentes en la restinga arenosa o en las zonas altas del suroeste, en las que los campos de arroz son menos frecuentes.

La influencia de los restos de cosecha en el porcentaje de materia orgánica es llamativa cuando se observa la reducción que se produce entre el primer y el segundo horizonte. Entre 20 y 40cm las raíces presentes son mucho menos frecuentes, disminuyendo así los valores medios del Parque, predominando valores entre el 4 y el 6% y volviéndose más escasos los porcentajes superiores al 7%. Los campos alrededor del lago siguen teniendo contenidos más altos que los del resto de zonas, a excepción de un área de abundante materia orgánica situada en el centro del Parque y debida a horizontes orgánicos enterrados.

En los siguientes dos horizontes se distinguen dos tendencias claras. Por un lado, continúa el descenso generalizado en los contenidos de materia orgánica en gran parte del terreno, volviéndose habituales valores inferiores al 2%. Por otro lado, la aparición de horizontes orgánicos enterrados comienza a volverse cada vez más frecuente, aumentando los porcentajes de la fracción orgánica drásticamente en determinados puntos. Estos horizontes se distinguen claramente y están localizados en las zonas circundantes al lago, exceptuando la zona este, y en el pico norte del Parque.

4.1.5. Nitrógeno total.

El nitrógeno es un macronutriente cuya escasez resulta un factor limitante para alcanzar los rendimientos potenciales de los cultivos. Este elemento aparece tanto de forma orgánica como inorgánica en el suelo, siendo la primera mucho más abundante que la segunda. Pero ocurre que sólo la fracción inorgánica se encuentra en forma asimilable para las plantas, concretamente como nitratos, nitritos y amoníaco. Además, tanto los nitratos como los nitritos son altamente solubles por lo que se suelen encontrar en la disolución del suelo y no integrados en la matriz. Como consecuencia, resulta complicado determinar las proporciones de cada uno de ellos y separarlos eficazmente del resto de compuestos nitrogenados presentes. Por tanto, al realizar el análisis Kjeldahl no se expresa realmente la cantidad disponible de nitrógeno presente en el suelo, sino que se engloba el mineralizado de la materia orgánica estable (humus), el mineralizado de los residuos de la cosecha anterior y el derivado de las enmiendas orgánicas aplicadas anteriormente al cultivo. Esto cobra especial importancia al tener en cuenta la presencia de horizontes orgánicos en los perfiles estudiados, pues en estos casos la fracción orgánica es muy elevada y puede arrojar valores de nitrógeno particularmente altos (Garrido, 1994).

Los resultados obtenidos en los análisis muestran una media de 0.196% de nitrógeno total, oscilando los valores entre un máximo del 1.53% y un mínimo del 0.001%, es decir 0. Se muestran a continuación en la Tabla 11.

Los datos obtenidos se han contrastado con los pertenecientes a los estudios de Boira (2012) y Martínez (2003). El primero ofrece resultados entre el 0 y el 2.14% y el segundo entre el 0.07 y el 0.55%, estos rangos son similares a los de este trabajo.

Tabla 11. Datos estadísticos de nitrógeno total.

Dato estadístico	Nitrógeno Total (%)
Máximo	1,533
Mínimo	0,001
Media	0,196
Mediana	0,181

El comportamiento en profundidad de las cantidades, como se muestra en la Tabla 12, es de una disminución constante del contenido en nitrógeno total. En todas las profundidades el mínimo obtenido es prácticamente nulo y los máximos varían entre 0.495% y 1.533%. La presencia de una mayor cantidad en superficie se debe a la superior abundancia de restos vegetales de cosecha y también probablemente a restos de abonos aplicados al cultivo. En profundidad tanto los unos como los otros van disminuyendo, aunque los máximos obtenidos pueden ser elevados. Esto es por consecuencia de la presencia de horizontes orgánicos que son más frecuentes en profundidad y provocan picos en los análisis. Se observa que estos máximos divergen de los datos medios mediante los coeficientes de variación que aumentan significativamente con la profundidad.

Tabla 12. Datos estadísticos de nitrógeno total por profundidades.

Profundidad	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
0-20	0,248	0,112	45,40%	0,0027	0,763
20-40	0,198	0,118	59,70%	0,0100	0,494
40-60	0,182	0,140	76,94%	0,0047	0,613
60-80	0,159	0,194	122,45%	0,0013	1,533
Total	0,197	0,147	74,58%	0,0013	1,533

A continuación, se presentan dos gráficas de sondeos representativos. La primera (Figura 13) corresponde a un perfil acorde a los valores promedio obtenidos y la segunda (Figura 14) a un perfil con un horizonte orgánico enterrado, que provoca un pico en los niveles de nitrógeno.

Figura 13. Sondeo representativo de nitrógeno total.

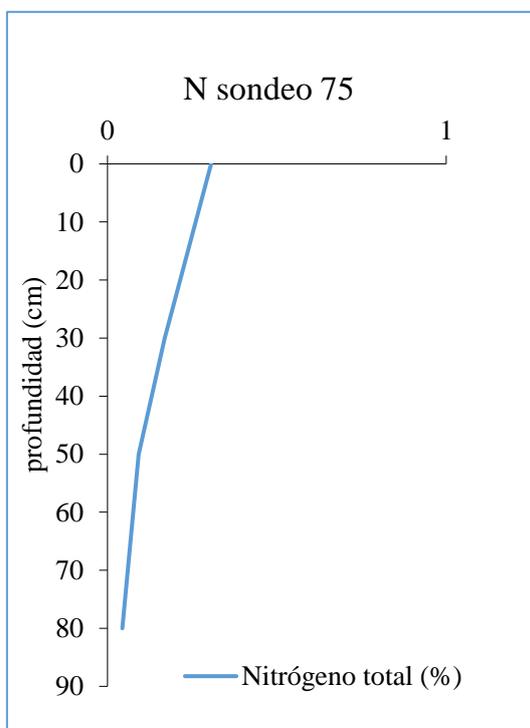
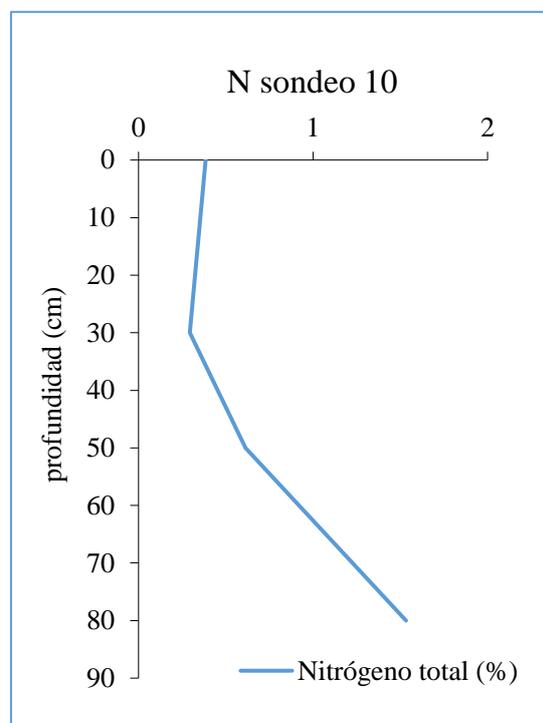


Figura 14. Sondeo representativo de N con horizonte orgánico enterrado.



El contenido en nitrógeno del suelo está relacionado directamente con la cantidad de materia orgánica presente en los horizontes. Al igual que ocurre con esta, en superficie la cantidad de nitrógeno total es más elevada y más homogénea que en profundidad (ver mapas de nitrógeno en el anejo de cartografía). También se debe considerar el efecto de los abonos nitrogenados que se aplican en superficie y cuya aplicación ha coincidido temporalmente con la toma de muestras. Casi todo el Parque presenta porcentajes en torno al 0.2-0.3%, encontrándose los valores más bajos en las zonas altas del suroeste, sureste y en la parte al este del lago, que se reducen a 0.1-0.2%. Los máximos obtenidos se localizan al oeste del lago y en el pico norte del Parque Natural.

En el segundo horizonte, se produce una reducción general del contenido en nitrógeno de los suelos, siendo especialmente observable en la zona sur y suroeste, además de en la restinga arenosa. En la parte más deprimida de la mitad sur de la Albufera, así como en el noroeste se mantienen valores elevados.

Cuando se observa la variación en profundidad, al llegar al tercer horizonte, la disminución del contenido en nitrógeno sigue haciéndose patente sobre todo en la mitad sur del Parque, en la que la reducción es evidente según se avanza hacia Sueca y Cullera, creándose un patrón en franjas. La parte más meridional ofrece valores entre 0.05 y 0.1%, mientras que justo por encima y en la restinga arenosa los datos se encuentran entre el 0.1 y el 2%. Esta tendencia a la baja no se reproduce en la mitad norte del Parque debido a la aparición de los horizontes orgánicos enterrados, que aportan grandes cantidades de nitrógeno. La distribución de estos valores elevados, entre 0.2 y 0.3%, se corresponde exactamente con la de estos horizontes, ubicándose en las partes norte, oeste y sur del lago y en el pico norte del Parque, junto a Pinedo.

En el último horizonte sí que se produce una reducción más generalizada del contenido de nitrógeno, siendo el comportamiento en la mitad sur del Parque el mismo que en el tercer horizonte, apareciendo el patrón por franjas y extendiéndose hasta casi la altura del lago. En toda la mitad norte también se evidencia una disminución homogénea de los porcentajes.

4.1.6. Hierro total.

El hierro es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, representando un 5.1% del peso total de la misma y aparece en la estructura de numerosos minerales. Cuando estos se meteorizan liberan hierro soluble a la solución del suelo, que pasa a estar disponible para plantas y microorganismos. Es común encontrar tanto formas de Fe^{2+} como de Fe^{3+} , con la diferencia de que, en los rangos de pH habituales de los suelos (superiores a 7.5 mala absorción), el Fe^{3+} presenta una baja solubilidad. Aun así, esta forma del hierro cobra relevancia en condiciones anaeróbicas como las que suceden en los suelos hídricos de la Albufera, pues los microorganismos la emplean como aceptor final de electrones a la hora de llevar a cabo la descomposición oxidativa de la materia orgánica. Los óxidos de hierro además contribuyen tanto a una correcta absorción de otros nutrientes por las plantas como a aumentar la consistencia de los agregados de suelo. Estos compuestos también determinan en gran medida el color de los suelos, principalmente en el caso de existir abundante arcilla. El estudio de su gama de colores contribuye a facilitar el estudio de los procesos formadores de los suelos además de la clasificación de sus horizontes (Moreno, 2013).

Los resultados obtenidos en los análisis, expuestos en la Tabla 13, indican un valor promedio de hierro en los suelos de 2.63g/kg, siendo el rango total de valores muy amplio, desde un mínimo de 0.00017g/kg (nulo) hasta un máximo absoluto de 47.97g/kg.

Bodek *et al.* (1988) indican que el nivel de hierro normal en suelos oscila entre el 0.5% y el 5%, lo que se ajusta perfectamente a los resultados obtenidos en estos análisis, pues 47.97g/kg equivale a un 4.8% en peso.

Tabla 13. Datos estadísticos de hierro total.

Dato estadístico	Hierro total (g/kg)
Máximo	47,97
Mínimo	0
Media	2,63
Mediana	1,16

El análisis en profundidad del hierro, que se muestra en la Tabla 14, indica una menor cantidad de este elemento en el primer horizonte que en los demás y sobre todo una menor variabilidad en los datos. Tanto el mínimo como el máximo son muy inferiores a los de los otros tres horizontes. Esto responde a la mayor presencia de oxígeno en el horizonte superficial, que reduce la reducción del hierro y por tanto su presencia en los horizontes. Los valores mínimos y máximos de los tres horizontes enterrados son bastante parecidos, aunque los coeficientes de variación en todos los casos se muestran muy elevados.

Tabla 14. Datos estadísticos de hierro total por profundidades.

Profundidad	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
0-20	2,132	2,882	135,15%	0,00017	15,044
20-40	2,560	5,616	219,39%	0,06925	45,579
40-60	3,010	5,830	193,70%	0,06700	41,276
60-80	2,869	5,833	203,28%	0,06284	47,966
Total	2,637	5,167	195,97%	0,00017	47,966

El estudio espacial del hierro en el suelo da unos resultados heterogéneos en los que no se observan claros patrones de comportamiento (ver mapas de hierro en el anejo de cartografía). Queda claro que los valores en superficie medios son superiores a los obtenidos en profundidad a lo largo de todo el Parque Natural, siendo especialmente elevados en la contornada del lago y en la zona más al norte. Los mínimos obtenidos corresponden a la restinga arenosa y a las zonas altas del suroeste.

En el segundo horizonte (20-40cm) el contenido en hierro desciende con respecto al obtenido en superficie y se puede apreciar que las zonas con menos cota se encuentran cantidades mayores que en las más elevadas. En el caso del tercer horizonte se observa un desplazamiento de las zonas con mayor contenido en este elemento sin un patrón aparente, manifestándose una franja especialmente abundante en hierro a la altura de Sollana y que atraviesa transversalmente el Parque. En el cuarto horizonte esta franja deja de ser evidente, pero sí que se reconoce un incremento del contenido en hierro en la mitad norte del Parque, especialmente en el noroeste y alrededor del lago. Este claro aumento se relaciona directamente con la alta cantidad en materia orgánica de esta zona y con la reducida cota. En estas profundidades, la capa freática aparece a menudo inundando el perfil, lo que crea condiciones de anaerobiosis y por tanto proclives a la reducción. A mayor potencial reductor mayor cantidad de hierro será evidenciada por los análisis, lo cual sucede en esta área.

4.1.7. Textura.

La textura de un suelo expresa la proporción en porcentaje de peso de las partículas de suelo menores a 2mm de diámetro. Dentro de este rango, el USDA distingue entre arcillas (diámetros menores a 0.002mm), limos (diámetros entre 0.002 y 0.05mm) y arenas (diámetros entre 0.05 y 2mm). La combinación de estas fracciones otorgará al suelo unas propiedades físico-químicas determinadas que afectarán, por ejemplo, a la capacidad de retención de agua, a la infiltración o a la permeabilidad (Fernández, 2005).

Según sean los porcentajes de cada fracción y mediante el triángulo de clases texturales, se puede clasificar cada uno de los horizontes analizados, asignándoles la clase correspondiente. Esto se ha realizado para cada uno de los horizontes estudiados y se ha obtenido una distribución en la que predomina la clase arcillosa (31.15%), seguida por la franco arcillosa (19.19%) y la arcillo limosa (16.03%). En total se han identificado 11 clases texturales distintas (de las 12 existentes) aunque 4 de ellas pueden considerarse testimoniales, pues no llegan a estar representadas ni por 10 horizontes de entre los 443 estudiados. La distribución de las clases texturales y sus frecuencias se presenta a continuación, tanto en la Figura 15 como en la Tabla 15:

Figura 15. Diagrama de barras de clase textural.

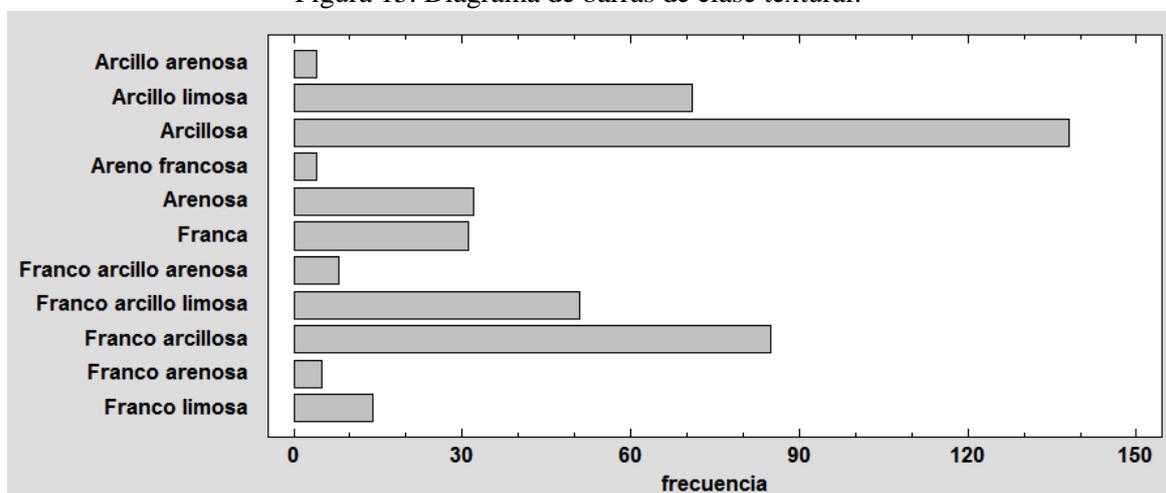


Tabla 15. Frecuencia absoluta y relativa de las clases texturales determinadas.

Clase	Valor	Frecuencia	Frecuencia Relativa
1	Arcillosa	138	31,15%
2	Franco arcillosa	85	19,19%
3	Arcillo limosa	71	16,03%
4	Franco arcillo limosa	51	11,51%
5	Arenosa	32	7,22%
6	Franca	31	7,00%
7	Franco limosa	14	3,16%
8	Franco arcillo arenosa	8	1,81%
9	Franco arenosa	5	1,13%
10	Arcillo arenosa	4	0,90%
11	Areno francosa	4	0,90%

Las clases texturales obtenidas se han comparado con los resultados de Moreno (2013), que también realizó este análisis, llegando a la conclusión de que son similares, puesto que las tres clases texturales más abundantes en sus resultados son, por orden: franco arcillosa, arcillo limosa y arcillosa. Estas son las tres principales clases texturales obtenidas en este trabajo también.

Cuando se observan las tres fracciones texturales, presentadas en la Tabla 16, se observa que los valores máximos y mínimos fluctúan entre un rango amplio. Los limos y las arcillas se comportan de forma muy similar, variando entre la total ausencia y un valor cercano a los tres cuartos del total de suelo, mientras que en el caso de las arenas es incluso más pronunciado, alcanzando máximos del 100% de muestra de suelo.

Estas observaciones se explican mediante los procesos formadores de la Albufera de Valencia. En primer lugar, los suelos de textura arenosa (que implica una composición con más del 85% de arenas) provienen del cordón dunar o restinga arenosa situada justo después de la playa. Es lógico, por lo tanto, encontrar porcentajes tan elevados de arena pues su formación se debe a la acumulación de arena motivada por las corrientes marinas de carácter noreste (Sanjaume, 1974). También se debe apreciar que el porcentaje medio de arenas en los suelos del Parque Natural al completo es de un 27%, cercano al tercio, lo que demuestra que la acumulación de arenas fue progresiva en todo el golfo marino que más tarde formaría la Albufera y que abarcó toda su superficie. Prueba de ello es que no hay ningún suelo que no posea un porcentaje en arenas nulo, el mínimo es del 2%.

En cuanto al predominio de texturas arcillosas, esto es a causa de que la Albufera se trata de una zona de acumulación de sedimentos provenientes de las cuencas de los ríos Júcar y Turia. La deposición de partículas finas provocada por las crecidas de estos ríos, unidas a la formación de la restinga arenosa terminaron por colmatar el golfo que dio paso al humedal que hoy conocemos. Los materiales aportados principalmente son limos pardos grises y negros que se acumulan en toda la zona del marjal. También se debe tener en cuenta la acción antrópica llevada a cabo sobre estos suelos para favorecer el cultivo del arroz, que se basó en la adición de suelos provenientes de zonas más altas de las mismas cuencas de los ríos (también de granulometría fina) y del mismo lago de la Albufera. Por lo tanto, los materiales presentes resultan bastante homogéneos a lo largo de todo el Parque Natural (Roselló, 1972).

Tabla 16. Datos estadísticos de las fracciones texturales.

Dato estadístico	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena(%)
Máximo	73	76	100
Mínimo	0	0	2
Media	38	35	27
Mediana	39	39	19

Si se estudia la textura en profundidad, se puede apreciar que las proporciones no varían en gran medida, pero siendo observable que las arcillas aumentan ligeramente y los limos se reducen. En el caso de las arenas no hay una tendencia regular clara de variación. Los resultados obtenidos se aprecian en la Tabla 17.

Tabla 17. Promedio de cada fracción textural en profundidad.

Profundidad	Arcilla	Limo	Arena
0-20	36	40	25
20-40	38	35	26
40-60	36	33	30
60-80	40	33	27
Total	38	35	27

La textura de los suelos del Parque, pese a ser un área de dimensiones relativamente reducidas como para producirse grandes variaciones y pese a tener unos procesos formadores comunes, cambia dependiendo tanto de la zona como de la profundidad. Cada una de las fracciones de material fino (arcilla, limo y arena) se ha cartografiado y estudiado por separado, pero la textura la compone la combinación de las tres por lo que tiene sentido analizarlas en un mismo apartado.

La arcilla, el componente más fino de los tres, muestra una clara variación cuando se compara su contenido en las zonas de marjal con el presente en la restinga arenosa (ver mapas de arcilla en el anejo de cartografía). En los arrozales, especialmente en las zonas deprimidas del centro del Parque se constata una acumulación de estas partículas, llegando a representar del 40 al 60% del total en algunas zonas en superficie. Cuando se observan sus cantidades en profundidad queda patente un cierto aumento de las mismas, alcanzando fracciones entre el 60 y el 80% en ocasiones en el horizonte más profundo. Al analizar su distribución espacial a lo largo del Parque, contrasta claramente la zona de marjal con la restinga arenosa. Esta última presenta unos porcentajes mucho más bajos (0-20%) independientemente de la profundidad a la que se observen. Si bien es verdad que existen acumulaciones mayores de arcilla alrededor de la gola del Perelló (desagüe natural del lago) a cualquier profundidad y de la gola del Perellonet en el horizonte más profundo estudiado. También es llamativo que las mayores acumulaciones se producen en la mitad sur del Parque y con una clara deriva hacia el lago. La explicación para este fenómeno es que las aguas empleadas en el riego provienen de la vertiente del Júcar, siendo evidente que este río transporta más elementos finos que el río Turia (al norte). La progresiva sedimentación y deposición de estas partículas ha ido configurando la textura de los suelos de esta parte de la Albufera.

En el caso de los limos, estos están distribuidos de una manera más homogénea a lo largo del Parque, siendo algo más frecuentes en las zonas occidentales y reduciendo sus porcentajes en la restinga arenosa, pero sin llegar a exhibir una diferencia tan marcada como las arcillas (ver mapas de limo en el anejo de cartografía). En superficie muestran sus mayores porcentajes (40-60%) y tienen una mayor representación en las zonas altas del suroeste en tres de las cuatro profundidades estudiadas (0-20cm, 20-40cm, 60-80cm). Su mayor porcentaje en superficie puede deberse por un lado a que se trate de materiales más jóvenes que las arcillas y arenas, pero también a que la

labranza y posterior inundación hayan provocado una iluviación de las arcillas hacia horizontes más profundos. También ocurre, como en el caso de las arcillas, que en torno a la gola del Perelló los porcentajes de limos son superiores a los que hay en el resto de la restinga arenosa.

Con las arenas pasa lo contrario que con las arcillas, se acumulan tanto en la zona norte como en la restinga arenosa (de ahí su nombre), llegando en esta a alcanzar porcentajes del 100% (ver mapas de arena en el anejo de cartografía). La arena es el material más antiguo de los tres que hay en la Albufera y eso es debido a los procesos formadores que se han dado lugar en ella. Como se ha explicado anteriormente, la Albufera de Valencia se formó a partir de un golfo marino que abarcaba desde la ciudad de Valencia hasta Cullera. La deriva de las corrientes marinas existentes provenientes del noreste provocó la acumulación de arenas en el golfo y posterior formación de la restinga arenosa, que cerró el golfo, dejando únicamente la gola del Perelló como desagüe. Tras formarse la restinga, las crecidas de los ríos Júcar y Turia y la deposición de sus sedimentos fueron reduciendo la superficie de agua libre existente. Por eso, las capas más profundas del Parque Natural constan de una mayor proporción de arenas depositadas por el mar previamente a su cierre y las capas más jóvenes se componen mayoritariamente de sedimentos finos aportados por los ríos Turia y Júcar.

4.2. Análisis de correlaciones entre propiedades.

En este apartado se estudiarán las correlaciones por rango de Spearman entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la asociación entre las variables. En contraste con las correlaciones de Pearson más comunes, los coeficientes de Spearman se calculan a partir del orden (ranks) de los datos, más que de sus valores mismos. En consecuencia, son menos sensibles a valores aberrantes (outliers) que los coeficientes de Pearson. Los resultados se exponen en la Tabla 17, en donde aparece el valor de la correlación en primer lugar y también el valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P por debajo de 0.05 (en rojo) indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95%. Una vez conocidas las correlaciones se presentarán posibles causas para justificar las mismas.

En la Tabla 18 se observan numerosas correlaciones estadísticamente significativas, pero se evaluarán aquellas que posean una correlación superior a 0.4, por presentar valores de correlación más robustos. El resto de casos, que muestran correlación inferior al 0.4, son interesantes a la hora de evaluar tendencias positivas o negativas.

La correlación más alta observada es la existente entre el nitrógeno y la materia orgánica, con un valor positivo del 0,71. Como se ha comentado anteriormente, el nitrógeno total presente en el suelo corresponde en un 85-95% a la fracción orgánica, siendo la fracción inorgánica habitualmente inferior al 10% (Benimeli *et al.*, 2019). El humus se ha documentado como reservorio de sustancias nitrogenadas, siendo los suelos con altos contenidos en ácidos húmicos y fúlvicos capaces de liberar mayores cantidades de nitrógeno que aquellos con un reducido contenido en materia orgánica (Garrido, 1994). Esto explica la correlación elevada y positiva entre estos dos componentes, que aumentan y disminuyen a la par.

La segunda correlación más intensa aparece entre la conductividad eléctrica y la materia orgánica que es de 0,61. Según Wendi *et al.* (2019), un incremento en la salinidad del suelo tiene un efecto negativo en la tasa de descomposición del carbono orgánico, debido a una reducción o incluso supresión de la respiración microbiana. Esto explica que en las zonas que muestran una mayor salinidad se produzca una acumulación de materia orgánica.

Entre la conductividad eléctrica y el contenido en nitrógeno aparece la tercera correlación más elevada, de 0,53. Como indica Laura (1977), la mineralización del nitrógeno orgánico a través de los procesos de amonificación y nitrificación se reduce o ralentiza según aumenta el contenido en

sales del suelo. Una mayor salinidad es capaz de frenar la amonificación pero sin llegar a suprimirla, mientras que la nitrificación sí que puede llegar a ser inhibida una vez alcanzado un nivel de salinidad determinado. Esto depende de la naturaleza de las sales y del origen orgánico del nitrógeno, pero en general, la cantidad de nitrógeno mineral presente en el suelo decrece según aumenta la salinidad. Es decir, se acumula nitrógeno orgánico en el perfil del suelo.

El pH y el contenido en nitrógeno también muestran una alta correlación, pero en este caso negativa (-0,52). Esto es debido al proceso de mineralización del nitrógeno, durante el cual se produce la amonificación y más tarde nitrificación. En este último proceso, el amonio libera iones hidrógeno que acidifican el suelo y reducen los valores de pH. Esta relación se repite independientemente del uso del suelo o de su contenido orgánico y está muy influenciada por el uso y sobre todo el abuso de fertilizantes inorgánicos nitrogenados (Watros *et al.*, 2018). También se menciona el hecho de que, las raíces de las plantas al absorber el amonio presente en el suelo liberan protones a la solución, aumentando su acidez.

Otra correlación elevada y de valor negativo, concretamente -0.499, es la que aparece entre la conductividad eléctrica y el pH. Como indica Sylla (1994), cuando en un suelo existen altas concentraciones salinas el complejo de cambio catiónico se ve afectado. En este existen iones que tendrán una mayor facilidad que otros para adherirse a la superficie de las arcillas que están negativamente cargadas. Altas concentraciones en cationes como el Na^+ o el Ca^{2+} desplazarán a los iones H^+ en el complejo de cambio, aumentando su concentración en la solución de suelo y así, acidificándola, es decir, reduciendo el pH.

El contenido en materia orgánica está correlacionado con el pH de forma negativa y con un valor de -0.447. Es decir, cuando el porcentaje total de materia orgánica aumenta, se produce una disminución en el pH observado. Para comprender esta reacción se debe atender a la composición de la fracción orgánica del suelo. Esta se compone en un 85% de sustancias húmicas, que se dividen entre ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas. La presencia de estos ácidos en la solución de suelo afecta al nivel de acidez. Es por tanto lógico que una mayor cantidad de materia orgánica en el suelo suponga una reducción en el pH, puesto que se incrementa la cantidad de ácidos presentes (Ukalska-Jaruga *et al.*, 2021). Otra de las razones posibles, como explican Cruz *et al.* (2021) para la acumulación de materia orgánica al disminuir el pH es la reducción de la actividad microbiana y la consecuente reducción en la degradación de compuestos orgánicos.

La siguiente correlación a tener en cuenta es la que existe entre el nitrógeno y el hierro, que asciende a 0,42. Los estudios de Motomura (1962) indican que el amonio derivado de los compuestos nitrogenados lleva a un incremento en la formación de ion ferroso, independientemente de la concentración. Esto se justifica por el aumento en la actividad microbiológica que provoca la presencia de amonio en el suelo. En sus ensayos, Xuero *et al.* (2016) afirma que los óxidos de hierro la nitrificación en suelos con pH elevados (7.8). En suelos con estos niveles de acidez también se reduce la mineralización del nitrógeno por lo que se producirá una acumulación del mismo.

La última correlación corresponde a la existente entre el hierro y la materia orgánica, con un valor de 0,41. La materia orgánica tiene una importante influencia en la solubilidad y la disponibilidad de hierro en el suelo. Este se libera durante la descomposición que realizan los microorganismos de los compuestos orgánicos y que pasa a estar en una forma asimilable para las plantas. Los estudios de Lindsay (1991) confirman que se puede corregir deficiencias de hierro en suelos mediante la adición de materia orgánica. En determinados estados de descomposición de la misma, el hierro puede formar compuestos complejos con ella, aumentando la concentración total de hierro soluble. Cuando la materia orgánica se degrada, electrones son liberados, produciendo la reducción del hierro y aumentando así su solubilidad, lo que es importante que ocurra en las zonas próximas al sistema radicular

Tabla 18. Correlaciones de Spearman entre parámetros (Casilla superior: correlación; casilla inferior: valor-p).

	pH 1/2,5	CE 1/5 (dS/m)	Carbonatos (%)	Materia orgánica (%)	Nitrógeno Total (%)	Fracción arcilla (%)	Fracción limo (%)	Fracción arena (%)	Hierro total (g/Kg)
pH 1/2,5		-0,49 <0.01	0,02 0,68	-0,45 <0.01	-0,52 <0.01	0,25 <0.01	-0,23 <0.01	-0,15 <0.01	-0,32 <0.01
CE 1/5 (dS/m)	-0,49 <0.01		0,17 <0.01	0,61 <0.01	0,54 <0.01	0,06 0,19	0,18 <0.01	-0,001 0,98	0,38 <0.01
Carbonatos (%)	0,02 0,68	0,17 <0.01		0,15 <0.01	0,12 0,012	0,04 0,36	0,19 <0.01	-0,05 0,34	0,09 0,04
Materia orgánica (%)	-0,45 <0.01	0,61 <0.01	0,15 <0.01		0,72 <0.01	0,02 0,72	0,31 <0.01	-0,05 0,27	0,41 <0.01
Nitrógeno Total (%)	-0,52 <0.01	0,54 <0.01	0,12 0,012	0,72 <0.01		-0,08 0,11	0,29 <0.01	0,02 0,64	0,42 <0.01
Fracción arcilla (%)	0,25 <0.01	0,06 0,19	0,04 0,36	0,02 0,72	-0,08 0,11		-0,11 0,02	-0,73 <0.01	0,20 <0.01
Fracción limo (%)	-0,23 <0.01	0,18 <0.01	0,19 <0.01	0,31 <0.01	0,29 <0.01	-0,11 0,02		-0,46 <0.01	0,37 <0.01
Fracción arena (%)	-0,15 <0.01	-0,001 0,98	-0,05 0,34	-0,05 0,27	0,02 0,64	-0,73 <0.01	-0,46 <0.01		-0,29 <0.01
Hierro total (g/Kg)	-0,32 <0.01	0,38 <0.01	0,09 0,04	0,41 <0.01	0,42 <0.01	0,20 <0.01	0,37 <0.01	-0,29 <0.01	

5. Conclusiones

Tras la realización del presente Trabajo Final de Master, se han conseguido todos los objetivos propuestos, pero sobretodo se ha conseguido mostrar la variabilidad espacial de los suelos de la Albufera de Valencia, suelos hídricos mediterráneos que reflejan las características típicas de estos suelos tan especiales. De esta forma y a partir de la cartografía generada se podrá conocer más ampliamente de cara a la gestión del Parque por parte de técnicos o agricultores la idiosincrasia de los suelos sobre los que se desarrollan las actividades agronómicas y medio ambientales del Parque Natural. Además este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones y aportando gran cantidad de información a día de hoy.

Como principal conclusión podemos decir que los suelos de la Albufera se caracterizan por ser moderadamente básicos (valor medio de pH de 8.093), además de mostrar una gran homogeneidad en esta propiedad. En sí, los suelos presentan altos niveles de materia orgánica (5.7% en promedio), por lo que presentan una acumulación si los comparamos con los suelos mediterráneos en zonas más altas donde el contenido de materia orgánica varía entre 1.5 y 2%. Esto ocurre debido a las condiciones reductoras de los suelos hídricos, en los que la falta de oxígeno que ralentiza los procesos de descomposición de la materia orgánica presente en el suelo. Este hecho recalca la capacidad que posee la Albufera de Valencia, como humedal que es, de funcionar como un sumidero de carbono orgánico. Prueba de ello son los numerosos horizontes orgánicos enterrados que han sido localizados mediante los sondeos y que llegan a mostrar un máximo de 60.4% de materia orgánica y que se formaron tras enterrarse de forma natural por el proceso de sedimentación o bien de forma antrópica por el proceso de aterramiento del lago.

Otra de las particularidades de los suelos de este humedal litoral es su clasificación como suelos salinos, mostrando una conductividad eléctrica 1/5 de 0.966 dS/m. Esto tiene varias implicaciones, una de ellas tiene que ver con el cultivo del arroz, pues un incremento continuado de la salinidad en el suelo produce una reducción inevitable de los rendimientos obtenidos. En este estudio se han obtenido máximos de 6.05 dS/m que ya están por encima del umbral de tolerancia del arroz. El efecto de la intrusión marina que aporta agua salada a los perfiles del suelo unido al empleo de aguas provenientes de depuradoras, ricas en sales tiene como consecuencia la constante salinización de los suelos que llegado un punto ya no serán adecuados para el cultivo. La otra implicación relevante que tiene la condición salina es el aumento en la acumulación de carbono orgánico, lo que podría considerarse positivo al aumentar la capacidad del humedal como sumidero de carbono. Sin embargo, un aumento de la salinidad provoca la reducción de microorganismos en el suelo, por lo que esa materia orgánica no entra en el ciclo del carbono y no fomenta la presencia de biodiversidad.

Los contenidos en carbonatos que se han analizado muestran una media de un 12.47%, considerados como un contenido medio, mientras que el nitrógeno total presente en los suelos se fija en un 0.196%. Por otro lado, la presencia de hierro libre total es una característica típica de los suelos hídricos, obteniéndose un valor medio de 2.63 g/kg pero con una gran variabilidad entre perfiles (coeficiente de variación medio de 195.97%). Esto era de esperar, pues depende del estado de reducción de los horizontes analizados y de la presencia de la capa freática a lo largo de año, de tal manera que se han hallado muestras sin hierro presente al igual que se han obtenido resultados máximos de 47.97 g de hierro/kg de suelo. Las condiciones reductoras están ligadas tanto a la cota del terreno, en muchas ocasiones por debajo del nivel del mar, como a la capa freática, habitualmente dentro del primer metro de suelo y a las condiciones de inundación a las que están sometidas los suelos del Parque Natural durante muchos meses al año.

En cuanto a las texturas de suelo podemos decir que los suelos hídricos del Parque se clasifican en su mayoría como finas, pues abundan las clases texturales arcillosa, franco arcillosa y arcillo

limosa. Las fracciones texturales arcilla-limo-arena medias tienen unos valores de 38-35-27, lo que resulta a priori equilibrado. Sin embargo, se debe tener en cuenta la localización de cada perfil de suelo, ya que existen zonas puramente arenosas (restinga) como con valores de hasta un 73% de arcilla. Estas variaciones responden a los procesos formadores del Parque Natural, influenciados en primer lugar por el aporte de arenas debido a la deriva de las corrientes marinas y después por la deposición de sedimentos finos provenientes de las cuencas fluviales de los ríos Turia y Júcar.

En resumen podemos decir que tenemos suelos básicos y salinos, con un elevado contenido en materia orgánica y con una textura fina, siendo fracciones arcillosas las que predominan. Además los suelos presentan un contenido en carbonatos moderado y un valor de nitrógeno y hierro adecuado. No obstante, la variabilidad de los suelos espacial en superficie y en profundidad da lugar a suelos diferentes dentro del Parque que derivan principalmente del efecto de formación de este humedal.

Además y en referencia a la generación de un SIG que puede ser actualizable y la generación de cartografía de todo el Parque natural, decir que se han elaborado los mapas de cada una de las propiedades edáficas en las cuatro profundidades muestreadas (0-20cm, 20-40cm, 40-60cm y 60-80cm), obteniendo unos resultados suficientemente ilustrativos. La malla de puntos empleada ha permitido un muestreo correcto para conocer las propiedades a una escala de 1/120000 que ofrece una visión general del Parque Natural. Esta cartografía puede tomarse como base para futuras investigaciones en las que se aumente el nivel de detalle, ampliando la malla de puntos empleada y añadiendo más propiedades que resulten de interés.

En conjunto se considera que los resultados del trabajo son satisfactorios y relativamente completos y que pueden ser empleados con numerosos fines, tanto por investigadores como por agricultores que requieran de información para una toma de decisiones más precisa.

6. Bibliografía.

- AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). (1993). UNE 103200:1993. Determinación de carbonatos en suelos. 6pp.
- AGUILAR M.; FERNÁNDEZ J.L.; AGUILAR M.; ORTIZ C., (2016). Respuesta Agronómica del Arroz al Riego Salino en Distintas Fases del Cultivo. *Consejería de Agricultura, Pesca, y Desarrollo Rural. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera*. 1-25 p.
- ASIO, V.B.; BADAYOS, R.B. (1998). Biological accumulation of calcium carbonate in some lowland rice soils in the Philippines. *Philippine Agricultural Scientist* 81(3): 176-181pp.
- BENIMELI, M.F.; PLASENCIA, A.; CORBELLA, R.D.; ANDINA, D.; SANZANO, A.; SOSA, F.A.; FERNÁNDEZ, J. (2019). El nitrógeno del suelo. *Cátedra de Edafología. Universidad Nacional de Tucumán*.
- BODECK, I.; LYMAN, W.I.; REEHL, W.F.; ROSENBLATT, D. (1988). *Environmental inorganic chemistry, properties, processes and estimation methods*. Pergamon. 1280pp.
- BOIRA, H. (2012). *La vegetación de los humedales litorales valencianos: bases para su conservación*. Universidad Politécnica de Valencia. 200pp.
- CAMPILLO, R.R.; SADZAWKA R.A. (2006) *La acidificación de los suelos. Origen y mecanismos involucrados*. Temuco: Serie Actas-Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 38
- CRUZ, W.O.; RODRÍGUEZ, L.A.; SALAS, M.A.; HERNÁNDEZ, V.; CAMPOS, R.A.; CHÁVEZ, M.H.; GORDILLO, A., (2021). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*. Vol.38. N°3.
- DOBERMANN, A., T. FAIRHURST. 2000. *Rice: Nutrient disorders & Nutrient management*. Potash and Phosphate Institute and International Rice Research Institute.
- DURÁN VALSERO, J.J.; GARCÍA DE DOMINGO, A.; LÓPEZ-GETA, J.; A., ROBLEDO ARDILA, P.A.; SORIA, J.M. (2005). *Humedales del Mediterráneo español: modelos geológicos e hidrogeológicos*. Instituto Geológico y Minero de España. 160pp.
- ESQUIVEL MATA, G. (2018). La importancia del hierro (Fe) en la agricultura. *Drokasa Perú*.
- FERNÁNDEZ R.J. (2005). La textura del suelo como fuente de heterogeneidad; sus efectos sobre la oferta de agua para las plantas. En: *La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas*. Universidad de Buenos Aires. 171-192pp.
- GARRIDO M.S., (1994), *Interpretación de análisis de suelos*. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario. 40pp.
- GENERALITAT VALENCIANA (GVA). *Parques naturales. L'Albufera*. Visto el 21/06/2021. <https://parquesnaturales.gva.es/es/web/pn-l-albufera/conocenos>
- GÓMEZ-SENENT MARTÍNEZ E. (2002). *El arroz en Valencia. Museo del arroz en la ciudad de Valencia*. Universidad Politécnica de Valencia. 164pp.
- GRASSET, C.; RODRIGUEZ, C.; DELOLME, C.; MARMONIER, P.; BORNETTE, G. (2017). Can soil organic carbon fractions be used as functional indicators of wetlands? *Society of Wetland Scientists*. N°37. 1195-1205pp.

- KURTZ, D. (2015). La importancia de la utilización de los mapas de suelos. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*.
- LAURA, R.D. (1977). Salinity and nitrogen mineralization in soil. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 9. 333-336pp.
- LINDBO, D.L.; STOLT, M.H.; VEPRASKAS, M.J. (2010). Redoximorphic Features, en: *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Elsevier Science. 129-147pp.
- LINDSAY, W.L. (1991). Iron oxide solubilization by organic matter and its effect on iron availability. *Plant and Soil*. N°130. 27-34pp.
- MARTÍNEZ, F.J. (2003). *Estudio agronómico y ambiental del riego con aguas residuales depuradas en el cultivo del arroz. Aplicación a una línea de riego en el Parque Natural de la Albufera (Valencia)*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 365pp.
- MONDRIA GARCÍA, M. (2003). Estudio para el desarrollo sostenible de la Albufera de Valencia. *Ministerio de Medio Ambiente (MMA), Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ)*. Clave 08.803-190/0411.
- MONTAÑÉS, L.; HERAS, L. (1971). Influencia del contenido de carbonato cálcico sobre la fijación de hierro. *CSIC - Estación Experimental de Aula Dei (EEAD)*.
- MORENO RAMÓN, H. (2013). *Evaluación espacio-temporal de las aguas y suelos de la zona colindante al lago de la Albufera de Valencia: Intento de recuperación*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 546pp.
- MORENO-RAMÓN H, MARQUÉS-MATEU A, IBÁÑEZ-ASENSIO S, GISBERT JM (2015) *Wetland soils under rice management and seawater intrusion: characterization and classification*. *Spa J Soil Sci* 5(2): 111–129pp.
- MOTOMURA, S. (1962). The relationship between ferrous iron formation and nitrogen metabolism in soil. *Soil science and plant nutrition*. 8:5. 9-17pp.
- PARTIDA-RUVALCABA, L.; VELÁZQUEZ-ALCARAZ, T.; ACOSTA-VILLEGAS, B.; ANGULO-GAXIOLA, C. (2006) Extractos vegetales y su efecto en la conductividad eléctrica de dos suelos salinos y de soluciones. *Terra Latinoamericana*, N°24(1), 83-89.
- PONNAMPERUMA, F.N. (1981) *Properties of Tropical Rice Soils*. Text of a Series of Lectures Delivery to Graduate Students at the Topical Agriculture College, H. Cardenas, Tabasco, Mexico on 23-25 July 1981
- PORTA, J.; LÓPEZ-ACEVEDO, M.; ROQUERO, C. (1999). *Edafología: Para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa. 961pp.
- PRAT PÉREZ, L. (1981). *Importancia de la reacción del suelo. Acidez: pH. Necesidad de cal*. Instituto de Orientación y Asistencia Técnica del Oeste.
- RAMSAR (1994). *Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas*. Paris. UNESCO. 3pp.
- RICHARDS, L.A.; (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Agriculture Handbook n°60. USSL. USDA. 165pp.

- ROMANYÀ, J.; ROVIRA, P.; VALLEJO, R., (2007). Análisis del carbono en los suelos agrícolas de España. Aspectos relevantes en relación a la reconversión a la agricultura ecológica en el ámbito mediterráneo. *Ecosistemas*, Nº16. 50-57pp.
- ROSELLÓ VERGER, V.M. (1972). Los ríos Júcar y Turia en la génesis de la Albufera de Valencia. *Saitabi: revista de la Facultat de Geografia i Història*, Nº22. 129-147pp.
- SANCHÍS DUATO, E.; ANDREU PÉREZ, V.; RUBIO DELGADO, J.L. (1998). Los suelos de la Devesa de la Albufera. *Revista valenciana d'estudis autonòmics*, Nº22. 129-144pp.
- SANJAUME SAUMELL, E. (1974). El cordón litoral de la Albufera de Valencia: estudio sedimentológico. *Cuadernos de geografía*, Nº14. 61-96pp.
- SAÑA VILASECA, J.; MORÉ RAMOS J.C.; COHÍ RAMÓN A., (1996). *La gestión de la fertilidad de los suelos*. Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. 277pp.
- SOIL SURVEY STAFF. (2004). Soil Survey Laboratory Methods Manual, Soil Survey Investigations Report, nº42. Version 4.0. Burt, R. eds. *USDA, NRCS*. 700pp.
- SOIL SURVEY STAFF. (2009). Soil Survey Laboratory Methods Manual, Soil Survey Investigations Report, nº51. Version 1.0. Burt, R. eds. *USDA, NRCS*. 407pp.
- SOIL SURVEY STAFF. (2014). Claves para la Taxonomía de Suelos. *Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Servicio de Conservación de Recursos Naturales*. 410pp.
- SYLLA, M. (1994). Soil salinity and acidity: spatial variability and effects on rice production in West Africa's mangrove zone. *Wageningen University*.
- TRINIDAD-SANTOS, A.; VELASCO-VELASCO, J. (2016). Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agroproductividad*. Vol 9, Nº8. 52-58pp.
- UKALSKA-JARUGA, A.; BEJGER, R.; DEBAENE, G.; SMRECZAK, B. (2021) Characterization of Soil Organic Matter Individual Fractions (Fulvic Acids, Humic Acids, and Humins) by Spectroscopic and Electrochemical Techniques in Agricultural Soils. *Agronomy*, Nº11.
- USDA (1999). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo.
- USDA-NRCS (United States Department of Agriculture)-(National Resources Conservation Service). (2010). Field indicators of hydric soils in the United States. Versión 7.0. Vasilas, L.M.; Hurt, G.W.; Noble, C.V.; eds. *USDA-NRCS-NTCHS*. 51pp.
- USDA-NRCS. (2018). Field Indicators of Hydric Soils in the United States, Version 8.2. L.M. Vasilas, G.W. Hurt, and J.F. Berkowitz (eds.). *USDA, NRCS, in cooperation with the National Technical Committee for Hydric Soils*.
- VALLES, I. (1979). Cartografía històrica de l'albufera de València. *Acta Geològica Hispànica*. Nº14. 49-53pp.
- VEPRASKAS M.J. (1996). Redoximorphic features for identifying aquic conditions. *N.C. Agricultural Research Service, N.C. State University*. 33pp.
- VEPRASKAS M.J. (2015). *Wetland Soils: Genesis, Hydrology, Landscapes and Classification*. CRC Press. 522pp.
- VERA, L.; HERNÁNDEZ, A.; MESÍAS, F.; GUZMÁN, A. (2017). *Manual para la cartografía de suelos y la descripción de perfiles de suelos*. Editorial Humus. 76pp.

- WATROS, A.; LIPÍŃSKA, H.; LIPÍŃSKI, W.; TKACZYK, P.; KRZYSZCZAK, J.; BARANOWSKI, P.; BRODOWSKA, M. JACKOWSKA, I. (2018). The relationship between mineral nitrogen content and soil ph in grassland and fodder crop soils. *Applied Ecology and Environmental Research*. N°17. 107-121pp.
- WENDI Q.; JUANYONG L.; GUANGXUAN H.; HAITAO W.; WEIMIN S.; XIAOSHUAI Z. (2019). Effect of salinity on the decomposition of soil organic carbón in a tidal wetland. *Journal of Soils and Sediments*. N°19. 609-617pp.
- XUERU, H.; XIA Z.; WILLIAM R.H.; SARWEE J.F.; HONGYAN, L.; XIAOPING, X.; XIANJUN, J.; (2016). Effect of iron oxide on nitrification in two agricultural soils with different pH. *Biogeosciences*. N°13. 5609-5617pp.