

Estudio de los suelos del entorno del Balneario de San Nicolás (Almería)

Title in English: *Study soil in the thermal environment of San Nicolás (Almería)*

Antonio López Lafuente^{1*}, Inmaculada Valverde Asenjo¹, José Ramón Quintana Nieto¹, Juan Pedro Martín Sanz¹, Ana de Santiago Martín², Concepción González Huecas¹

¹Departamento de Edafología, Facultad de Farmacia. Universidad Complutense de Madrid. Plza. Ramón y Cajal s/n. 28040 Madrid, España. ²Instituto IMDEA Agua. Avenida Punto Com, 2. 28805 Alcalá de Henares, Madrid, España. *lopezlafuente@farm.ucm.es

An. Real. Acad. Farm. Vol 83, Special Issue (2017) pp. 125-138.

RESUMEN	ABSTRACT
<p>Las propiedades físico-químicas de los suelos que se encuentran en la parte superficial de las capas freáticas, juegan un papel muy importante en las características hidroquímicas de las aguas subyacentes, pues fenómenos como disolución, hidrólisis y procesos de óxido-reducción de fracciones minerales y orgánicas de los suelos influyen de forma significativa en la composición de las mismas. Además, textura, estructura y materia orgánica del suelo son factores claves en la regulación del régimen hidrodinámico. En este trabajo analizamos las características edáficas de cuatro suelos muy significativos de los alrededores del Balneario de San Nicolás, ubicado en Alhama de Almería, Alpujarra Almeriense, situada a 450 msnm en la ladera norte de la Sierra de Gádor. Son suelos con escaso desarrollo, tipo AC, formados a partir de materiales sedimentarios constituidos por margas arenosas, calcarenitas, dolomías y yeso, los situados en las proximidades del Valle del Andarax, y por materiales de derrubios de ladera y pie de monte, con predominio de cuarcita, dolomías, calizas y calizas margosas, los situados en la Sierra de Gádor. Los suelos son carbonatados y están saturados, siendo el calcio el catión mayoritario. Presentan pHs básicos, bajo contenido en materia orgánica y texturas gruesas. Cuarzo, calcita, dolomita y yeso son los minerales más abundantes entre los no laminares, y son las micas los filosilicatos presentes en mayor proporción. El predominio de texturas gruesas y la pérdida de estructura en los horizontes profundos son determinantes en el grado de infiltración. Se han incluido en las unidades Regosoles y Calcisoles.</p>	<p>The physico-chemical properties of soils adjacent to aquifers play an essential role in the hydrochemical characteristics of the underlying waters. Thus, phenomena such as dissolution, hydrolysis and oxide-reduction processes of the mineral and organic fractions of soils may have a significant influence on the composition of these waters. Furthermore, soil texture, structure and organic matter are key factors regulating the hydrodynamic regime. In this work, the edaphic characteristics of four highly representative soils located in the thermal environment of San Nicolás in the Alhama de Almería municipality of the Alpujarra Almeriense region were analyzed. The area is part of the northern side of the Sierra de Gádor at an altitude of 450 masl. They are poorly developed soils, mainly AC profiles. Soils in the vicinity of the Andarax Valley are formed on sedimentary materials constituted by sandy marls, calcarenites, dolomites and gypsum, and those in the Sierra de Gádor developed on debris material from hillside and piedmont and mainly integrated by quartzite, dolomites, limestones and marly limestones. Soils are carbonated and saturated, with calcium being the major cation. They have basic pH values, low organic matter content and coarse textures. Quartz, calcite, dolomite and gypsum are the prominent minerals among the non-laminar ones, and micas among the phyllosilicates. The predominance of coarse textures and the loss of structure in the deep horizons are decisive in their infiltration capacity. They were classified as Regosols and Calcisols.</p>
<p>Palabras clave: suelos poco desarrollados; propiedades hidráulicas; zonas semiáridas; Alhama de Almería.</p>	<p>Keywords: soils poorly developed; hydraulic properties; semi-arid environment; Alhama de Almería</p>

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las aguas subterráneas tienen su origen en la acumulación de las precipitaciones y aguas superficiales que se infiltran a través del suelo y se depositan en diferentes estratos a profundidades variables, en función del tipo de material subyacente (1). Las características fisicoquímicas de las rocas donde se acumulan, determinan la composición del agua, y las discontinuidades estructurales en los materiales geológicos influyen, en gran medida, sobre las trayectorias complejas que presenta el flujo de agua en el sistema acuífero (2). Ahora bien, su composición no solo depende de factores como la litología, o la calidad de las aguas de recarga, también depende de la composición química de los suelos sobreyacentes, con especial incidencia en los fenómenos de disolución, hidrólisis y oxido-reducción de las fracciones minerales y orgánicas, y de las actividades antrópicas que puedan alterar su composición (3,4). La contaminación de los acuíferos sucede cuando la concentración del contaminante en el suelo o en el agua, alcanza valores que sobrepasan los niveles de referencia propuestos por las administraciones sanitarias nacionales o internacionales, y afectan la salud humana o del ecosistema (5, 6).

Es, pues, el suelo uno de los elementos esenciales del sistema, su composición química y mineralógica -determinada por los factores formadores-, su posición en el ecosistema -superficie de la corteza terrestre-, hace que tenga una función determinante, tanto en la composición del agua, como en la recarga del acuífero. Textura, estructura, pH, conductividad, complejo de cambio, junto a los compuestos coloidales y la composición mineralógica, son algunos de los parámetros edáficos que determinan su capacidad de infiltración, por tanto, condicionan la llegada de elementos al agua subterránea, procedentes tanto, de la alteración órgano-mineral, como de la contaminación (7). Además de las características edáficas de los suelos sobreyacentes, la recarga del acuífero depende, de la precipitación y su distribución a nivel diario, de la temperatura, de la geomorfología y de la vegetación (8).

Tener conocimiento de la dinámica que afecta a la recarga natural de los acuíferos en zonas áridas y semiáridas es fundamental para la evaluación, conservación, gestión y planificación a corto, medio y largo plazo, de los recursos hídricos subterráneos (9).

En este trabajo estudiamos las características morfológicas, físicas, químicas y mineralógicas de suelos desarrollados en zonas semiáridas del suroeste de la provincia de Almería que circundan el Balneario de San Nicolás (Alhama de Almería), con el objetivo de describir los tipos de suelos más representativos de la zona, y analizar aquellas propiedades edáficas que condicionan los flujos de agua a lo largo del perfil.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Características del área de estudio

El Balneario de San Nicolás está ubicado en la población de Alhama de Almería, localidad de la Alpujarra Almeriense, situada a 450 msnm en la ladera norte de la Sierra de Gádor. Dos son los sectores geomorfológicos y paisajísticos que se divisan desde la casa balneario. En dirección septentrional se encuentra la depresión neógena correspondiente al Valle del Andarax, donde los sedimentos y la erosión configuran el tipo de paisaje (Foto 1). En dirección suroeste se encuentran los cerros San Marcos y Milano, con predominio de calizas y pizarras paleozoicas que imprimen una orografía escarpada a estas primeras estribaciones de la Sierra de Gádor (Foto 2).



Foto 1. Paisaje del Valle del Andarax.



Foto 2. Paisaje de la Sierra de Gádor.

El Valle del Andarax está formado por materiales sedimentarios, constituidos por margas, arenas limosas, gravas y conglomerados del Mioceno que, condicionados por la acción del viento y el agua de escorrentía, da origen a un paisaje, típico de zonas áridas y semiáridas, formado por piedemontes, conos aluviales, pendientes angulosas con cantos groseros, erosión en cárcavas o badlands y fenómenos de tubificación (10). En los alrededores de la población de Alhama de Almería, en dirección noreste, y colgado sobre los sedimentos del Plioceno y el Mioceno, con un desarrollo de varios metros de potencia, aparecen calizas travertínicas, actualmente en explotación en distintas canteras de la zona (11) (Foto 3).

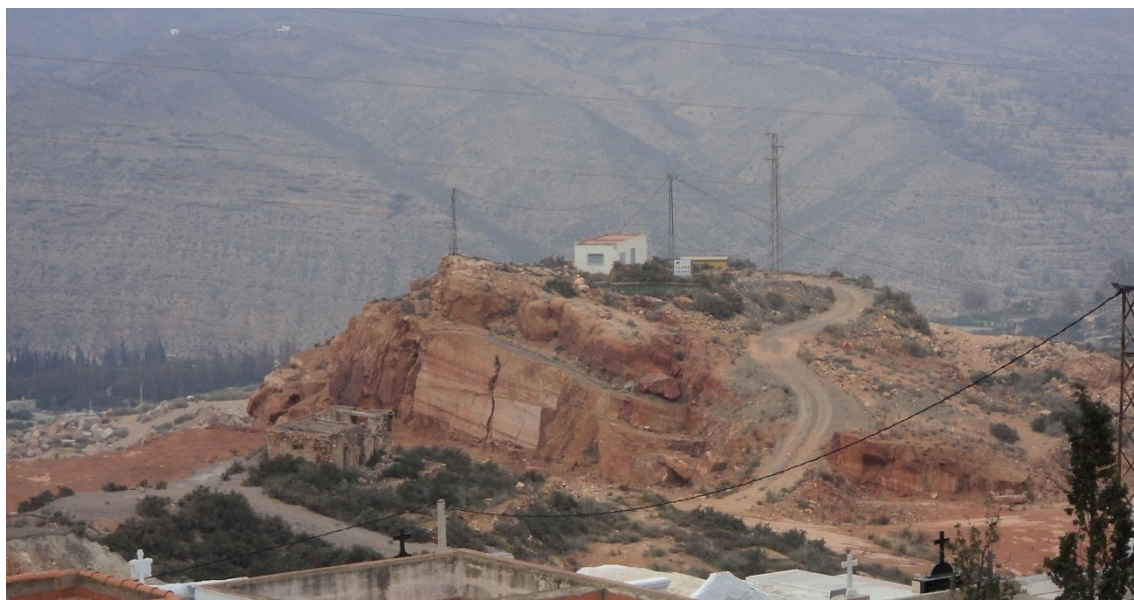


Foto 3. Paisaje de canteras en explotación.

Al suroeste del Balneario se encuentran las estribaciones correspondientes a la ladera norte de la Sierra de Gádor. Cadena montañosa que alcanza altitudes

superiores a los 2200m (Punta del Sabinar, 2236m) y que se extiende paralela al mar en el suroeste de la provincia de Almería (11). Su límite en el sur se encuentra en la comarca natural conocida como Campo de Dalías y en el norte en Sierra Nevada y Valle del Andarax. Los materiales que forman la sierra están constituidos fundamentalmente por: calizas y dolomías, apareciendo además: calizas margosas, micasquitos, filitas, yeso y cuarcitas (12), que configuran un paisaje condicionado por el tipo de roca. Así, mientras que la mayoría de los materiales alpujárrides desarrollan pendientes muy suaves y de perfil cóncavo, la orla carbonatada configura relieves muy enérgicos. La unión entre estos relieves y las depresiones neógenas se realiza en un corto espacio, bien por antiguos glaciares cuaternarios o por depósitos de pie de monte (11). La vegetación es escasa y la forman encinares (zonas altas), pinos de repoblación y matorrales típicos del bosque mediterráneo (13) (Foto 4).



Foto 4. Vegetación de la Sierra de Gádor.

2.2. Métodos analíticos

Los suelos fueron tomados en un glacis antiguo (12) situado a lo largo del camino en dirección oeste hacia la cumbre del cerro del Castillo, a diferentes altitudes entre 40 y 115 msnm, perfiles I, II y III. El perfil IV se localiza en la zona de La Plana a 2 km del pueblo en dirección al mar. La toma de muestras se realizó teniendo en

cuenta la variabilidad litológica, topográfica, de vegetación y de usos del territorio, encontrada.

Los análisis se realizaron en la fracción fina del suelo (< 2 mm), de acuerdo con los métodos propuestos por ISRIC (14), y se determinaron los siguientes parámetros: El análisis granulométrico se llevó a cabo previa oxidación de la materia orgánica con peróxido de hidrógeno, la dispersión de las muestras se realizó con hexametáfosfato de sodio y agitación durante 8 h. La fracción arena se separó por tamizado, las fracciones limo y arcilla se determinaron utilizando el método de la pipeta de Robinson. El contenido de nitrógeno total se midió por análisis elemental en un analizador (LECO CNS 2000). El carbono orgánico total (COT) se cuantificó por oxidación húmeda de acuerdo con Walkley-Black (15), empleando un valorador automático 665 Dosimal (Metrohm). Para la capacidad de cambio catiónico se empleó una solución de 1M NH₄OAc a pH 7,0. La concentración de Ca y Mg, se cuantificó por espectroscopía de absorción atómica (AAS) (Analytikjena NovAA 300) y, por espectroscopía de emisión de llama, utilizando un fotómetro Sherwood 410, la concentración de Na y K. El pH se determinó en una suspensión suelo:agua con una relación 1:2,5 (p/v), medido en un pH-metro Crison GPL21. La conductividad eléctrica se midió en una suspensión agua:suelo con una relación 1:5 (p/v), medida en un conductímetro modelo Crison micro CM 2200. El CaCO₃ se determinó por el método de neutralización ácida. Se siguió el procedimiento USDA (16) para la determinación de la densidad aparente, de la densidad real y de la humedad del suelo a capacidad de campo. La porosidad se obtuvo indirectamente, por cálculo, a partir de los valores de las densidades real y aparente (16). La determinación de los valores de retención de agua del suelo (pF-curva) y de conductividad hidráulica saturada se realizó empleando funciones de pedotransferencia (FTP). Se trata de modelos que relacionan distintas variables edáficas con la humedad del suelo a potenciales de agua seleccionados y otras propiedades hidráulicas (17). Estas funciones se basan en ecuaciones que tienen como argumento básico atributos que describen al suelo (por ejemplo: distribución de tamaño de partículas, densidad aparente y contenido de carbono orgánico) (18). Para la identificación mineralógica, las muestras de suelo total (< 2mm) se introdujeron en porta-muestras de aluminio de carga lateral (para favorecer la orientación aleatoria de las partículas) y se analizaron en un difractómetro de rayos X EQ 0434520 31 02 (X'Pert MPD), se realizaron análisis continuos de 3-60° y con una velocidad de 0.04° por segundo. Las muestras se analizaron durante 60 minutos.

Las suspensiones y disoluciones se prepararon con agua purificada Milli-Q (>18MΩcm) y con reactivos de alta pureza de Merck (Alemania) y Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, EE.UU.). El material de vidrio empleado fue lavado con una solución acuosa de HNO₃ 0,1% durante 24 h y se aclaró con agua desionizada tipo I agua (Sistema de

Purificación de Agua, Younglin, Aqua MAX-Basic serie 360). Se realizaron dos réplicas de cada uno de los análisis y los valores medios obtenidos fueron empleados para los cálculos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Características morfológica de los suelos

Se han analizado muestras de cuatro perfiles tomados en los alrededores del Balneario, tres en la ladera norte de la Sierra de Gádor (Al-I; Al-III; Al-IV) y uno en los sedimentos cuaternarios del Valle del Ándarax (Al-II). Las características morfológicas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características morfológicas de los suelos.

Horz.	Prof. cm	Munsell Color (seco)	Munsell Color (húmedo)	Text.†	Estruct.¶	Resistencia ruptura (húmedo)#	Fragmentos rocosos ††	Límites §
<u>Perfil Al-I</u>								
Ah	0-15	5YR5/2	5YR4/3	fra	1fgr	mfr	3P	d
AC	15-50	5YR6/2	5YR5/2	fra	1fsb	mfr	3P	-
<u>Perfil Al-II</u>								
Ah	0-5	7,5YR6/0	7,5YR6/0	fra	1fgr	fr	1G	d
C	5-60	7,5YR7/0	7,5YR6/0	fr	se	fr	1G	-
<u>Perfil Al-III</u>								
Ah	0-5	5YR6/2	5YR5/2	-	1fgr	-	-	d
C	5-35	5YR7/2	5YR6/2	fr	se	fr	1G	cl
<u>Perfil Al-IV</u>								
Ah	0-3	10YR7/4	10YR6/4	-	1fgr	-	-	d
Ck	3-40	10YR7/6	10YR6/4	fa	1fp	mfr	1G	-

† Textura: fa, franco-arenoso; fr, franco-arcilloso, fra, franco-arcillo-arenoso; r, arcilloso; ra, arcillo-arenoso.

¶ Estructura: 1, débil; 2, media; 3, fuerte; f, fina; m, mediano. gr, granular; p, poliédrica, sb, bloque subangular, se, sin estructura.

Resistencia a la ruptura: mfr, muy friable; fr, friable; fi, firme.

†† Fragmentos rocosos: cantidad 1, 2 y 3 corresponde a < 5%, 5-15% y 15-50%, respectivamente, G, grava; GS, mezcla de grava y piedra; P, piedra.

§ Límite: go, gradual ondulado; d, difuso; cl, contacto lítico.

El perfil Al-I está situado en las proximidades de la carretera que va de Roquetas a Alhama de Almería (A-391) en el km 16,300, a una altitud de 570 msnm, a media ladera en una zona escarpada de la vertiente norte de la Sierra de Gádor. Predomina una vegetación formada por matorral denso de retamas y distintas especies de tomillar-romeral. Desarrollado a partir de materiales de derrubios de ladera y pie de monte, en los que predominan cuarcita, dolomías, calizas y calizas

margosas (12). Suelo de escaso desarrollo, con 15 cm de horizonte Ah, de color gris rojizo (5YR5/2), estructura granular, muy enraizado, y con gran cantidad de inclusiones de trozos de roca. A partir de los primeros centímetros aparece un horizonte AC hasta los 50 cm de profundidad, de color gris rojizo (5YR6/2), estructura en bloques subangulares, da ligera reacción con HCl y fuerte inclusión de trozos de roca de tamaño medio y grande (Foto 5).

El perfil Al-II se encuentra al norte de la población de Alhama de Almería en dirección al Valle del Andarax, a unos 300 m del Balneario. El suelo está formado a partir de margas arenosas y calcarenitas, dolomías y yesos (12). El horizonte superficial Ah es poco profundo (5 cm), con escasos restos de vegetación halófila. Presenta un color gris claro (7,5YR6/0), con poca inclusión de raíces y estructura granular. El horizonte C, hasta 60 cm de profundidad, presenta un color gris claro (7,5YR7/0), sin estructura y, da ligera reacción con HCl (Foto 6).



Foto 5. Perfil Al-I.



Foto 6. Perfil Al-II.

Los perfiles Al-III y Al-IV, están tomados sobre distintos materiales situados en la Sierra de Gádor en los alrededores de la población de Alhama. El perfil Al-III situado junto a la carretera A-348 que une Alhama de Almería con Almería, frente a la cantera de calizas travertínicas (calizas formadas en condiciones de agua dulce) (19). La vegetación de la zona es escasa y está formada por diferentes tipos de tomillares y pinar de repoblación. El suelo está poco desarrollado, constituido por un horizonte superficial, Ah de 5 cm, color gris rosáceo (5YR6/2), escasas raíces de tamaño

pequeño. Presenta un límite difuso con el horizonte C de color gris rosáceo (5YR7/2), formado por distintos tipos de materiales margosos: calizos, yesíferos y argilitas. Sin estructura, aparecen trozos de roca de fácil alteración, unos de color amarillo (2,5Y7/6), que dan reacción con HCl y otros trozos heterométricos de color gris (2,5Y 5/0), que no dan reacción con HCl (Foto 7).

El Perfil Al-IV, se localiza en la parte media del Cerro Milano a una altitud de 580 msnm, próximo al Mirador del Andarax (A-391). Se desarrolla a partir de calizas, argilitas, pizarras y yesos (Foto 8). Con escaso desarrollo superficial, apenas 3 cm de horizonte Ah de color pardo muy pálido (10YR7/4). Presenta un horizonte C subyacente de color amarillo (10YR7/6) formado por trozos de roca de distinto tamaño que forman lascas fácilmente alterables. La mezcla de materiales hace que haya materiales carbonatados y no carbonatados en el mismo horizonte.



Foto 7. Perfil Al-III.



Foto 8. Perfil Al-IV.

3.2. Propiedades químicas de los suelos

El perfil Al-I tiene un escaso desarrollo edáfico con una profundidad que no supera los 50 cm. Presenta un pH ligeramente básico en ambos horizontes, descendiendo ligeramente con KCl, lo que indica el alto grado de saturación. No se aprecian diferencias destacables entre ambos horizontes. Los valores de conductividad eléctrica, por debajo de 1 dSm^{-1} , ponen de manifiesto la ausencia de sales solubles. El carbono orgánico tiene valores moderados con ligero descenso en profundidad. Los valores de N siguen patrones similares a los del carbono, con una relación C/N por encima de 12 en superficie lo que nos da idea de un humus con moderada evolución, de acuerdo con el tipo de vegetación mayoritaria de la zona (Tabla 2). La capacidad total de cambio presenta valores moderados en el horizonte superficial, disminuyendo en el horizonte subyacente. El Ca es el catión mayoritario, seguido del magnesio, como corresponde a los materiales sobre los que se ha

desarrollado el suelo. Por el mismo motivo el complejo de cambio está saturado (Tabla 3).

Tabla 2. Parámetros físico-químicos seleccionados de los suelos del entorno del Balneario de San Nicolás.

Horz.	Prf. cm	pH H ₂ O	pH KCl	CE† dS m ⁻¹	Materia orgánica		C/N	M.O.†† g kg ⁻¹	Carb.§ g kg ⁻¹
					C g kg ⁻¹	N			
<u>Perfil Al-I</u>									
Ah	0-15	8,2	7,9	0,3	34,3	2,8	12,2	58,9	59,3
AC	15-50	8,4	8,0	0,6	18,1	1,3	13,9	31,1	61,7
<u>Perfil Al-II</u>									
Ah	0-5	7,6	7,1	1,5	15,3	1,2	12,7	26,3	57,9
C	5-60	7,8	7,6	2,5	5,6	0,1	-	9,6	53,3
<u>Perfil Al-III</u>									
Ah	0-5	8,1	8,0	1,3	22,1	2,1	10,5	38,0	63,2
C	5-35	8,4	7,9	1,5	7,4	0,2	-	12,7	58,9
<u>Perfil Al-IV</u>									
Ah	0-3	7,9	7,5	1,9	28,1	2,6	10,8	48,3	25,8
Ck	3-40	8,2	7,8	3,2	8,1	0,2	-	13,8	30,3

†CE = Conductividad eléctrica

††M.O. = Materia orgánica

§Carb. = Carbonato cálcico.

El perfil Al-II formado a partir de margas calcáreas y yesíferas. Es un suelo poco desarrollo con apenas 5 cm de horizonte superficial. Los pH están próximos a la neutralidad, tanto en agua como en KCl, sin diferencias significantes entre los dos horizontes. La conductividad presenta valores altos, sobre todo el horizonte C donde llega a 2,5 dSm⁻¹, característico de la presencia de sales solubles, fundamentalmente yesos. Los contenidos de C orgánico y N son muy bajos en el horizonte superficial, así como la capacidad de cambio (Tabla 2). Como era de esperar, en función del material de partida, los suelos están saturados y es el calcio el catión mayoritario (Tabla 3).

El perfil Al-III presenta un escaso desarrollo con una profundidad máxima de 35 cm, bajo los cuales aparece la roca consolidada. Los pH son básicos con valores alrededor de 8 que no varían, prácticamente, en H₂O y en KCl. La conductividad es baja en todo el perfil con valores que no superan 1,5 dSm⁻¹. El contenido en carbono orgánico es bajo y la cantidad de N, en comparación con el carbono, es relativamente alta, lo que origina una relación C/N próxima a 10 indicando un alto grado de humificación. Las proporciones de carbonatos son elevadas con cantidades en torno a 60 g kg⁻¹, que es la mayor cantidad encontrada en los suelos estudiados. (Tabla 2). El valor de la capacidad de intercambio iónico está en consonancia con los valores de

materia orgánica y también de arcilla (Tabla 3). Es el Ca el catión mayoritario en el complejo de cambio seguido del magnesio que también presenta valores altos.

El perfil Al-IV desarrollado a partir de calizas, margas yesíferas y pizarras, tiene una profundidad de 40 cm y está formado por un horizonte A y otro C. El horizonte superficial, de apenas 3 o 4 cm de media, forma una fina capa de acumulación de materia orgánica sobre el horizonte C. Presenta todo el perfil una gran cantidad de inclusiones de trozos de roca de diferente tamaño y diferente grado de alteración. El pH es ligeramente básico y disminuye media unidad con KCl. El contenido en carbono orgánico es relativamente alto descendiendo bruscamente a partir de los primeros centímetros. El valor del N en superficie es también elevado dando una relación C/N de 10,8. Los valores de conductividad (CE) son ligeramente mayores a los encontrados en los suelos precedentes, con un máximo en el horizonte C que sobrepasa los 3 dSm⁻¹, indicando la presencia de sales solubles. Por el contrario, los valores de CaCO₃, son los más bajos de los suelos analizados con un ligero incremento al profundizar en el perfil (Tabla 2). La capacidad de intercambio catiónico, presentan un valor más alto en superficie, disminuyendo mucho en profundidad. Es el calcio el catión mayoritario, aunque destaca la notable concentración de Na (Tabla 3).

Tabla 3. Complejo de cambio catiónico de los suelos del entorno del balneario de San Nicolás.

Horz.	Prf. cm	CIC†	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ¹⁺	K ¹⁺	Saturación
cmol (+) kg ⁻¹							
<u>Perfil Al-I</u>							
Ah	0-15	26,4	32,1	11,8	4,3	0,9	Saturado
AC	15-50	17,8	27,3	9,1	5,0	1,6	Saturado
<u>Perfil Al-II</u>							
Ah	0-5	18,5	28,9	6,8	6,7	0,7	Saturado
C	5-60	12,3	43,7	10,1	3,8	0,5	Saturado
<u>Perfil Al-III</u>							
Ah	0-5	24,7	21,8	15,7	3,2	0,7	Saturado
C	5-35	14,8	27,6	4,4	1,2	1,1	Saturado
<u>Perfil Al-IV</u>							
Ah	0-3	21,3	29,3	11,3	10,2	0,2	Saturado
Ck	3-40	15,7	17,8	3,5	5,2	0,7	Saturado

†CIC= Capacidad de intercambio catiónico

En la Tabla 4 se muestra el contenido en cationes y aniones solubles. Como se puede ver hay un predominio de calcio en todos los suelos analizados, destacando los suelos Al-II y Al-III, donde los contenidos sobrepasan 1 g.Kg⁻¹, llegando casi a 2 g.Kg⁻¹ en el horizonte C del perfil desarrollado sobre materiales sedimentarios del valle del Andarax. Estas concentraciones junto a los altos contenidos en sulfatos nos indican el material sobre el que se han desarrollado estos suelos, predominantemente yesos. También son elevados los contenidos en Mg²⁺ y Na⁺, que junto a las concentraciones

elevadas de Cl procedentes de los materiales margosos miocénicos con abundantes niveles evaporíticos (20), forman sales más solubles que el yeso, como son: NaCl o MgCl₂. Es de destacar la elevada concentración de NO₃⁻ en el perfil Al-III donde los valores están en torno a los 350 mg.kg⁻¹. El incremento tan fuerte de este anión solo se puede explicar por el hecho de que las muestras de suelo están tomadas en la parte baja del pueblo, donde por haber gran cantidad de zonas cultivadas, se hayan acumulado nitratos procedentes del abonado y transportado por las aguas de escorrentía.

Tabla 4. Cationes y aniones solubles de los suelos del entorno del Balneario de San Nicolás.

Horz.	Prf.	Cationes solubles				Aniones solubles			
		K	Na	Mg	Ca	SO ₄	NO ₃	Cl	CO ₃
		mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹			
<u>Perfil Al-I</u>									
Ah	0-15	8,41	63,40	30,10	215,80	43,80	23,04	50,41	150,13
AC	15-50	5,32	45,23	24,92	181,65	52,19	38,43	78,60	147,21
<u>Perfil Al-II</u>									
Ah	0-5	20,15	70,81	176,13	1.743,21	3.3343,21	26,15	103,53	163,04
C	5-60	13,17	60,07	189,35	1.996,00	4.978,57	40,32	86,08	181,23
<u>Perfil Al-III</u>									
Ah	0-5	3,84	899,21	408,60	1.213,80	3.636,05	346,81	2.300,15	90,47
C	5-35	5,86	924,40	515,21	1.545,00	4.542,08	352,86	2.486,09	115,81
<u>Perfil Al-IV</u>									
Ah	0-3	4,20	263,74	136,41	630,26	1.715,59	57,03	760,53	193,80
Ck	3-40	2,11	315,17	181,30	780,50	2.135,19	47,08	640,80	161,27

3.3. Propiedades físicas de los suelos

Los valores de las propiedades físicas de los suelos están reflejados en las Tablas 5, 6 y 7 que nos permitirán analizar la capacidad del suelo para regular la circulación del agua, del aire y la movilidad de constituyentes y organismos, lo cual tiene una gran trascendencia en la contaminación de suelos y acuíferos, en la erosión edáfica, en la recarga subterránea o en el establecimiento del balance hídrico (21).

El tamaño de las partículas minerales que forman los suelos es un parámetro fundamental para analizar la capacidad de retención y de infiltración del agua. Como se puede ver en la Tabla 5 en general presentan estos suelos unas texturas equilibradas sin diferencias significativas a lo largo del perfil. Hay un predominio de los tamaños de partícula más gruesos, las fracciones arena gruesa y arena fina suman en todos los casos más del 50% a lo largo del perfil en los cuatro suelos analizados. Por otro lado, también es de destacar que entre las fracciones finas es la fracción arcilla la mayoritaria. Este hecho tiene una notable influencia en la porosidad, ya que

un tamaño homogéneo en alguna de las fracciones, en este caso en la fracción limo, aumenta el tamaño del poro, resultando menos eficaz el empaquetamiento de las partículas, lo que facilita la penetrabilidad (7).

Tabla 5. Distribución del tamaño de partícula de los suelos del entorno del Balneario de San Nicolás.

Horz.	Prof. cm	Arena gruesa	Arena fina	Limo	Arcilla	Textura
%						
<u>Perfil Al-I</u>						
Ah	0-15	28,4	26,3	15,8	29,5	Franco-arcillo-arenoso
AC	15-50	25,6	30,1	18,6	25,7	Franco-arcillo-arenoso
<u>Perfil Al-II</u>						
Ah	0-5	34,2	21,8	18,4	25,6	Franco-arcillo-arenoso
C	5-60	30,5	23,3	14,5	31,7	Franco-arcilloso
<u>Perfil Al-III</u>						
Ah	0-5	27,5	29,3	19,1	24,1	Franco-arcillo-arenoso
C	5-35	19,5	28,3	20,7	31,5	Franco-arcilloso
<u>Perfil Al-IV</u>						
Ah	0-3	-	-	-	-	-
Ck	3-40	39,4	22,4	18,9	19,3	Franco-arenoso

Los valores observados en el estudio de la densidad aparente y la densidad real muestran cantidades consideradas como habituales en suelos de regiones áridas, no aparecen diferencias significativas a lo largo de los perfiles (Tabla 6). Esto mismo lo podemos observar cuando analizamos los valores de porosidad que oscilan entre 46% y 48%, y son cantidades relativamente elevadas, muy homogéneas. Por tanto, la textura resulta determinante en la porosidad de estos suelos.

En la Tabla 7 se muestran los parámetros hidráulicos que nos permiten analizar la retención de agua en los suelos. Como se puede ver los valores en cada uno de los perfiles son muy similares entre sí y en profundidad, acorde con la textura de estos suelos. No obstante, se aprecian diferencias en los datos de conductividad hidráulica. Otros factores claves de especial significación en la variabilidad de dicho parámetro, son la estructura y contenido en materia orgánica, parámetros que pueden variar a corto y medio plazo (lluvias intensas, cambios en la vegetación, etc., que se presentan en el momento del muestreo). La influencia de la textura es clara en el perfil Al-IV que alcanza el máximo valor de permeabilidad, 0,78 cm h⁻¹ en el horizonte Ck (Tabla 5). La reducción de la permeabilidad se puede atribuir, en los perfiles Al-II y Al-III, a la pérdida de estructura en los horizontes más profundos (Tabla 1) y en horizonte superficial del perfil Al-I, además, al aumento en el contenido en materia orgánica (Tabla 2).

Tabla 6. Parámetros físicos seleccionados de los suelos del entorno del Balneario de San Nicolás.

Horz.	Prof.	Densidad aparente	Densidad real	Porosidad
	cm	g/cm ³		%
<u>Perfil Al-I</u>				
Ah	0-15	1,41	2,71	47,97
AC	15-50	1,44	2,72	47,06
<u>Perfil Al-II</u>				
Ah	0-5	1,43	2,72	47,43
C	5-60	1,40	2,67	47,56
<u>Perfil Al-III</u>				
Ah	0-5	1,45	2,70	47,01
C	5-35	1,42	2,75	48,36
<u>Perfil Al-IV</u>				
Ah	0-3	-	-	-
Ck	3-40	1,53	2,87	46,69

Tabla 7. Parámetros hidráulicos seleccionados de los suelos del entorno del Balneario de san Nicolás.

Horz	Prof.	Punto marchitamiento	Capacidad campo	Agua saturación	Agua disponible	Conductividad hidráulica
	cm	cm ³ agua/cm ³ suelo				cm/h
<u>Perfil Al-I</u>						
Ah	0-15	0,17	0,27	0,48	0,10	0,29
AC	15-50	0,15	0,26	0,47	0,10	0,41
<u>Perfil Al-II</u>						
Ah	0-5	0,15	0,26	0,47	0,10	0,41
C	5-60	0,18	0,28	0,48	0,10	0,24
<u>Perfil Al-III</u>						
Ah	0-5	0,15	0,27	0,48	0,10	0,32
C	5-35	0,18	0,29	0,49	0,11	0,27
<u>Perfil Al-IV</u>						
Ah	0-3	-	-	-	-	-
Ck	3-40	0,13	0,23	0,45	0,10	0,78

3.4. Mineralogía de la fracción menor de 2 mm.

Hemos realizado difracción de RX en muestras en polvo desorientado de los horizontes C de los cuatro suelos estudiados. El resultado de los difractogramas se muestra en la Figura 1. Las reflexiones correspondientes a la presencia de cuarzo,

calcita y dolomita son constantes en todos los perfiles, aunque con intensidades diferentes.

En el perfil Al-I es el cuarzo el principal mineral no laminar por sus reflexiones a 0.42nm, 0.33nm (máxima intensidad) y 0.181 nm. Le sigue en abundancia minerales carbonatados como la calcita por sus reflexiones a 0.30 nm (máxima intensidad), 0.22 nm y 0.187 nm y dolomita con reflexiones a 0.288 nm (máxima intensidad), 0.219 nm y 0.178 nm. La presencia de filosilicatos 2:1 se pone de manifiesto por las reflexiones a 1,01 nm y 0,5 nm posiblemente debidas a la existencia de micas. En menor proporción aparece minerales del grupo de feldespatos por las débiles reflexiones a 0.322 nm (Figura 1a).

La muestra correspondiente al perfil Al-II, evidencia una clara presencia de calcita por sus fuertes reflexiones a 0.303 nm, 0.288 nm y 0.210 nm. La dolomita se pone de manifiesto por sus reflexiones a 0.288 nm y sucesivas. La presencia de yeso se muestra por sus reflexiones a 0.751 nm, 0.426 nm y 0.305 nm. El cuarzo es el mineral silicatado no laminar más abundante (0.33nm y 0.181 nm). Dentro del grupo de minerales filosilicatados, se detecta clorita por encontrar reflexiones a 1.40 nm, 0.70 nm y 0.47 nm; siendo las micas los minerales más abundantes por sus intensas reflexiones a 0,99 nm y 0,33 nm que presentan un alto grado de cristalinidad por la simetría de sus reflexiones (Figura 1b).

La mineralogía de la muestra correspondiente al Perfil Al-III se caracteriza por la presencia de micas por la reflexión a 0,99 nm y sucesivas, como filosilicatos más abundantes de la fracción arcilla. Por las débiles reflexiones a 0.71 nm y 0.356 nm podría tratarse de caolinita. Cuarzo, calcita y dolomita, en menor proporción son los minerales no silicatados que presenta este perfil (Figura 1c).

El difractograma de RX de la muestra analizada del perfil Al-IV, refleja la presencia de micas por la reflexión a 1,01 nm y 0.50 nm dentro del grupo de filosilicatos. El cuarzo es el mineral no laminar más significativo por su intensa reflexión a 0,33 nm y sucesivas, aparece presencia de calcita y posible trazas de dolomita (Figura 1d).

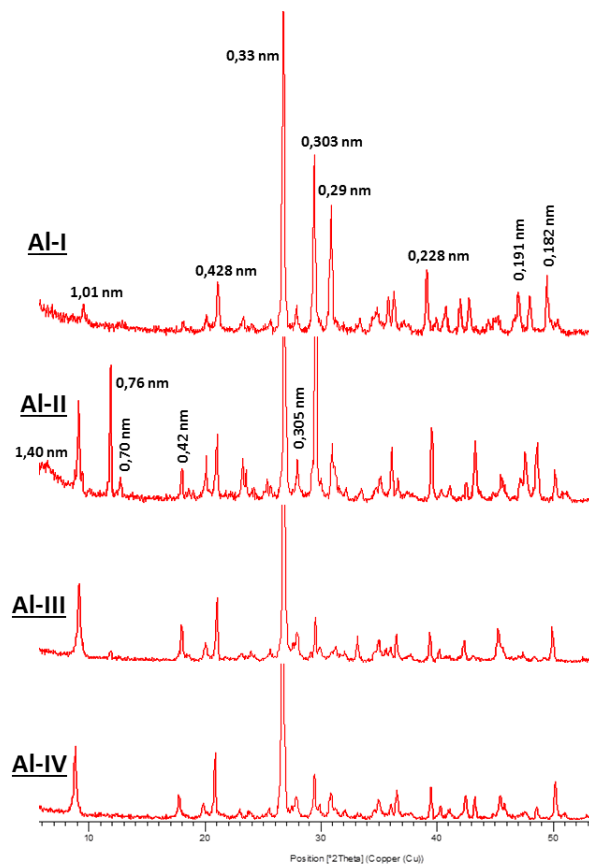


Figura 1. Difractogramas de Rayos-X muestras desorientadas de la fracción tierra fina (Cu α -radiación).

4. CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Los suelos superficiales y poco desarrollados (por ejemplo, Leptosoles, Regosoles y Arenosoles), Calcisoles, Gipsisoles y Solonchaks, cubren la mayor parte del área de estudio, y representan un paisaje único en Europa (22).

En nuestro caso y de acuerdo con la clasificación WRB (23), los suelos estudiados se ha incluido en las unidades Regosoles y Calcisoles.

Al-I: Regosol calcárico. El contenido en materia orgánica es moderado con gran diferencia entre el horizonte Ah y el horizonte AC. La capacidad de cambio presenta valores elevados en horizonte superficial, debido en gran medida a la proporción de arcilla que tiene el horizonte Ah, y el complejo de cambio está saturado en calcio. El pH es ligeramente superior a 8, y el carbonato cálcico está presente a lo largo del perfil con un alto contenido, sin diferencias apreciables entre horizontes. Por tanto, por ser un suelo de escaso desarrollo que no presenta más que un horizonte superficial ócrico, formado a partir de materiales no consolidados, se le incluye dentro de los Regosoles y por ser calcáreos entre los 20 y 50 cm de profundidad se clasifica como Regosol calcárico.

Este tipo de suelo es uno de los más extendidos en la provincia y se asocia a materiales calcáreos no consolidados (margas, margocalizas, derrubios, etc..) en superficies que han sufrido intensos procesos de erosión. Se suelen asociar a Calcisoles, Cambisoles e incluso Gipsisoles. Suelen estar cultivados, bien de olivos en las áreas de textura más fina, o de almendros en las zonas de textura más gruesa y elevada pedregosidad. También son frecuentes áreas de matorral que, al aumentar la altitud, se sustituyen por encinares aclarados y repoblaciones (11, 24).

AI-II: Regosoles gipsíricos. La escasa proporción de materia orgánica en todo el suelo, una capacidad de cambio también baja, a pesar que la proporción en arcilla no es excesivamente baja, presenta una textura franco-arcillo-arenosa en superficie y franco-arcillosa en profundidad. Tiene pH_s de 7,6 y 7,8 en los respectivos horizontes, una conductividad eléctrica $2,5 \text{ dS m}^{-1}$ en el horizonte más profundo, y está desarrollado sobre margas con yeso. En base a esto, son suelos con características de Regosol que al presentar cristales de yeso a partir de los 20 cm, se le clasifica como Regosol gipsílico.

Este tipo de suelo se suelen asociar a Regosoles calcáricos y a otros suelos con horizonte cálcico (Calcisoles arídicos). Suelos estos últimos que están ligados a las áreas más secas de la provincia y presentan una secuencia de horizontes ócricocálcico. Suelen ser poco pedregosos, de textura franca, pobres en materia orgánica y nutrientes, pH en torno a 8, y a veces tienen una conductividad relativamente elevada (alrededor de 4 dS/m), por lo que se pueden ver asociados a Solonchaks (11, 24).

AI-III: Regosoles lépticos El contenido en materia orgánica es moderado en superficie con un brusco descenso en el horizonte más profundo, con una evolución similar en los valores de la capacidad de cambio, relativamente elevada, en el horizonte Ah; el complejo de cambio está saturado en bases, siendo el calcio el catión mayoritario. Los pHs son básicos con valores en torno a 8 y el contenido en carbonato cálcico es elevado a lo largo del perfil. En base a estos datos, presentar un contacto lítico dentro de los primeros 50 cm y pedregosidad elevada, este suelo se le ha clasificado como Regosol léptico.

Este tipo de suelos, son muy pedregosos, con textura de franco-arenosa a arenosa-franca y a veces más fina, con un contenido en materia orgánica de moderado a bajo, relacionado con el piso bioclimático en que se hallen ubicados. El contenido en carbonato cálcico es variable y depende de la roca madre, asociándose con Regosoles calcáricos o eútricos y Leptosoles calcáricos, móllicos o réndzicos, según sea la naturaleza del horizonte A (11, 24).

AI-IV: Calcisol háplico. Caracterizado por un escaso contenido en materia orgánica en superficie, una baja capacidad de cambio, una textura franco arcillo arenosa en el horizonte más profundo, valores de pHs básicos y presencia de

carbonato cálcico con un aumento en profundidad hace que este suelo sea clasificado como Calcisol háplico.

Es una de las unidades taxonómicas más abundantes en la provincia de Almería debido al tipo climático, árido o semiárido, abundancia de zonas carbonatadas lo que favorece la presencia de un horizonte cálcico. Los Calcisoles háplicos pueden presentar morfologías muy variadas en función de la naturaleza del material original. Se suelen asociar a Cambisoles calcáricos en función de la aparición de un horizonte cámbico (11, 24).

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y por la Comunidad de Madrid (CAM) a través del Grupo de Investigación 950605 y la Red CARESOIL, Ref. P2013/MAE-2739.

6. REFERENCIAS

1. Stephen Foster, Hirata Ricardo, Gomes Daniel, D'Elia Mónica, Paris Marta. Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Groundwater Management Advisory Team (CWeMATE) en colaboración con Global Water Partnership co-auspiciado por WHO-PAHO-CEPIS y UNESCO-ROSTLAC-PHI. 2. 2007.
2. Carrillo-Rivera, J.J. Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two semi-arid drainage basins, Mexico. *Hydrogeology Journal* 2000; 8: 503-520.
3. Helena Beatriz, Pardo Rafael, Vega Marisol, Garrado Enrique, Fernández José Manuel, Fernández Luis. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis. *Water Research* 2000; 34-3: 807-816.
4. López-Geta Juan Antonio, Fornés Azcoiti Juan María, Ramos González Gerardo, Villarroya Gil Fermín. *Las Aguas Subterráneas: un recurso natural del subsuelo*. 4ª ed. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. 2009.
5. Foster, S.S.D. Vulnerability of soil and groundwater to pollutions. *Hydrol. Proc. Inf.* 1987; 20 -17: 116-121.
6. Kazakis K., Voudouri S. Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters *Journal Hidrology*. 2015; 525: 13-25.
7. Moreno Merino L., González Huecas C., López Lafuente A. Características edáficas condicionantes de la vulnerabilidad a la contaminación de aguas

- subterráneas situadas bajo Fluvisoles calcáricos. *Boletín Geológico y Minero*. 1995; 106-2: 45-46.
8. Custodio E. Recarga a los acuíferos extensos a partir de la deposición atmosférica de cloruros y de la temperatura del terreno. *Boletín Geológico y Minero*. 2009; 120-4: 631-640.
 9. Espinosa-Martínez. S., Custodio E., Loaso-Vierbücher. Comparación de la recarga natural estimada con el balance de agua en el suelo y con el balance de la deposición atmosférica de cloruro en un sistema carbonatado en el área semiárida del Baix Ebre, Cataluña, España. *C. Ingeniería del Agua*. 2015; 19: 135-155.
 10. Thomas A. Hose Geotourism in Almeria Province, southeast Spain. *TOURISM* 2007; 55- 3: 259-276.
 11. Simón Torres, Mariano. Almería factores formadores y suelos. Mariano Simón Torres (Ed.). 2005.
 12. Instituto Geológico y Minero de España, Mapa Geológico de España, escala 1:50.000. Hoja nº 1044 (Alhama de Almería). Madrid, 1983.
 13. Rivas-Martínez S. Memoria de series de vegetación de España. 1:400.000. ICONA, Madrid, Spain. 1987.
 14. International Soil Reference and Information Center. Procedures for Soil Analysis; 3th. Ed. International Soil Reference and Information Center; Wageningen, 2002.
 15. Walkley A, Black A. A critical examination of rapid methods for determining organic carbon in soils. *Soil Science* 1974; 62: 251-254.
 16. USDA. Guía para la evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. 1999.
 17. Damiano F., Taboada MA. Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 2000; 18 (2): 77-88.
 18. Kern J S. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal* 1995; 59: 1134-1141.
 19. García del Cura María Ángeles, la Iglesia Ángel, Ordóñez Salvador, Sanz-Montero María Esther, Benavente David. Óxidos de Hierro y Manganeso en Travertinos de Alhama de Almería. *Macla* 2008; 9: 107-108.
 20. Sánchez-Martos F., Pulido-Bosch A., Vallejos A., Gisbert J., Molina L. Aspectos hidrogeoquímicos sobre la relación aguas subterráneas-aguas superficiales en el río Andarax (Almería). *Geogaceta* 2005; 37: 91-94.
 21. Martínez Fernández J., Ceballos Barbancho A. Estimación de propiedades hídricas de los suelos mediante el uso de funciones de edafo-transferencia. *Temas de Investigación en Zona no Saturada*. J. J. López, M. Quemada (Eds.). *Actas de las V Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo*. 2001.

22. Juan José Ibáñez, Rufino Pérez-Gómez, Cecilio Oyonarte, Eric C. Brevik. Are there arid land soils in southwestern Europe? *Land Degradation & Development* 2015; 26: 853–862.
23. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. FAO, Roma; 2014.
24. Aguilar Ruiz, José. Proyecto LUCDEME, Mapa de Suelos Escala 1:100.000, Provincia de Almería 2004.