

MONITORIZACIÓN DEL SUELO EN ARROZALES: UN ESTUDIO DE CASO EN EL BAIXO MONDEGO, PORTUGAL

Rosinda Pato^{1,2}, Daniel Chongo³, Filomena Gomes², Sérgio Oliveira¹, José Manuel
Gonçalves^{1,2}

RESUMEN: En la región mediterránea, el arroz se cultiva en 1,3 Mha, en deltas de ríos, estuarios, marismas y llanuras, con riego por inundación en lechos nivelados. En Portugal, la superficie cultivada es de 28.000 ha, siendo el Valle del Baixo Mondego, situado en la costa central de Portugal, una de las zonas más representativas, con cerca de 6.000 ha. El clima es mediterráneo, clasificado como Csb por Köppen, con una precipitación media anual de 800 mm, veranos templados prácticamente sin lluvias e inviernos lluviosos con temperaturas suaves. Los suelos, clasificados como Fluvissoles, son de alta calidad agrícola, de textura pesada, planos, con drenaje deficiente, riesgo de salinización y nivel freático elevado. En la zona arrocería del Valle del Baixo Mondego se está desarrollando un estudio para monitorizar las características del suelo con el fin de realizar una correcta gestión de los nutrientes y aumentar la productividad. Se tomaron muestras compuestas de 0-30 cm y 30-60 cm en seis explotaciones agrícolas representativas del Valle Central y de los Valles Periféricos.

La caracterización físico-química se centró en el análisis granulométrico, conductividad eléctrica, pH, materia orgánica, fósforo y potasio extraíbles, complejo de intercambio, nitrógeno orgánico y mineral, micronutrientes extraíbles, cloruros, arsénico y potencial redox. Los resultados muestran que las características de los suelos dependen de su localización en el Valle del Baixo Mondego. En general, los suelos presentan una textura franca y arcillosa, un pH entre 4,5 y 8,1, niveles medios de materia orgánica, niveles muy elevados de cloruros y sodio de intercambio, que indican un riesgo de salinización, y un complejo de intercambio en el que predominan el Ca^{2+} (71%) y el Mg^{2+} (20%). Aguas abajo, los suelos presentan niveles más elevados de materia orgánica, nitrógeno mineral, fósforo, potasio extraíble y arsénico. El seguimiento de este agroecosistema es esencial para aplicar las mejores prácticas de gestión del suelo y del agua.

PALABRAS CLAVE: Agroecosistema del arroz, drenaje, fertilidad, nutrientes.

¹Escola Superior Agrária de Coimbra, Instituto Politécnico de Coimbra. Bencanta, 3045-601 Coimbra, Portugal

²Centro de Estudos de Recursos Naturais Ambiente e Sociedade (CERNAS). Bencanta, 3045-601 Coimbra, Portugal

³Professor visitante, Instituto Politécnico de Coimbra, Escola Superior Agrária de Coimbra, Bencanta, 3045-601 Coimbra, Portugal

SOIL MONITORING IN RICE FIELDS: A STUDY CASE IN THE LOWER MONDEGO VALLEY, PORTUGAL

ABSTRACT: In the Mediterranean region, rice is grown on 1.3 Mha, in river deltas, estuaries, marshes and plains, and irrigation is practiced by flooding on level beds. In Portugal, the area under cultivation is 28.000 ha, with the Lower Mondego Valley, located on the Centre Coast of Portugal, being one of the most representative areas with around 6.000 ha. The climate is Mediterranean, classified as Csb by Köppen, with an average annual rainfall of 800 mm, temperate summers with practically no rain and rainy winters with mild temperatures. The soils, classified as Fluvissoles, are of high agricultural quality, heavy-textured, flat, with poor drainage, a risk of salinization and a high-water table. In the rice-growing area of the Lower Mondego Valley, a study is being carried out to monitor the soil's characteristics to manage nutrients properly and boost productivity. Composite soil samples were taken from 0-30 cm and 30-60 cm in six plots representing the Central Valley and Peripheral Valleys. Physicochemical characterization focused on granulometric analysis, electrical conductivity, pH, organic matter, extractable phosphorus and potassium, exchange complex, organic and mineral nitrogen, extractable micronutrients, chlorides, arsenic and redox potential. The results show that the characteristics of the soil depend on their location in the Lower Mondego Valley. In general, the soils have a loamy and clayey texture, a pH between 4.5 and 8.1, medium levels of organic matter, very high levels of chlorides and exchange sodium, which indicate a risk of salinization, and an exchange complex where Ca^{2+} (71%) and Mg^{2+} (20%) predominate. Downstream, the soil has higher levels of organic matter, mineral nitrogen, phosphorus, extractable potassium and arsenic. Monitoring this agroecosystem is essential for implementing the best soil and water management practices.

KEYWORDS: Rice agroecosystem, drainage, fertility, nutrients.

INTRODUCCIÓN

El arroz es uno de los cultivos alimentarios más importantes del mundo, siendo el tercer cultivo de cereales después del trigo y el maíz y sirviendo como alimento básico para más de un tercio de la población mundial. La producción media mundial de arroz en las campañas 2020/21 y 2022/23 fue de 523,3 Mt (FAO, 2024) y de 1.435Mt en la Unión Europea en 2023/2024 (0,3% de la producción mundial) (USDA, 2023).

En Portugal, la superficie cultivada es de unas 28.000 hectáreas, con una producción de arroz con cáscara de 160.000 toneladas (media de los últimos 5 años), ocupando el 4º lugar en la Unión Europea, después de Italia, España y Grecia, y es el país europeo con mayor consumo por habitante, alrededor de 18 kg hab. año⁻¹. Se cultiva a lo largo de los estuarios de los ríos Tajo y Sorraia (55% de la superficie), Sado (25% de la superficie) y Mondego (20% de la superficie). En las zonas de regadío del Baixo Mondego, situadas en el centro costero de Portugal, hay 13.000 ha de tierras agrícolas, en las que predominan los cultivos de maíz, arroz y hortalizas. El arroz ocupa un área de 6.000 ha, involucrando a 6.300 agricultores y con una producción de 28.000 t.ano (GONÇALVES et al., 2022; COTARROZ, 2023; INE, 2024).

El sistema de producción de arroz en Portugal está asociado al cultivo en lechos nivelados que se sumergen permanentemente antes de la siembra, manteniendo un nivel de 10 cm durante el ciclo de crecimiento del cultivo, con drenaje antes de la cosecha.

El anegamiento elimina el oxígeno de la rizosfera y provoca cambios en las propiedades químicas del suelo, con un efecto sobre el pH, el potencial redox, la fuerza iónica, la conductividad eléctrica, la disponibilidad de nutrientes y el arsénico. SAHRAWAT (2015) afirma que el potencial redox y el pH son los principales factores que afectan a la fertilidad de los suelos de arroz inundados. En general, el pH de los suelos ácidos aumenta y el de los suelos alcalinos disminuye y tiende a neutro, de 6,6 a 7,5. Hay un aumento de la disponibilidad de fósforo (P), potasio (K), silicio (Si), hierro (Fe), manganeso (Mn) y molibdeno (Mo) y una disminución de la disponibilidad de azufre (S), zinc (Zn) y cobre (Cu) (FAGERIA et al., 2011). En este agroecosistema se produce un aumento de los niveles de arsénico (As) en el suelo y una mayor acumulación en la planta (SOUZA et al., 2014; YANG et al., 2025a).

HAEFELE et al. (2014) señalan que los factores que más afectan a la productividad del suelo en los arrozales son los niveles muy bajos de nutrientes (35,8 Mha), el pH muy bajo (27,1 Mha) y la alta fijación de fósforo (8,1 Mha).

El objetivo de este trabajo es caracterizar la fertilidad físico-química de los suelos arroceros del Valle del Baixo Mondego y evaluar su potencial productivo, para una mejor gestión de los nutrientes y, en consecuencia, contribuir a un mayor rendimiento.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio de la fertilidad del suelo en arrozales se lleva a cabo en el Valle del Baixo Mondego, en la Región Centro de Portugal (NUT III, Región de Coimbra, Figura 1). En esta región, el clima es mediterráneo, Csb en la clasificación de Köppen (KÖPPEN, 1931), con una precipitación media anual de alrededor de 900 mm, veranos templados y suaves e inviernos lluviosos con temperaturas suaves (IPMA, 2025). Los suelos se clasifican mayoritariamente como Fluvissoles (IUSS, 2014).

Las parcelas a monitorizar se seleccionaron buscando la mejor representación de las características edáficas, del entorno del Valle (aguas arriba, tercio medio y aguas abajo - Valle Central y Periférico), del regadío y de las prácticas culturales.

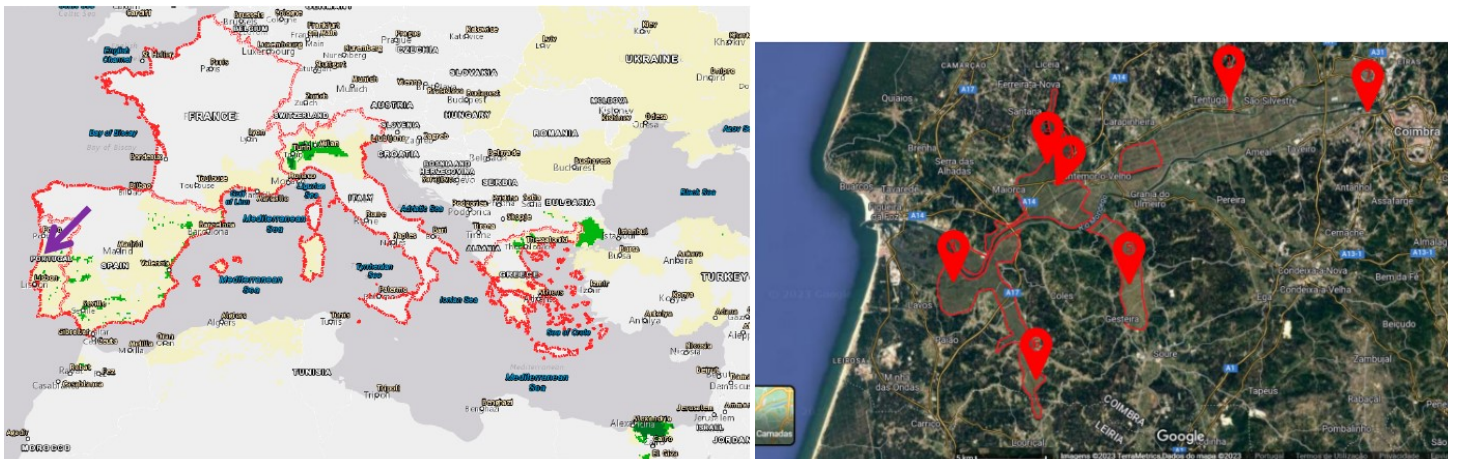


Figura 1. Localización geográfica de: (a) zonas productoras de arroz mediterráneo, delimitadas por una línea roja con los rendimientos respectivos (), 101-1.000 toneladas, (), 1.001-10.000 toneladas, y la zona de estudio en la región Centro (flecha); (b) zonas de estudio en el Valle del Baixo Mondego (fuente: (a) USDA citado por GONÇALVES et al, (2022); (b) Google Maps, <https://maps>, 1. António Marques (AM), 2. Quinta de Foja (QF), 3. Jorge Nobre (JN), 4. Quinta do Canal (QC), 5. Quinta do Seminário - Arunca (QSA), 6. Quinta do Seminário - Pranto (QSP), 7. Campus ESAC.

En 2024, antes de la campaña de cultivo, se tomaron muestras compuestas de suelo (0-30 y 30-60 cm) en seis fincas representativas del Valle: 1 - Montante, Valle periférico derecho, AM2, AM3; 2 - Medio: Valle periférico derecho, QF1, QF2; 3 - Medio: Valle central, JN3, JN5; 4 - Aguas abajo: Valle central, QC1, QC2; 5 - Medio: Valle periférico izquierdo, QSA1, QSA3; 6 - Aguas abajo: Valle periférico izquierdo, QSP2, QSP3, totalizando 24 muestras.

La caracterización físico-química de las muestras de suelo se llevó a cabo mediante el análisis de los siguientes parámetros: análisis granulométrico, conductividad eléctrica (CE),

pH (H₂O), materia orgánica (MO), fósforo (P₂O₅) y potasio (K₂O) extraíbles, complejo de intercambio (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺; SBT; CTC), micronutrientes extraíbles (Cu, Zn, Fe, Mn), cloruros (Cl), arsénico (As) y potencial redox (Eh).

El análisis estadístico se realizó con el programa STATISTICA 12.0. Se evaluó el tipo de distribución de las variables dependientes. Para las variables con una distribución normal (limo, P₂O₅, Ca²⁺, Na⁺, As y Fe), se realizó un análisis de la varianza (ANOVA), seguido de la prueba de Tukey (p<0,05) cuando se observaron diferencias significativas. Para las variables no paramétricas (arena, arcilla, pH-H₂O, CE, MO, N Kj., K₂O, Cl, K⁺, CTC, Eh y Mn), las medias se compararon mediante el test de Kruskal-Wallis. También se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para identificar la relación entre las principales variables. Se analizaron 19 variables para comprender mejor las interacciones entre ellas y su nivel de significación para la varianza total (MILLER & MILLER, 2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización físico-química de las muestras de suelo tomadas en el Valle del Baixo Mondego (N=24) se presenta en la Tabla 1. El análisis de los resultados revela que los suelos presentan textura franco arenosa (AM2) y franco arcillo arenosa (AM3) aguas arriba, y franco (QC1), franco arcillosa (QC2) y arcillosa (QSP2, QSP3) aguas abajo. En la zona central, la textura varía entre franco arenosa, franco limosa, franco arcillosa y arcillosa.

El pH (H₂O) de las muestras presenta valores medios más bajos aguas abajo (4,8 y 5,5, ácido) que aguas arriba (7,3, neutro). En la parte central del Valle, existe una gran variabilidad, desde 5,3 (ácido, QF1, QF2), 7,4 (neutro, JN3, JN5) y 7,9 (ligeramente alcalino, QSA1, QS3). Se señala que estos valores no se encuentran en el intervalo de pH considerado más favorable para el cultivo de arroz, entre 5,5 y 6,5 (VELOSO et al., 2022). KASNO (2021) afirma que el pH del suelo de los arrozales se aproxima normalmente al pH del agua de riego utilizada. En este agroecosistema arrocerero, donde el agua utilizada es extraída del río Mondego y distribuida por el sistema de irrigación, el pH está entre 7,0 y 8,3. Un estudio realizado en 7 granjas del Valle del Baixo Mondego revela que el pH del agua de irrigación procedente de pozos subterráneos varía entre 5,1 y 7,0 (ROCHA et al., 2021).

Los valores de contenido en materia orgánica son significativamente más elevados en el Valle periférico derecho (4,82%) que aguas arriba (1,50%) y en el Valle central medio

(1,71%). Predominan los niveles bajos (1,5%-2,0%) y medios (2,1%-4,0%), debiendo tenerse en cuenta que los niveles <3,5% se consideran un valor crítico por debajo del cual se produce el deterioro de la estructura del suelo (VELOSO et al., 2022).

La conductividad eléctrica mostró valores significativamente más bajos en las parcelas situadas aguas arriba del Valle (0,32mS/cm), en comparación con las parcelas situadas aguas abajo (0,84mS/cm), debido a la menor elevación de estas parcelas (2m sobre el nivel del mar). Los resultados también revelan que los suelos son No-Salinos, porque tienen $\text{pH} < 8.5$, $\text{Na}^+ < 15\%$ y $\text{CE} < 4\text{mS/cm}$ (VELOSO et al., 2022). Sin embargo, cabe destacar que las parcelas de la zona media-central del Valle (QF1, QF2) y las del Valle central-aguas abajo (QC1, QC2) presentan el mayor porcentaje de sodio en el complejo de intercambio (12,3% y 10,5%). Según SINGH et al. 2004 & BABU (1985) citado por MOHAMMADI-NEJAD et al. (2010), las fases menos sensibles a la salinidad son la germinación, el ahijamiento y la maduración, mientras que la fase de plántula, la fase reproductiva inicial, la polinización y la formación de semillas son las más sensibles.

El fósforo extraíble muestra una gran variabilidad en las parcelas estudiadas, con niveles bajos (49 mg kg^{-1}) en la zona media-Valle Periférico Derecho y altos (162 mg kg^{-1}) en la zona media-Valle Central. El potasio extraíble muestra niveles muy elevados ($> 200 \text{ mg kg}^{-1}$) en la zona media-Valle Periférico Derecho y aguas abajo. En el complejo de intercambio predominan el Ca^{2+} ($70,8\% \pm 17,6$) y el Mg^{2+} ($19,8\% \pm 1,7$), mientras que el K^+ representa el 2,3% ($\pm 4,3$) (Tabla 2). Esta relación Ca:Mg:K es similar a la obtenida por KASNO (2021) en llanuras arroceras de Java (70,8:24,5:1,5) y a la reportada por VELOSO et al. (2022) (60-80%: 10-20%: 1-5%). ZALEWSKA et al. (2018) citado por YANG (2024b) encontraron un aumento en la absorción de nutrientes minerales cuando el intercambio total en el suelo fue de 50-60% para Ca^{2+} , 8-20% para Mg^{2+} y 4-10% para K^+ . La relación entre los cationes calcio y magnesio permite evaluar la posible aparición de carencias de magnesio en las plantas. Esto es tanto más relevante cuanto que el arroz es moderadamente sensible a las carencias de este macronutriente secundario (VELOSO et al., 2022). En el Valle del Baixo Mondego, el Ca/Mg varía de muy bajo a bajo en las parcelas QF, QC y QSP ($< 2,6$), con una influencia muy desfavorable en las características físicas del suelo. Por el contrario, los suelos de las parcelas situadas aguas arriba (AM2, AM3) tienen un Ca/Mg muy elevado (> 8 : 24,6-31,7), clasificado como muy desfavorable para la nutrición de magnesio de las plantas. Sólo la parcela QC1, 0-30 cm, tiene un Ca/Mg de 3,5, considerado adecuado (2,6-4,0). En lo que respecta al contenido de arsénico (As), las parcelas situadas aguas abajo en la zona central muestran

niveles significativamente más altos que el resto de parcelas. Según HONMA et al. (2016), la gestión del agua en los arrozales puede ser una estrategia para reducir la absorción de As y Cd manteniendo el Eh del suelo en -73 mV y el pH en 6,2 (YANG et al., 2025a).

La figura 2, análisis de componentes principales (PCA), muestra que el factor 1 (46,17%) tiene una relación directa con la arcilla, el limo, la materia orgánica, el nitrógeno Kj., los cloruros, el sodio de intercambio, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el potencial redox (Eh).

Tabla 1. Valores medios (media±std) relativos a la caracterización del suelo según el encuadramiento de las parcelas de arroz en el Valle del Baixo Mondego.

Encuadramiento cuenca Valle BM	Finca	n	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	pH (H ₂ O)	CE (mS/cm)	M.O (%)	N Kj. (%)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	K ₂ O (mg/kg)
Montante: Valle periférico derecho	AM2, AM3	4	66,65 ± 8,64 ^a	19,93 ± 5,86 ^b	13,42 ± 2,82 ^d	7,3 ± 0,1 ^{abc}	0,32 ± 0,06 ^b	1,50 ± 0,23 ^b	0,11 ± 0,03 ^b	150 ± 40 ^a	78 ± 18 ^c
Medio: Valle periférico derecho	QF1, QF2	4	25,11 ± 4,46 ^a	36,79 ± 5,69 ^{ab}	38,10 ± 5,79 ^{ab}	5,3 ± 0,0 ^{bc}	0,61 ± 0,16 ^{ab}	4,82 ± 0,98 ^a	0,27 ± 0,04 ^a	49 ± 21 ^b	400 ± 109 ^{ab}
Medio: Valle central	JN3, JN5	4	66,92 ± 16,07 ^a	16,64 ± 9,66 ^b	16,44 ± 6,52 ^d	7,4 ± 0,1 ^{ab}	0,50 ± 0,15 ^{ab}	1,71 ± 0,46 ^b	0,12 ± 0,04 ^b	162 ± 10 ^a	120 ± 31 ^{bc}
Medio: Valle periférico izquierdo	QSA1, QSA3	4	27,70 ± 5,84 ^a	36,60 ± 6,24 ^{ab}	35,71 ± 0,91 ^{bc}	7,9 ± 0,1 ^a	0,59 ± 0,08 ^{ab}	2,20 ± 0,74 ^{ab}	0,15 ± 0,03 ^{ab}	37 ± 27 ^b	177 ± 8 ^{abc}
Aguas abajo: Valle central	QC1, QC2	4	26,08 ± 3,89 ^a	26,51 ± 1,02 ^{ab}	47,41 ± 3,47 ^a	5,5 ± 0,3 ^{abc}	0,53 ± 0,17 ^{ab}	2,68 ± 0,44 ^{ab}	0,17 ± 0,03 ^{ab}	131 ± 6 ^a	543 ± 177 ^a
Aguas abajo: Valle periférico izquierdo	QSP2, QSP3	4	27,86 ± 6,72 ^a	44,02 ± 3,30 ^a	28,12 ± 3,76 ^c	4,8 ± 0,2 ^c	0,84 ± 0,02 ^a	2,63 ± 0,26 ^{ab}	0,14 ± 0,02 ^{ab}	63 ± 6 ^b	307 ± 16 ^{abc}
Media general		24	40,05 ± 20,79	30,08 ± 11,32	29,87 ± 12,83	6,4 ± 1,2	0,56 ± 0,19	2,59 ± 1,22	0,16 ± 0,06	99 ± 55	271 ± 184

Encuadramiento cuenca Valle BM	Granja	n	Cl (mg/kg)	Na ⁺ (cmol+/kg)	Ca ²⁺ (cmol+/kg)	CTC (cmol+/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	As (mg/kg)	Eh (mV)
Montante: Valle periférico derecho	AM2, AM3	4	71 ± 21 ^b	0,19 ± 0,08 ^d	10,238 ± 2,51 ^b	11,03 ± 2,89 ^a	478 ± 22 ^c	18 ± 9 ^c	5,53 ± 0,68 ^d	-41,25 ± 11,44 ^{ab}
Medio: Valle periférico derecho	QF1, QF2	4	709 ± 81 ^a	2,64 ± 0,27 ^a	12,725 ± 0,96 ^b	21,75 ± 1,71 ^a	671 ± 69 ^b	47 ± 4 ^{ab}	14,75 ± 1,71 ^b	104,50 ± 13,72 ^a
Medio: Valle central	JN3, JN5	4	136 ± 47 ^{ab}	0,57 ± 0,27 ^{cd}	8,875 ± 3,11 ^{bc}	11,20 ± 4,40 ^a	672 ± 73 ^b	68 ± 23 ^{ab}	7,88 ± 2,20 ^{cd}	-8,75 ± 13,15 ^{ab}
Medio: Valle periférico izquierdo	QSA1, QSA3	4	120 ± 28 ^{ab}	0,59 ± 0,06 ^{cd}	17,475 ± 0,50 ^a	20,25 ± 0,96 ^a	457 ± 40 ^c	234 ± 6 ^a	9,10 ± 0,73 ^{cd}	-63,75 ± 3,10 ^b
Aguas abajo: Valle central	QC1, QC2	4	152 ± 97 ^{ab}	1,10 ± 0,45 ^{bc}	5,630 ± 1,52 ^c	10,38 ± 0,75 ^a	543 ± 55 ^c	34 ± 8 ^{bc}	21,75 ± 3,40 ^a	58,75 ± 19,62 ^{ab}
Aguas abajo: Valle periférico izquierdo	QSP2, QSP3	4	204 ± 60 ^{ab}	1,62 ± 0,21 ^b	11,115 ± 2,04 ^b	20,75 ± 3,77 ^a	897 ± 13 ^a	111 ± 33 ^{ab}	10,05 ± 0,67 ^c	103,78 ± 19,24 ^a
Media general		24	232 ± 228	1,12 ± 0,87	11,01 ± 4,10	15,89 ± 5,72	620 ± 159	85 ± 76	11,51 ± 5,72	25,55 ± 69,80

Notas: Se utilizó la prueba de Tukey para las variables paramétricas (limo, P₂O₅, Ca²⁺, Na⁺, As y Fe);

La prueba de Kruskal-Wallis se utilizó para las variables no paramétricas (arena, arcilla, pH-H₂O, CE, MO, N Kj., K₂O, Cl, K⁺, CTC, Eh y Mn);

Letras distintas en las columnas indican diferencias estadísticamente significativas (p < 0,05) según la prueba de rangos múltiples de Tukey o la prueba de Kruskal-Wallis.

Todas las variables tienen un coeficiente elevado ($>0,70$) y están inversamente relacionadas con el pH, el fósforo extraíble y la arena. El factor 2 (21,15%) muestra la asociación entre el calcio (Ca^{2+}) y el manganeso (Mn) y el factor 3 (11,34%), aunque con un coeficiente $<0,70$, muestra la relación directa entre el limo ($-0,63$) y el arsénico (As) ($-0,64$) e inversa con el hierro ($0,67$). Destaca la asociación directa entre P_2O_5 , pH y arena, siendo los suelos de parcelas con pH neutro los que presentan mayores niveles de fósforo extraíble. Estos resultados se ajustan al diagrama de Truog (1946), pero HARTEMINK & BARROW (2023) afirman que este diagrama representará la disponibilidad de nutrientes en suelos con buena aireación. HORTA & TORRENT (2007) afirman que los factores más importantes en los procesos de sorción/desorción de fosfato son el pH y la concentración de otros iones (ex. Fe y Al) en la solución del suelo. Los estudios han demostrado un efecto inhibidor competitivo entre el fosfato (HPO_4^{2-}) y el As^{5+} en el suelo, lo que concuerda con la Figura 2. Se observa que el HPO_4^{2-} y el As^{5+} entran en las células a través del mismo transportador, interfiriendo el As en el metabolismo del fósforo. Estos elementos también compiten por los mismos sitios de adsorción en las placas de hierro de las raíces (formadas a partir de la oxidación del Fe), actuando como depósito o fuente de estos compuestos, dependiendo de las condiciones físico-químicas del suelo (ISLAM et al., 2021). Por otro lado, los suelos con mayor potencial redox se asocian a suelos con mayor contenido en Fe, lo que coincide con lo indicado por varios autores, y también con menor contenido en As y P_2O_5 (Figura 2) (SOUZA et al., 2015; ISLAM et al., 2021).

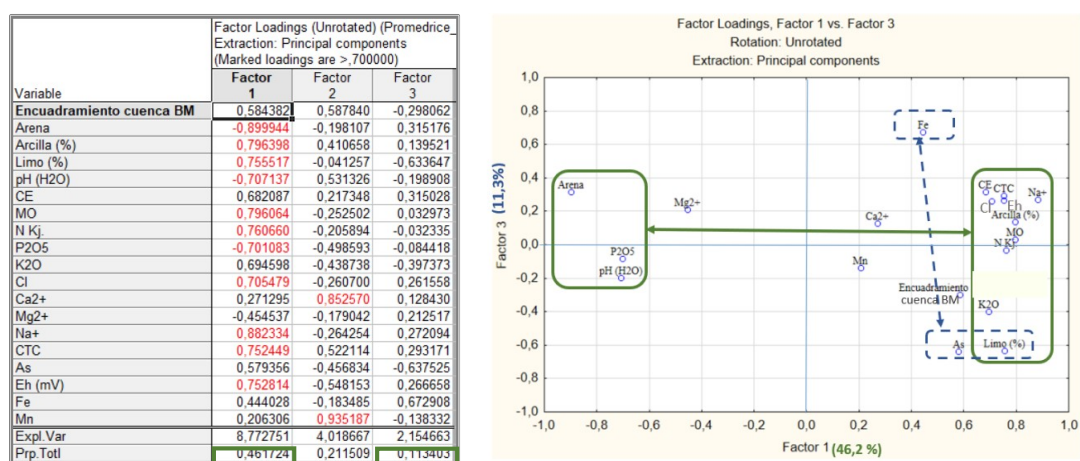


Figura 2. Interacción entre diversos parámetros físico-químicos relacionados con la fertilidad de las parcelas de arroz del Valle del Baixo Mondego mediante el Análisis de Componentes Principales (ACP) (tabla de la izquierda). La figura de la derecha muestra la interacción entre los factores 1 y 3, que explican el 46,2% y el 11,3% de la varianza total observada. En la figura, los factores 1 y 3 se muestran en verde y azul respectivamente (así como sus respectivas líneas) y muestran las variables a las que están asociados, indicando la relación entre ellos (directa o inversa).

CONCLUSÕES

Las características físicas y químicas de los suelos del Baixo Mondego varían en función de su localización en el Valle. En general, son suelos no salinos, pero con niveles muy elevados de cloruro y sodio de intercambio, lo que podría indicar un riesgo de salinización. El pH (H₂O) es neutro aguas arriba, ácido aguas abajo y con gran variabilidad en la zona central, no entrando dentro del rango de pH considerado más favorable para el cultivo (5,5 y 6,5).

Teniendo en cuenta que el pH y el potencial redox son los principales factores que afectan a la fertilidad de los suelos de arroz inundados, es importante monitorizar este agroecosistema para aplicar las mejores prácticas de gestión del suelo y del agua.

Agradecimientos: Los autores agradecen a los propietarios de las fincas por permitir la realización de los estudios de seguimiento de las parcelas. Este trabajo se encuadra en el proyecto PROMEDRICE – “Proteção dos recursos hídricos nos agroecossistemas orizícolas mediterrâneos através de práticas agrícolas eficazes”(www.promedrice.org).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COTARROZ-Centro de competencias do arroz. **Campanha agrícola de 2023**. 16 p., 2024. <https://www.cotarroz.pt/>

FAGERIA, N. K; CARVALHO, G. D.; SANTOS, A. B.; FERREIRA, E. P. B.; KNUPP, A. M. **Chemistry of Lowland Rice Soils and Nutrient Availability**, Communications in **Soil Science and Plant Analysis**, 42:16, p. 1913-1933, 2011. DOI: 10.1080/00103624.2011.591467

FAO - **Food Outlook – Biannual report on global food markets**. Food Outlook.Rome, Italy, 91 p, 2024. ISBN 978-92-5-139327-7 <https://doi.org/10.4060/cd3177en>.

GONÇALVES, J.M.; NUNES, M.; FERREIRA, S.; JORDÃO, A.; PAIXÃO, J.; EUGÉNIO, R.; RUSSO, A.; DAMÁSIO, H.; DUARTE, I.M.; BAHCEVANDZIEV, K. Alternate Wetting and Drying in the Center of Portugal: Effects on Water and Rice

Productivity and Contribution to Development. **Sensors**, 22, p. 3632, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22103632>

HAEFELE, S. M.; NELSON, A.; HIJMANS, R. J. Soil quality and constraints in global rice production, **Geoderma**, Volumes 235-236, 2014, p. 250-259, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.019>.

HARTEMINK, A.E.; BARROW, N.J. Soil pH - nutrient relationships: the diagram. **Plant Soil**, 486, p. 209-215, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>

HORTA, M. C; TORRENT, J. Phosphorus desorption kinetics in relation to phosphorus forms and sorption properties of Portuguese acid soils. **SoilScience** 172(8), p 631-638, 2007. DOI: 10.1097/ss.0b013e3180577270

INE – Instituto Nacional de Estatística. **Estatísticas Agrícolas - 2023**, 2024 https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOE_Spub_boui=439500127&PUBLICACOESmodo=2(consultado el 15 de febrero de 2025)

IPMA-Instituto do Mar e da Atmosfera. disponível online: www.ipma.pt (consultado el 15 de febrero de 2025).

ISLAM, M. S.; MAGID, A. S. I. A.; WENG, Y. C., MA, L., JIE, A., M. Y., KHAN, Z. H., LI, Y., Effect of calcium and iron-enriched biochar on arsenic and cadmium accumulation from soil to rice paddy tissues, **Science of The Total Environment**, Vol. 785, p. 147-163, 2021, ISSN 00489697 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147163>.

IUSS Working Group WRB. **World reference base for soil resources**. Edited by Schad P, van Huyssteen C, Micheli E. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014. 192 p. E ISBN 978-92-5-108370-3 (pdf)

KÖPPEN, W. **Grundriss der Klimakunde**. Walter de Gruyter, Berlin, Germany, 1931, 388 pp.

MILLER, J.N.; MILLER, J.C. **Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry**, 5th ed.; Pearson Education Limited: Edinburgh, Scotland, 2005, ISBN 0-131-29192-0.

MOHAMMADINEZHAD, G.; SINGH, R. K.; ARZANI, A.; REZAEI, A. M., SABOURI; H.; GREGORIO, G. B. Evaluation of salinity tolerance in rice genotypes. **International Journal of Plant Production** 4 (3), July 2010, ISSN: 1735-8043 (Online).

ROCHA, J. L.; OLIVEIRA, V.; FERREIRA, C. D. **Caracterização físico-química de solos e de água de rega em explorações agropecuárias do Baixo Mondego**, Portugal. Projeto SYMBIOSIS - 0340-SYMBIOSIS-3-E. IPC - CERNAS, 2021.

SAHRAWAT, K. L. Redox Potential and pH as Major Drivers of Fertility in Submerged Rice Soils: A Conceptual Framework for Management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46 (13), p. 1597-1606, 2015 <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1043451>

SOUZA, J. M. O.; CARNEIRO, M. F. H.; PAULELLI, A. C. C.; GROTTTO, D.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M.; BARBOSA JÚNIOR, F.; BATISTA, B. L. Arsênio e arroz: Toxicidade, metabolismo e segurança alimentar. *Química Nova*, 38(1), p. 118-127, 2015. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140279>

USDA - US Department of Agriculture - Foreign Agricultural Service. Available online: Rice | USDA Foreign Agricultural Service (consultado el 20 de febrero de 2025).

VELOSO et al. **Manual de fertilização das culturas**. Coordenação: Fátima Calouro. INIAV - Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, I.P, 3ª Edição. 469 p. 2022. ISBN 978-972-579-063-2 (disponível em <https://www.iniaiv.pt/divulgacao/publicacoes-bd/manual-fertilizacao-das-culturas>)

YANG, J.M.; CHEN, H. L.; WANG, X.; GUAN, D. X.; JI, X. H.; XIE, Y. H., HUANG, R.; PENG, B.; QIN, Q.B. Toward safe rice production in As-Cd co-contaminated paddy soils: Biogeochemical mechanisms and remediation strategies, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 55:1, p. 1-24, 2025a. DOI: 10.1080/10643389.2024.2373949

YANG, M.; ZHOU, D.; HANG, H.; CHEN, S.; LIU, H.; SU, J.; LV, H.; JIA, H.; ZHAO, G. Effects of Balancing Exchangeable Cations Ca, Mg, and K on the Growth of Tomato Seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) Based on Increased Soil Cation Exchange Capacity. *Agronomy*, 14, p. 629, 2024b. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>.

ZALEWSKA, M.; NOGALSKA, A.; WIERZBOWSKA, J. Effect of basic cation saturation ratios in soil on yield of annual ryegrass (*Lolium multiflorum* L.). *Journal of Elementology*. 23, p. 95-105. 2018.