

CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE LAS MARISMAS DE LA RÍA DE ORTIGUEIRA EN RELACIÓN CON SU POSICIÓN FISIOGRAFICA Y VEGETACIÓN (GALICIA-NO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA)

X. L. OTERO y F. MACÍAS

Departamento de Edafología e Química Agrícola. Facultad de Biología. Universidade de Santiago de Compostela. Galicia. España

Abstract. Analysis was made of the redox conditions and Fe species present in 8 soil profiles from the Ría de Ortigueira (N Galicia). The soils were from different types of salt marsh (high and low), different physiographical positions and had different types of plant cover. The Fe species considered were: amorphous or poorly crystalline oxyhydroxides of Fe (soluble in ascorbate-citrate), crystalline Fe (soluble in dithionite), pyrite-Fe (soluble in nitric acid), metastable Fe sulfides (Fe-AVS) and residual Fe (soluble in HF). The results indicated large spatial variations and variations with depth in the redox conditions of these soils and therefore in the Fe species present. Oxidic conditions prevailed throughout the high salt marsh soil profiles ($E_h > 300$ mV; profiles 3 and 4) and iron oxyhydroxides dominated. Pyrite-Fe was present at very low concentrations in these soils. In soils with oxidic or suboxidic surface layers and anoxic deeper layers, concentrations of reactive-Fe (amorphous and crystalline oxyhydroxides of Fe) were high in the first 15 cm; below the rhizosphere the levels of amorphous oxyhydroxides of Fe decreased, whereas the amount of pyrite-Fe and therefore the degree of pyritization (DOP), increased significantly. The levels of crystalline oxyhydroxides of Fe also decreased with depth in these soils but more gradually, with high concentrations being maintained under strongly reduced conditions. The distribution of Fe species in the soil from the salt pan was anomalous; levels of pyrite-Fe were higher than those of oxyhydroxides of Fe in the surface layers and the DOP was therefore also high. Paradoxically, the amount of pyrite-Fe decreased significantly at depth and there was an increase in levels of iron oxyhydroxides.

The low salt marsh and channel bottom soil profiles were anoxic throughout. Pyrite-Fe was the most abundant species in these soils; the degree of pyritization for the amorphous or poorly crystalline Fe was close to 100% and for Fe soluble in dithionite it was greater than 60%.

Key words: Potential redox (E_h), Soil classification, FAO, Soil Taxonomy, Fluvisols, Aquents, salt marsh.

Resumen. Se realiza la caracterización general y clasificación de 8 suelos de las marismas de la Ría de Ortigueira. Se trata de suelos formados en diferentes tipos de marismas y seleccionados en función de la fisiografía y tipo de vegetación. Los parámetros físicoquímicos (pH, E_h , C orgánico...) presentan una amplia variabilidad espacial y en profundidad, afectando a las tendencias biogeoquímicas de elementos de gran importancia en la dinámica de las marismas litorales como son el Fe y el S. La concentración de pirita (FeS_2), que oscila entre 0.01 y 3.9 %, está principalmente relacionada con suelos u horizontes con condiciones redox fuertemente reducidas ($E_h < -100$ mV). La presencia de concentraciones altas de sulfuros de Fe, confiere a los suelos una elevada acidez potencial que se pone de manifiesto cuando son sometidos a un proceso oxidativo forzado con peróxido de hidrógeno y, en menor medida, cuando son incubados durante dos meses en condiciones aerobias. En ambos casos, los horizontes sometidos a un

encharcamiento permanente alcanzan valores de pH inferiores a 3.5, lo que pone de manifiesto la presencia de material sulfúrico. Esta propiedad de diagnóstico aparece asociada a los horizontes con un porcentaje de S pirítico superior a 0.75% y libres de carbonatos.

Los suelos estudiados se clasifican como: Typic Sulfaquents, Histic Sulfaquents y Sodic Hydraquents según la (Soil Survey Staff, 1999) y como Fluvisol epigleico-endosódico, Fluvisol prototónico-epigleico, Fluvisol hístico-prototónico y Fluvisol estágnico-endosódico según la clasificación FAO (1998).

Palabras clave: Potencial redox (Eh), Clasificación de suelos, FAO, Fluvisoles, Aquentes, marisma litoral.

INTRODUCCIÓN

Galicia es una de las Comunidades con mayor longitud de costa (~1700 km) y, desde el punto de vista geomorfológico, presenta uno de los litorales más complejos de la Península Ibérica, donde las costas de Ría son su característica más peculiar. En ellas, los procesos de sedimentación dan lugar a la formación de sistemas marismes, los cuales se encuentran asociados principalmente a ensenadas, desembocaduras de ríos y zonas internas de las rías (Fig. 1). Los primeros trabajos de investigación sobre estos suelos se llevaron a cabo bajo la dirección del Prof. Guitián Ojea (1967, 1974). En ellos se señalan sus propiedades básicas (CIC, pH, C orgánico, C/N,...) diferenciando dos grandes grupos de “suelos costeros” en función de la ausencia o presencia de vegetación, denominándolos respectivamente sapropel y marsh, adoptando la clasificación que Kubiena había establecido para los suelos subacuáticos (Kubiena, 1952). Según Guitián *et al.* (1966), los “sapropel” son suelos litorales diariamente inundados por las pleamares que no están colonizados por la vegetación vascular; mientras que en los “marsh” presentan una menor influencia mareal, siendo inundados totalmente sólo por las pleamares vivas lo que permite el establecimiento de una cobertura vegetal permanente. Además de la mayor o menor influencia mareal, el paso de sapropel a marsh implica cambios físicos y geoquímicos importantes en los suelos que afecta especialmente a la materia orgánica, Fe y S, pro-

ceso que ha sido definido como “terrestificación” (soil ripening según los autores holandeses, Pons y Zonneveld, 1965), diferenciándose la siguiente secuencia: sapropel → marsh → gley → vega gleyificada → vega (Guitián *et al.*, 1967). Leirós y Guitián, 1981 y Guitián *et al.*, 1982 encuentran que los marsh presentan un pH más ácido, un mayor grado de humificación de la materia orgánica y un mayor contenido de oxihidróxidos de Fe. Además, considerando los suelos marsh y sapropel conjuntamente, obtienen una correlación inversa entre el Eh y la concentración de S²⁻. Por otra parte, Cabaneiro y Macías (1978) realizan la caracterización mineralógica de la fracción arcilla de suelos de sapropel de Galicia de zonas con diferente entorno geológico encontrando como componentes fundamentales caolinita e illita independientemente del material de partida, junto a cantidades variables de gibbsita y clorita. La presencia de caolinita y gibbsita la relacionan con un origen continental ya que las condiciones termodinámicas de estos ambientes favorecen la neof ormación de minerales 2:1 y la destrucción de la gibbsita (Macías y Calvo, 1988). De igual manera, la mayor cantidad de clorita encontrada en los suelos de las marismas de la Ría de Ortigueira es consecuencia de la riqueza de este mineral en el complejo básico y ultrabásico de la Sierra de A Capelada (Cabaneiro y Macías, 1979).

González *et al.* (1989) realizan un estudio comparativo de las sustancias húmicas presentes en suelos de estuario (Fluvisol eútrico) y suelos no afectados por el agua

marina (Cambisol dístico); encontrando que la influencia marina sobre la materia orgánica afecta a los complejos órgano-metálicos, altera la solubilidad de los ácidos húmicos y fúlvicos en medio alcalino e incrementa el contenido de amonio, mientras que disminu-

yen las hexoaminas y nitrógeno orgánico hidrolizable. Bescansa y Roquero (1990), ponen de manifiesto la presencia de material sulfúrico en estos suelos, cuantifican la concentración de S reducido y establecen cierta relación entre la presencia de material sulfú-

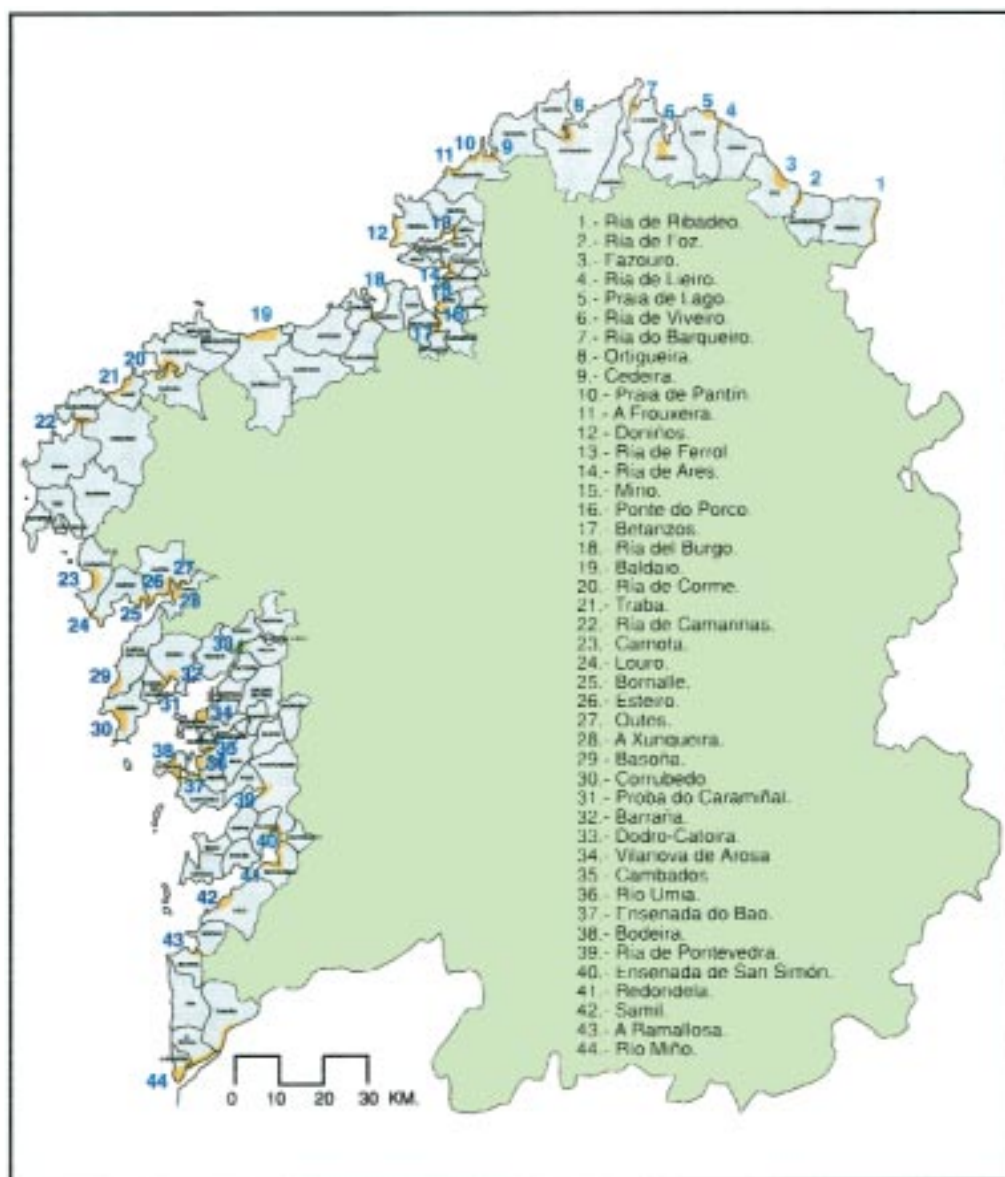


FIGURA 1. Distribución de los principales sistemas de marisma en la costa de Galicia.

rico, la vegetación y la posición fisiográfica. En este trabajo clasificaron los suelos estudiados como Halic Sulfaquents, Typic Sulfaquents y Sulfic Hydraquents según Soil Survey Staff (1975); mientras que Leiros y Guitián (1981) encuentran Fluvisoles dístricos en zonas de sapropel y Fluvisoles éutricos y calcáreos en las áreas de marsh. Más recientemente, en la marisma de Mera (Ría de Ortigueira), se han descrito Fluvisoles tíonicos y sálicos en la marisma alta (marsh) (Sánchez, 1995).

También se han realizado varios estudios acerca de la relación suelo-planta en los medios marismenos gallegos. Así, en 1967 se realizó un estudio de la vegetación de la marisma alta y baja, se establecieron varios complejos de vegetación y se encontró una relación clara entre la evolución física del suelo y la distribución de la vegetación, la cual está influida por la salinidad y velocidad de la corriente (Buurman, 1967). Un estudio más detallado e intensivo fue realizado por Sánchez *et al.* (1998). En este trabajo se llevó a cabo un seguimiento mensual durante año y medio de la altura del manto de inundación así como de la profundidad, salinidad y potencial redox de la capa freática, concluyendo que la distribución de las 7 principales comunidades de vegetación de las marismas de la Ría de Ortigueira están reguladas fundamentalmente por las condiciones redox y la salinidad.

En el presente trabajo se ha llevado a cabo un estudio sobre la variación espacial de las propiedades de los suelos en un sistema de marisma. Para ello hemos seleccionado un número más amplio de perfiles que en los trabajos anteriormente citados, teniendo como criterio el tipo de marisma (alta o baja), posición fisiográfica y cobertura vegetal.

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra situada en el norte de la provincia de A Coruña (Fig. 2).

El entorno geológico de la zona constituye uno de los aspectos más singulares del medio físico, ya que la vertiente oeste y algunos enclaves al este y sur de la Ría forman parte del Complejo básico y ultrabásico de Cabo Ortegal. Se trata de una formación alóctona sobre la que se han llevado a cabo múltiples estudios a fin de establecer su origen (ver p.ej. Girardeau, *et al.*, 1989; Gil y Girardeau, 1991) y que, desde el punto de vista petrológico, presenta una amplia variabilidad de rocas (neises, eclogitas, granulitas, anfibolitas y peridotitas serpentinizadas). Son materiales procedentes del manto o corteza oceánica donde los componentes más antiguos pertenecen al Precámbrico (900 ± 30 m.a., IGME 1977), mientras que los materiales de las unidades estructurales superiores son del Paleozoico inferior y medio (500-420 m.a. Gil y Girardeau, 1991). Además, también están presentes en la parte Este y Sur de la Ría materiales autóctonos (principalmente neises y esquistos) pertenecientes a la unidad denominada Ollo de Sapo.

Las condiciones climáticas se caracterizan por presentar una precipitación media anual que oscila entre 930 mm y 1019 mm concentrándose mayoritariamente en el periodo comprendido entre noviembre y abril (~69 % de la precipitación total). La temperatura media anual registrada en las estaciones meteorológicas de Estaca de Bares y Castropol es de 12.9 °C y 13.9 °C respectivamente. Los registros más bajos se producen en el mes de enero con 8.5 °C y los más elevados en el mes de agosto con 19.7 °C (Carballeira *et al.*, 1983). Esta pequeña diferencia entre estaciones y la elevada capacidad calorífica del agua permiten afirmar que el régimen térmico es de tipo isomésico, siendo ácuico el régimen hídrico (Soil Survey Staff, 1975).

Muestreo de los suelos

Los puntos de muestreo fueron seleccionados intentando recoger los diferentes ambientes geoquímicos presentes en las

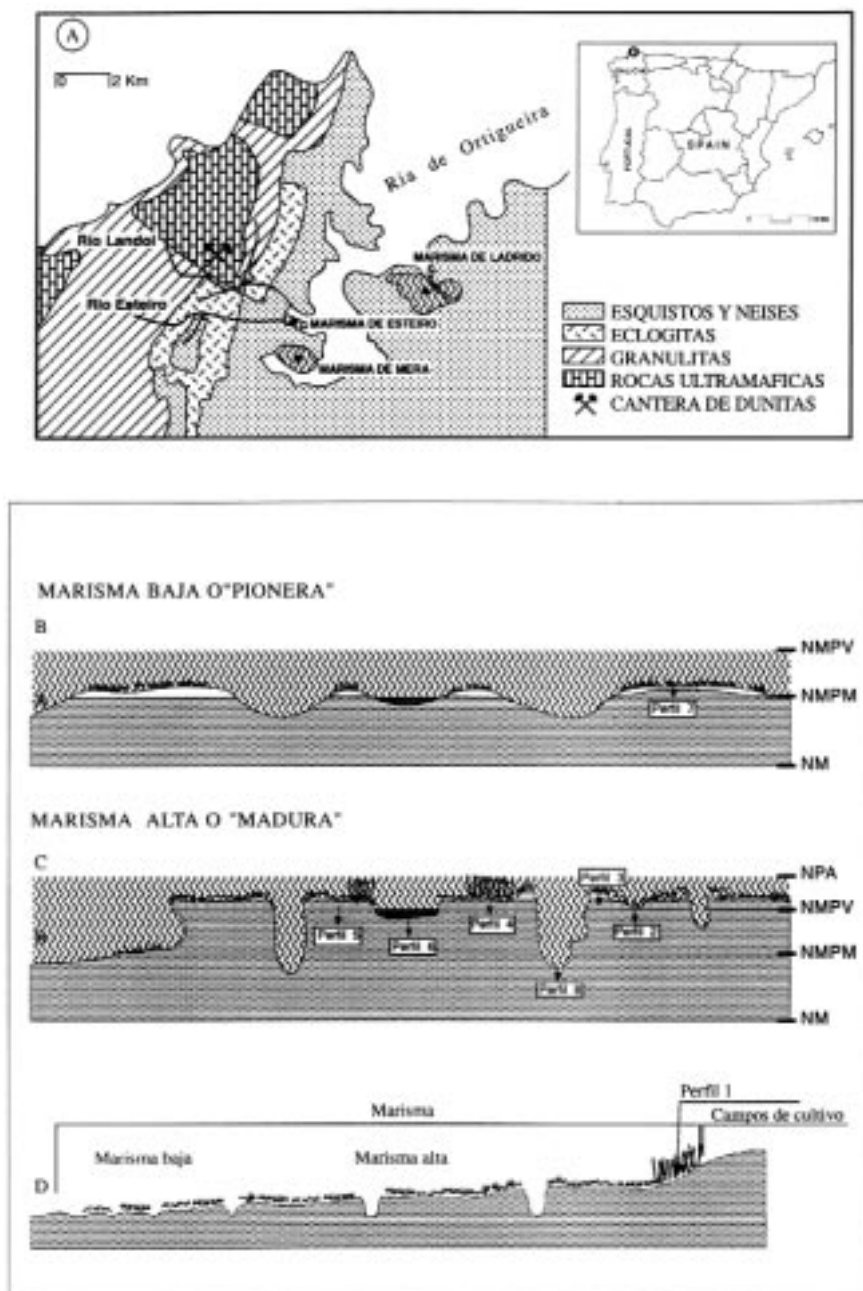


FIGURA 2. A.- Localización y geología del área de estudio- B, C y D.- Posición fisiográfica de los perfiles dentro de la marisma. Los esquemas B y C representan la sección transversal de la marisma; mientras que el esquema D corresponde a una sección longitudinal.

NPA: Nivel de las pleamares astronómicas, NMPV: nivel medio pleamares vivas, NMPM: Nivel medio de las pleamares muertas, NM: Nivel medio.

marismas de la Ría de Ortigueira. Para ello se ha tenido en cuenta la posición fisiográfica, presencia/ausencia de vegetación y tipo de vegetación. En función de estas variables se seleccionaron un total de 8 localidades cuyas principales características se presentan en la Tabla 1. El muestreo se llevó a cabo en marzo de 1996 durante la marea baja. En el campo se realizó una breve descripción del perfil, se identificaron los horizontes y se tomaron muestras de cada uno de ellos en bolsas de plástico. También se recogió una muestra de cada suelo en un tubo de PVC de 11 cm de diámetro interior y 35 cm de longitud. Los

tubos se cerraron herméticamente, se mantuvieron aproximadamente a 4 °C y se transportaron en posición vertical al laboratorio donde fueron congelados a -18 °C. Posteriormente, los suelos fueron cortados en secciones de 5 cm de profundidad y mantenidos congelados hasta su posterior análisis. Por otra parte, en diferentes meses de ese año y en marea baja (enero, marzo, junio, julio y diciembre) se recogieron muestras del horizonte superficial de cada suelo, en las cuales se determinaron en el extracto de pasta saturada cationes, aniones y conductividad eléctrica.

TABLA 1. Posición fisiográfica y tipo de cobertura vegetal en cada perfil

| Perfil | Tipo marisma | Posición fisiográfica | Esp. vegetal dominante |
|----------|--------------|-----------------------|--------------------------|
| Perfil 1 | Marisma | Borde de Marisma | <i>Scirpus maritimus</i> |
| Perfil 2 | alta o | Depresión | <i>Spartina maritima</i> |
| Perfil 3 | madura | Borde canal | <i>H. portulacoides</i> |
| Perfil 4 | | Planicie de marisma | <i>Juncus maritimus</i> |
| Perfil 5 | | Depresión | <i>Spartina maritima</i> |
| Perfil 6 | | Cubeta | Sin vegetación |
| Perfil 7 | Marisma baja | Planicie de marisma | <i>Spartina maritima</i> |
| Perfil 8 | Marisma alta | Fondo de canal | Sin vegetación |

Análisis de los suelos

Las condiciones de pH y Eh se determinaron *in situ* utilizando un aparato Solomat 2000, previa calibración. El valor de Eh fue corregido añadiendo el potencial del electrodo de referencia respecto al electrodo estándar de hidrógeno (244 mV). En base a los resultados obtenidos para el Eh y pH se ha determinado el rH según indica la clasificación FAO (1998). El color del suelo se determinó en húmedo y en seco utilizando la Munsell Soil Color Charts (Munsell Color Co., 1975 y el índice de color se obtuvo según establecen Evans y Franzmeier (1988). El grado de madurez de los horizontes (*soil ripening* según Pons y Zonneveld, 1965) fue determinado en el campo de manera cuantitativa según Dent (1986).

La presencia de material sulfúrico en los suelos se realizó según el método propuesto por van Breemen (1982) y que recoge la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999). La reacción ácida potencial (pH de oxidación) fue determinada por oxidación de la muestra con 30% H₂O₂ a pH 5.5, según el método de Konsten *et al.* (1988). Carbón orgánico y S total se analizaron en un aparato Leco CSN-1000 previa eliminación de los carbonatos con HCl 6N. El extracto de pasta saturada se obtuvo según Rhoades (1982), determinándose la conductividad eléctrica, cationes (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺) y aniones (Cl⁻ y SO₄²⁻). La concentración de Fe pirítico se determinó según el método de Huerta-Díaz y Morse (1990). La muestra se trata con HCl 1N durante 16 h disolviendo el Fe y metales

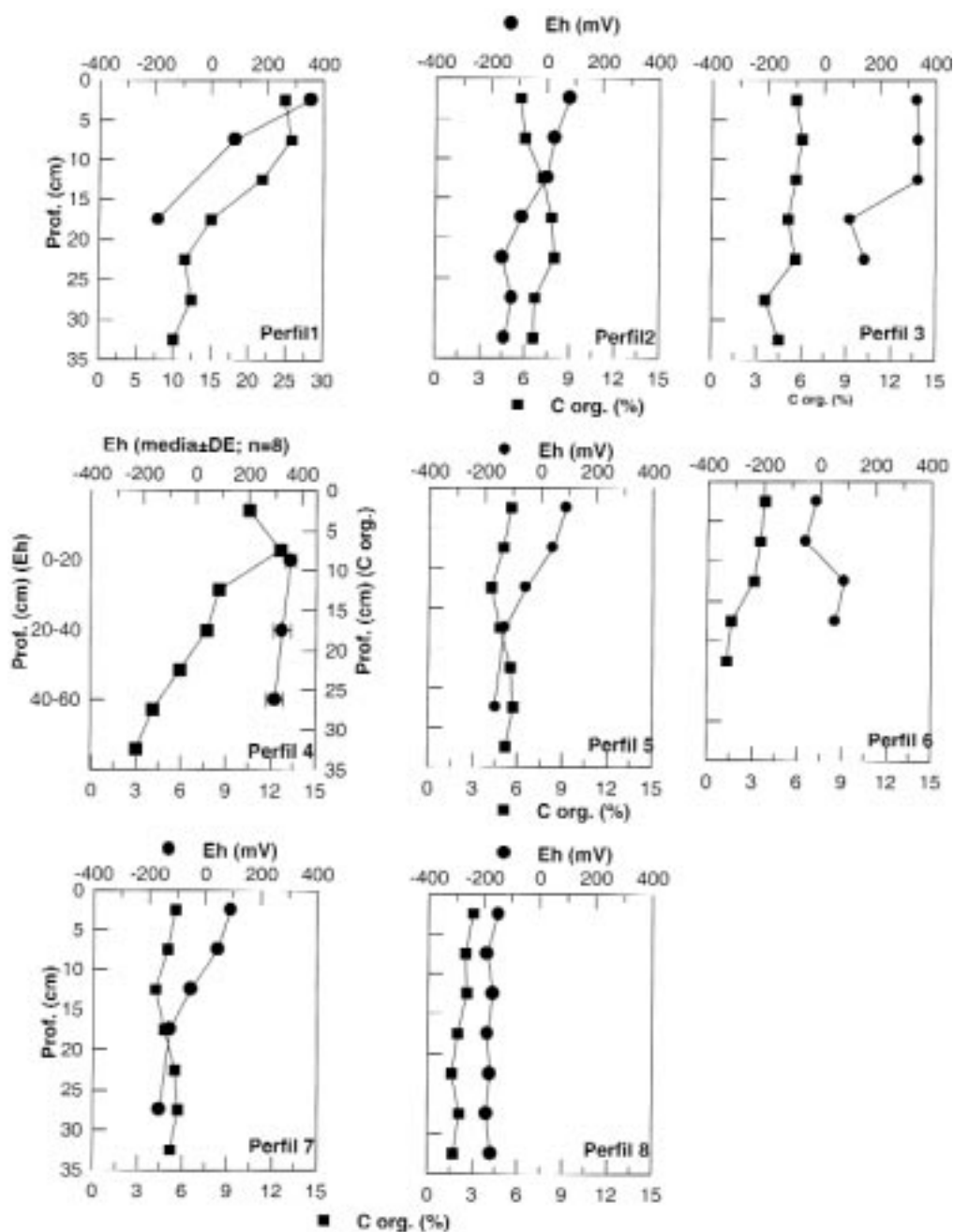


FIGURA 3. Variación espacial y con la profundidad del potencial redox (Eh) y contenido en carbono orgánico.

traza asociados a la fracción AVS, carbonatos y oxihidróxidos amorfos de Fe y Mn. Seguidamente se extrae el Fe asociada a los silicatos con 30 ml de HF 10M durante 16 h en agitación continua y posteriormente se trata la muestra con 10 ml de H₂SO₄ concentrado durante 2 h extrayendo de esta manera el Fe asociado a la materia orgánica. Estas dos últimas fracciones fueron descartadas. Finalmente, se extrae el Fe de la fracción pirítica con 10 ml de HNO₃ concentrado durante 2 h en agitación continua.

El Fe, Ca y Mg fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica y Na y K por espectrofotometría de emisión en un aparato Perkin-Elmer 1100B. La concentración de los aniones fue determinada por cromatografía iónica con un aparato Dionex 4500i. La conductividad eléctrica del extracto de saturación se determinó con un conductímetro Crison CM 2201 previa calibración con una disolución de KCl 0.1N.

La extracción del agua intersticial se realizó a partir de las muestras de los suelos congelados. De cada muestra se extrajeron dos submuestras (~35 ml) de la parte más interna del suelo bajo un flujo de nitrógeno, se introdujeron en botes de 50 ml de polipropileno, se purgaron con nitrógeno durante 1 min. y se cerraron herméticamente. Inmediatamente se centrifugaron a 3000 r.p.m. durante 30 min,

determinándose el pH y conductividad eléctrica. En el agua intersticial de la segunda submuestra se filtró por 0.45 µm y se determinó la concentración de sulfato y cloruro por cromatografía iónica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción general de los perfiles

PERFIL 1: Borde de marisma alta con *Scirpus maritimus*.

Descripción general de la unidad

Se trata de un suelo situado en la parte trasera o borde de la marisma alta, a unos 2 m de los campos de cultivo (Fig. 2). La comunidad de *Scirpus maritimus* (*Scirpetum compacti*) aparece de manera marginal en los bordes de la marisma alta. Estos espacios únicamente son inundados por las pleamares vivas. A pesar de ello, el suelo se encuentra casi siempre encharcado debido al afloramiento de la capa freática, la cual se encuentra a una profundidad de 2.8±4.1 cm (Sánchez *et al.*, 1998) (Fotografías 1 y 2). Esta idea también se apoya en la baja conductividad eléctrica encontrada en ellos (< 5 dS m⁻¹). En la parte más superficial (~2.5 cm de profundidad) las condiciones redox oscilan entre óxicas y subóxicas (Eh~ 200-350 mV), mientras a partir de los 15 cm de profundidad se producen situaciones de anoxia (Eh < 0 mV).

FOTOGRAFIA 1 y 2.- La fotografía 1 muestra una visión general del borde de la marisma, espacio sobre el que se desarrolla *Scirpus maritimus*.



El suelo (perfil 1; Fotog. 2) se caracteriza por presentar un horizonte H hístico y baja concentración de sales, siendo clasificado según la Soil Survey Staff (1999) como Histic Sulfaquents y como Fluvisol hístico-prototónico aplicando los criterios de la FAO (1998)



Descripción morfológica

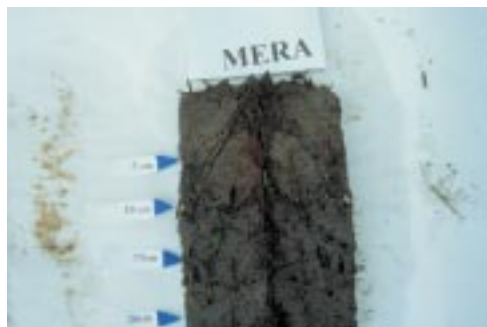
| Horizonte | prof. (cm) | Descripción |
|-----------|------------|---|
| H | 0-20 | Horizonte con abundante restos vegetales de <i>Scirpus maritimus</i> y abundantes raíces y rizomas vivos. Marrón oliva, 2.5 Y 4/4 (h), con moteados rojos, 10YR 4/8 (h), y negros, 5BG 2/1 (h). Fluye fácilmente entre los dedos, prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Límite difuso y ondulado. |
| Cr | +20 | Zona de reducción permanente. Matriz gris oliva, 5Y 4/2 (h). Presencia escasa de raíces finas, prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Plástico y adhesivo. |

PERFIL 2: Depresión en la planicie de la marisma alta colonizado por *Spartina maritima* (forma alta)

Descripción general de la unidad

El perfil 2 procede de una pequeña depresión situada en el interior del juncal halófilo que se encuentra colonizada por formas altas de *Spartina maritima* (42.0 ± 5.9 cm, comunidad *Spartinetum maritimae*) con densidades de 956 ± 93 pies m^2 (Sánchez *et al.* 1997) (Fotografías 3 y 4). Son espacios

mal drenados, encontrándose el suelo saturado en agua durante todo el año ya que la capa freática se encuentra prácticamente en superficie (0.2 ± 0.8 cm; Sánchez *et al.*, 1998). El suelo presenta condiciones subóxicas en superficie transformándose en anóxicas por debajo de 10 cm (Eh: 90 a -166 mV). La conductividad eléctrica es elevada, lo que pone de manifiesto una influencia mareal importante (cond. eléctrica: > 15 dS m^{-1}).



FOTOGRAFÍA 3 y 4.- Pequeñas depresiones que existen en el interior del juncal halófilo presentan un drenaje imperfecto y por consiguiente un encharcamiento en superficie permanente. Estas zonas son colonizadas por *Spartina maritima*, especie que tolera las presencia de concentraciones elevadas de sulfuro en el agua intersticial. La fotografía 4 muestra el aspecto de los suelos de esta unidad (perfil 2). Se trata de un suelo que presenta en superficie condiciones subóxicas y en profundidad (por debajo de los 10 cm) anóxicas. En él se puede observar moteados rojizos como consecuencia del efecto de oxidante de la vegetación sobre el suelo. El suelo fue clasificado como Typic Sulfaquents/Fluvisol prototiónico-endosódico (Fotog. 4).

Descripción morfológica

| Horizonte | prof. (cm) | Descripción |
|-----------|------------|---|
| Ag | 0-10 | Horizonte con abundantes raíces y rizomas vivos de <i>Spartina maritima</i> . Matriz marrón oliva, 2.5 Y 4/4 (h) y gris oscura, 2.5Y 4/1 (s); frecuentes moteados rojo amarillentos, 5YR 5/6 (h) y 5YR 5/8 (s). También presencia de moteados negros, 5BG 2/1 (h) y fuerte olor a sulfhídrico cuando se le añade HCl diluido, lo que indica la presencia de sulfuros de Fe metaestables, tipo mackinawita o greigita. Fluye fácilmente entre los dedos, prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Límite difuso y ondulado. |
| ACg | 10-15 | Pocas raíces finas, matriz marrón oliva, 2.5 Y 4/4 (h), y gris oscuro, 2.5Y 4/1 (s). Moteados rojo oscuro escasos, 5YR 5/6 (h) y 2.5 YR 3/6 (s). Prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Plástico y muy adhesivo. Límite difuso. |
| Cr | >15 | Horizonte fuertemente reducido, gris verdoso, 5Y 4/1 (h) y 5Y 5/1 (s). Frecuentes raíces muertas y muy pocas raíces y rizomas vivos. Prácticamente no maduro (n:1.4-2.). |

PERFIL 3: Borde de canal de la marisma alta con *Halimione portulacoides*

Descripción general de la unidad

Este suelo se sitúa al borde de un gran canal de la marisma alta. Son suelos con buen drenaje, está bien aireado y presenta condiciones redox óxicas, por lo menos en su horizonte superficial (Eh~ 350 mV; profundidad de la capa freática 17.1±13.4 cm; Sánchez *et al.*, 1998). Por debajo de los 25 cm puede presentar condiciones de hidromorfía alternante, con moteados rojizos situados en torno a canales o raíces que se encuentran inmersos en una matriz gris (Eh ~ 100 mV). No pre-

senta material sulfúrico, por lo menos en los 60 cm superficiales, aunque se observó en profundidad moteados negros que indican la presencia de sulfuros de Fe metaestables (Fotografías 5 y 6) (Tabla 2). En las marismas gallegas, los bordes de canal casi siempre aparecen ocupados por *Halimione portulacoides* (comunidad *Bostrychio-Halimionetum portulacoidis*), ya que esta especie no soporta la hidromorfía del suelo por su sensibilidad a la toxicidad del Mn²⁺ y Fe²⁺ (Armstrong *et al.*, 1985; Singer y Havil, 1993; Sánchez *et al.*, 1998).

TABLA 2. Principales características físico-químicas de la fracción sólida

| Horiz. | Prof. (cm) | pH campo | pH incub | pH oxidac | M org.S total -----%----- | | Spirit. | Textura | madurez (n) |
|--|---------------|-------------|-------------|--------------|------------------------------|-----|---------|--------------------|----------------|
| PERFIL 1: Borde marisma alta con <i>Scirpus maritimus</i> | | | | | | | | | |
| Hg | 0-20 | 6.4 | 5.8 | 5.4 | 38.0 | 2.2 | 0.93 | Arcillo-limosa | 1.4-2 |
| Cr | >20 | 6.4 | 3.2 | 2.5 | 19.7 | 2.8 | 0.90 | Franco-arc.-limosa | 1.4-2 |
| PERFIL 2: Depresión marisma alta con <i>Spartina maritima</i> (forma alta) | | | | | | | | | |
| Ag | 0-10 | 6.6 | 4.7 | 5.6 | 12.9 | 0.5 | 0.23 | Franco-arc.-limosa | 1.4-2 |
| ACg | 10-15 | 6.4 | 3.6 | 2.9 | 16.0 | 2.4 | 1.65 | Franco-arc.-limosa | 1.4-2 |
| Cr | >15 | 6.5 | 3.1 | 2.8 | 13.1 | 2.3 | 1.46 | Franco-arc.-limosa | 1.4-2 |
| PERFIL 3: Borde canal de marisma alta con <i>Halimione portulacoides</i> | | | | | | | | | |
| Ag | 0-25 | 5.5 | 5.2 | 5.0 | 9.9 | 0.3 | 0.04 | Franco-limosa | 1.4-2 |
| Cg | >25 | 6.8 | 5.8 | 2.6 | 6.3 | 0.5 | 0.04 | Franco-limosa | 1.4-2 |
| PERFIL 4: Planicie de marisma alta con <i>Juncus maritimus</i> | | | | | | | | | |
| Ag | 0-17 | 5.8 | 5.6 | 5.0 | 17.1 | 0.3 | 0.01 | Franco-arc.-limosa | 0.4-0.7 |
| 2Cg | 17-40 | 6.0 | 5.6 | 2.2 | 9.8 | 0.3 | 0.01 | Franco-arc.-limosa | 1.4-2 |
| 3Cr | >40 | 6.5 | 5.5 | 2.2 | 14.6 | 0.4 | nd | Franco-arc.-limosa | 1.4-2 |
| PERFIL 5: Depresión marisma alta con <i>Spartina maritima</i> (forma baja) | | | | | | | | | |
| Ag | 0-10 | 6.3 | 6.5 | 5.4 | 9.2 | 0.5 | 0.10 | Franco-arc.-limosa | 1-1.4 |
| 2Cg | 10-25 | 6.3 | 4.7 | 2.9 | 8.4 | 0.7 | 0.60 | Franco-limosa | 1.4-2 |
| 3Cg | >25 | 6.6 | 3.3 | 2.5 | 9.9 | 2.1 | 0.80 | Franco-arc.-limosa | 1.4-2 |
| PERFIL 6: Cubeta marisma alta, sin vegetación | | | | | | | | | |
| Ar | 0-10 | 6.6 | 6.1 | 2.7 | 6.4 | 0.9 | 0.58 | Franco-arc.-limosa | >2 |
| Cg | 10-25 | 6.7 | 6.3 | 4.7 | 2.4 | 0.1 | 0.04 | Arcillosa | 1-1.4 |
| PERFIL 7: Planicie de marisma baja con <i>Spartina maritima</i> (forma alta) | | | | | | | | | |
| Ag | 0-10 | 6.6 | 2.8 | 2.8 | 9.4 | 3.0 | 2.07 | Franco-arc.-limosa | >2 |
| Cr | 10-25 | 6.7 | 2.6 | 2.3 | 7.0 | 3.2 | 1.54 | Franco-arc.-limosa | 1-1.4 |
| 2Cr | >25 | 6.5 | 2.7 | 2.4 | 6.4 | 2.9 | 0.85 | Franca | 0.7-1 |
| PERFIL 8: Fondo canal marisma alta, sin vegetación | | | | | | | | | |
| Ag | 0-12 | 7.4 | 5.1 | 2.9 | 5.2 | 1.0 | 1.06 | Franco-arc.-limosa | >2 |
| Cr | >12 | 7.1 | 5.9 | 2.3 | 4.4 | 1.5 | 1.32 | Franco-arc.-limosa | 1-1.4 |



FOTOGRAFÍA 5 y 6 – Los suelos de los bordes de canal se caracterizan por presentar al menos en superficie buen drenaje y aireación. En estas condiciones se desarrolla *Halimione portulacoides* ya que es un especie muy sensible a la toxicidad por Mn^{2+} o Fe^{2+} . El suelo fue clasificado como Sodic Hydraquents/Fluvisol epigleico-endosódico (Fotog. 6).

Descripción morfológica

| Horizonte | prof. (cm) | Descripción |
|-----------|------------|---|
| Ag | 0-25 | Horizonte con abundantes raíces finas y gruesas. Matriz marrón 7.5 YR 5/4 (h) y 7.5YR 3/2 (s). Moteados rojos 2.5 YR 3/6 (h) y 2.5 YR 5/8 (s). Fluye fácilmente entre los dedos, prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Muy adherente y plástico. Límite gradual y ondulado. |
| Cg | >25 | Raíces finas poco frecuentes. Matriz oliva oscura, 5 Y 4/4 (h), y gris, 2.5Y 6/1 (s). Moteados negro azulados, 5BG 2/1 (h) y rojo oscuros abundantes, 2.5 YR 4/8 (h) y 2.5YR 3/6 (s). Prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Plástico y adherente. |

PERFIL 4: Planicie de marisma alta con juncal halófilo (*Limonio serotini-Juncetum maritimi*)

Descripción general de la unidad

Corresponde a un suelo sobre el que se desarrolla el juncal halófilo, que constituye la comunidad que ocupa la mayor parte de la superficie de las marisma alta (Fotografía 7).

Los suelos sobre los que se asienta se caracterizan por estar bien aireados en superficie y presentar en los 20 cm superficiales una gran densidad de rizomas y raíces que le confieren condiciones óxicas (Eh ~400 mV; Fig. 4). En profundidad, presentan condiciones de hidromorfía alternante con abundantes moteados rojos en una matriz gris.

FOTOGRAFÍA 7.- El perfil 4 representa a un suelo característico de la planicie mareal dominada por el juncal halófilo (*Limonio-Juncetum maritimi*). Presenta condiciones óxicas en la mayor parte del perfil. En profundidad se pueden observar una matriz grisácea con abundantes moteados rojizos que ponen de manifiesto rasgos redoximórficos. El suelo fue clasificado como Sodic Hydraquents/Fluvisol epigleico-endosódico.



Descripción morfológica

| Horizonte | prof. (cm) | Descripción |
|-----------|------------|--|
| Ag | 0-17 | Horizonte con abundantes raíces finas y rizomas. Matriz marrón amarillenta, 10YR 4/5 (h) y 10YR 5/4 (s). Pegajoso, no fluye fácilmente entre los dedos, maduro (n: 0.4-0.7). Límite gradual y ondulado. |
| Cg | 17-40 | Raíces finas poco frecuentes. Matriz gris oscura, 5 Y 4/1 (h), y gris, 2.5Y 6/1 (s), con moteados rojos abundantes, 10R 3/6 (h) y 2.5YR 3/6 (s). Prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Plástico y adherente. Límite gradual. |
| Cr | +40 | Ausencia de rizomas y raíces vivas. Restos vegetales muertos. Matriz gris, 5Y 6/1 (h), pocos moteados rojos 10R 3/5 (h). Prácticamente no maduro (n: 1.4-2). |

PERFIL 5: Depresión en la marisma alta colonizado por *Spartina maritima* (forma baja)

Descripción general de la unidad

El perfil 5 se encuentra en una depresión, a unos 5 metros de un canal de la marisma de Ladrado. Se trata de una zona mal drenada con encharcamiento en superficie y rodeado por el juncal halófilo (Fotografías 8 y 9). Situación similar a la del perfil 2; sin embargo, en este caso la unidad se encuentra colonizada por formas bajas de *S. maritima*

(22.3 ± 5.4 cm), con densidades de pies significativamente más elevadas (1603 ± 286 pies m⁻²) (Sánchez *et al.*, 1997). Las condiciones redox ponen de manifiesto un ambiente anóxico ya en el horizonte superficial, con valores de Eh inferiores a 0 mV. En la parte superior del suelo son comunes los moteados. Sin embargo, también aparecen abundantes moteados rojos que ponen de manifiesto microambientes con condiciones óxicas o subóxicas.



FOTOGRAFÍA 8 y 9.- Aspecto de la unidad de sobre la que se desarrollan formas bajas de *Spartina maritima* en la marisma de Ladrado (Fotog. 8). El perfil 5, representa una situación biogeoquímica similar a la del perfil 2. Aunque en superficie ya es anóxico, presenta en el horizonte superficial moteados rojizos que evidencian microsistemas oxidantes asociados a edafotúbulos. El suelo fue clasificado como Typic Sulfaquents/Fluvisol prototónico-endosódico (Fotog. 9).

Descripción morfológica

| Horizonte | prof. (cm) | Descripción |
|-----------|------------|---|
| Ag | 0-10 | Horizonte con abundantes rizomas y raíces. Matriz gris oliva, 5Y 4/2(h), con moteados de color rojo, 2.5 YR 4/8 (h), y negro, 5BG 2/1 (h). Fluye fácilmente entre los dedos, prácticamente no maduro (n: 1-1.4). Plástico y adherente. Límite difuso. |
| Cg | 10-25 | Raíces finas, pocos rizomas y edafotúbulos. Matriz gris oscura, 5 Y 3/2(h), moteados rojo oscuros, 2.5 YR 4/8 (h) y 2.5YR 3/6 (s). Prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Límite difuso. |
| Cg | +25 | Raíces finas poco frecuentes, ausencia de rizomas. Abundantes restos vegetales muertos. Matriz gris, 5 Y 5/1 (h), con moteados rojo oscuros 2.5 YR 4/8 (h) y 2.5YR 3/6 (s). Prácticamente no maduro (n: 1.4-2). |

PERFIL 6: Cubeta en la marisma alta, sin vegetación

Descripción general de la unidad

En estas marismas las cubetas son de tamaño reducido (~10 m²), permanentemente inundadas y sin colonizar por plantas vasculares (Fotografías 10 y 11). Su origen es incierto. Según Long y Mason (1983) las cubetas pueden formarse durante los procesos de colonización vegetal de zonas desnudas de la marisma. En este caso, las plantas dejan zonas sin colonizar que habitualmente

corresponden a ligeras depresiones. Cuando esto sucede, después de una pleamar viva, el agua queda retenida en la cubeta permaneciendo encharcada permanentemente lo que dificulta su posterior colonización. También, a partir de los canales de la marisma se puede formar una cubeta por derrumbe de sus paredes, dando origen a un dique que impide su drenaje. Los principales limitantes para la vegetación vascular son: la elevada salinidad y suelos anóxicos con concentraciones elevadas de sulfuros (Long y Mason, 1983).



FOTOGRAFÍA 10 y 11. La fotografía 10 muestra una cubeta de la marisma alta. Las cubetas son depresiones de la marisma sin colonizar por plantas vasculares y permanentemente inundadas. El suelo se caracterizó por presentar una situación de las condiciones redox invertida. En superficie es anóxico con una matriz gris y abundantes moteados negros que corresponden a sulfuros de Fe metaestables (principalmente mackinawita y greigita). Además la pirita fue la forma de Fe más abundante. Por el contrario, en profundidad (por debajo de los 15 cm) presentó una matriz grisácea con abundantes moteados rojos, y la concentración de sulfuros metálicos resultó muy reducida. Este suelo fue clasificado como Sodic Hydraquents/Fluvisol estagnico-endosódico.

Descripción morfológica

| Horizonte | prof. (cm) | Descripción |
|-----------|------------|--|
| Ar | 0-10 | Horizonte con una matriz color gris verdoso oscuro, 10Y 4/1 (h) y gris, 5Y 5/1 (s). Moteados negros, 5BG 2/1 (h). Escurre entre los dedos, no maduro (n > 2). Límite claro y ondulado. |
| Cg | 10-25 | Abundantes moteados rojo amarillentos, 5YR 4/6 (h) y 5YR 5/4 (s). Matriz gris oscura, 5Y 4/1 (h). Fluye fácilmente entre los dedos, prácticamente no maduro (n: 1-1.4). |

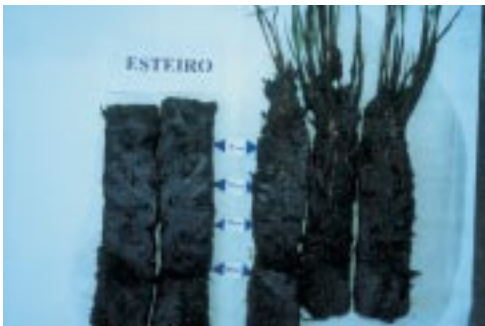
PERFIL 7: Planicie mareal de la marisma baja colonizada por *Spartina maritima* (forma alta)

Descripción general de la unidad

El perfil 7 corresponde a una zona de marisma baja, con una altura inferior al nivel medio de las pleamares muertas (263-273 cm



s.n.m.; Sánchez *et al.* 1997). Se trata, por tanto, de un medio que es inundado por todo tipo de pleamares (Fotografía 12). El suelo presenta condiciones fuertemente reducidas con un color negro verdoso, con moteados rojizos asociados a la zona radicular (Fotografías 13 y 14). Está colonizado por formas altas de *Spartina maritima* (37.8±7.4 cm), que se presenta con una densidad de pies significativamente inferior a la del perfil 2 (471±131 pies m²) (Sánchez *et al.*, 1997). La biomasa subterránea es también muy inferior a la encontrada en los otros dos suelos con *Spartina* (perfiles 2 y 5), lo que indica que se trata de una colonización incipiente (Otero 2000).



FOTOGRAFÍA 12, 13 y 14.- En la fotografía 12 se puede observar como el manto mareal inunda totalmente los suelos de la marisma baja colonizados por *S. maritima*. La inundación se produce dos veces por día y durante un tiempo prolongado. Además en bajar el suelo permanece encharcado en superficie. En estas condiciones los suelos son fuertemente anóxicos y la forma dominante de Fe es la pirita. Las fotografías 13 y 14, muestran el efecto de las raíces sobre el suelo en la marisma baja. En la fotografía 11 se presenta a modo comparativo el aspecto del sedimento sin colonizar por *Spartina maritima* y cuando este es colonizado (perfil 7). El suelo ha sido clasificado como Typic Sulfaquents/Fluvisol prototiónico-endosódico.

Descripción morfológica

| Horizonte | prof. (cm) | Descripción |
|-----------|------------|---|
| Ag | 0-10 | Horizonte con presencia de rizomas y raíces. Matriz color negro 5BG 2/1 (h) y gris 5Y 5/1 (s). Moteados rojos, 2.5 YR 3/6 (h) y 2.5 YR 5/8 (s), asociados a la presencia de raíces. Olor a sulfhídrico. Escurre entre los dedos, totalmente inmaduro (n>2). |

| | | |
|-----|-------|---|
| Cr1 | 10-25 | Ausencia de rizomas vivos y muy pocas raíces finas. Matriz color negro 5BG 2/1 (h) y gris verdosa, 10Y 5/1 (s). Ausencia de moteados. Fluye con facilidad entre los dedos (n: 1-1.4). |
| Cr2 | 25-35 | Ausencia de rizomas y raíces vivas. Matriz gris oscura 5BG 2/1 (h), sin moteados. Abundantes arenas de cuarzo. Prácticamente maduro (n: 0.7-1). |

PERFIL 8: Fondo de canal de la marisma alta, sin vegetación.

Descripción general de la unidad

Los canales de la marisma alta constituyen las vías de entrada y salida del flujo mareal, encontrándose inundados diariamente durante un prolongado periodo de tiempo. Incluso en bajamar el fondo del canal permanece saturado en agua. Las condiciones bio-

geoquímicas de estos suelos son similares a los que se encuentran en la marisma baja, presentando unas condiciones redox fuertemente reducidas ($Eh < -100$ mV). El perfil presenta un color homogéneo, negro o gris oscuro, excepto en los 5 cm superficiales donde pueden aparecer moteados rojizos asociados a los canales generados por poliquetos (Fotografías 15 y 16).



FOTOGRAFÍA 15 y 16. Aspecto del suelo de fondo de canal de la marisma alta. Se trata de suelo con condiciones fuertemente reducidas en todo el perfil y, por tanto con elevadas concentraciones de sulfuros metálicos. La actividad de la fauna del suelo (poliquetos) puede generar la oxidación de estos sulfuros que en marismas contaminadas con metales traza puede suponer su liberación e incremento de su biodisponibilidad (Otero *et al.* 2000). El suelo ha sido clasificado como Typic Sulfaquents/Fluvisol prototónico-endosódico.

Descripción morfológica

| Horizonte | prof. (cm) | Descripción |
|-----------|------------|--|
| Ag | 0-5 | Horizonte con una matriz de color negra, 5 BG 2/1 (h), canales recubiertos de color rojizo, 2.5YR 4/8 (h). Fluye muy fácilmente entre los dedos. Totalmente inmaduro (n >2). Presencia de trozos de conchas. |
| Cr | >10 | Horizonte de color negro, 5 BG 2/1 (h), más compacto que el anterior, sin edafotúbulos, adhesivo. Fluye por entre los dedos, prácticamente inmaduro (n: 1-1.2). Presencia de trozos de conchas. |

Características fisicoquímicas de los suelos

Textura y color

La composición textural se encuentra dominada por la fracción limo con porcentajes que oscilan entre 47% y 71.2%, seguida de la arcilla (16.6-64%) y la arena (3.5-30%), siendo las clases texturales dominantes la franco-arcillo-limosa y franco-limosa (Tabla 2). En algunos de los suelos se ha puesto de manifiesto discontinuidades en profundidad, posiblemente debido a un cambio en los procesos de sedimentación (Kostka y Luther, 1994).

En cuanto al color, en la marisma alta los horizontes superficiales presentaron una amplia variación. Se han descrito colores marrón amarillento (10YR 4/5) en suelos bien aireados en superficie (p.ej. perfil 3 y 4), marrón oliva (2.5Y 4/4) en medios subóxicos en los cuales el Fe puede encontrarse tanto en forma reducida como oxidada (p. ej. suelo 2) y gris oliva (5Y 4/2) con moteados negros (5BG 2/1) y rojos (2.5 YR 4/8) que corresponden a horizontes con condiciones redox fuertemente reducidas y microambientes óxicos (p. ej. suelo 5). En profundidad, la situación es más homogénea dominando, colores claros (2.5 o 5Y) y generalmente con intensidad ≤ 2 (p.ej. gris, 5Y 6/1; gris oliva, 5Y 4/2; gris verdoso, 10Y 4/1 y marrón oliva, 2.5 Y 4/4) que es característico de horizontes con condiciones ácuicas, fuertemente reducidos (ver p.ej., Vepraskas y Wilding, 1983; Dorronsoro *et al.* 1988; Stoops y Eswaran, 1985; Megonigal *et al.* 1993); y que está de acuerdo con los valores obtenidos para el Eh (Fig. 3).

Los moteados son un rasgo morfológico común en la mayoría de los horizontes superficiales y, en algunos casos, también en profundidad (p. ej. perfil 5 y 6). En líneas generales se identifican dos tipos de moteados: moteados rojizos (10YR 4/8, 5YR 5/6, 2.5 YR 5/8) y negros (5BG 2/1). El perfil 6 presentó un patrón inverso en cuanto a la distri-

bución de los colores con la profundidad. Así, el horizonte superficial mostró un color gris verdoso oscuro (10Y 4/1), con moteados negros (5BG 2/1), mientras que el horizonte subsuperficial se caracterizó por mostrar una gran abundancia de moteados rojo amarillento (5YR 4/6) en una matriz gris oscura (5Y 4/1).

En la marisma baja (perfil 7) y canales de la marisma alta (Perfil 8), la matriz mostró un color negro (5BG 2/1) con algunos moteados rojizos asociados a edafotúbulos.

Condiciones redox

La figura 3 muestra la variación de las condiciones redox con la profundidad para cada perfil. Los valores más elevados se encontraron en el perfil 4 (planicie mareal) que presentó condiciones óxicas ($E_h > 300$ mV) en todo el perfil. Una situación similar se obtuvo en el perfil 3 (borde de canal), mientras que en los restantes el E_h fue en general inferior a 100 mV, correspondiendo los valores más bajos al perfil 8 (fondo de canal) donde el potencial redox fue siempre inferior a -100 mV.

Los resultados obtenidos para el rH presentaron también un amplio rango de variación, oscilando entre 24.7 y 5.3 (Fig. 4). Todos los suelos, excepto el perfil 4, presentaron al menos algún horizonte con un rH inferior a 19, lo que indica que una sección de los mismos se encuentra saturada en agua durante tiempo suficiente para permitir la reducción y segregación del hierro según establece la clasificación FAO (1998). Además, se ha encontrado una buena correlación entre el rH y el índice de color ($r_s = 0.623$, $p = 0.003$, $n = 20$; Fig. 4), lo que pone de manifiesto una estrecha relación entre la morfología y las condiciones de aireación de los suelos.

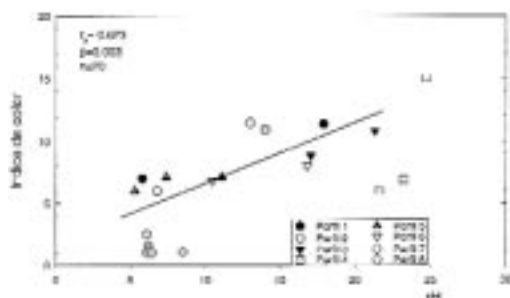


FIGURA 4. Relación entre las condiciones redox (rH) y el color del suelo.

Reacción del suelo y acidez potencial

El pH de campo osciló en la mayor parte de los casos entre 6 y 7 (Tabla 2). No obstante, cuando la muestra es incubada durante dos meses en condiciones aerobias el pH experimenta un descenso que pone de manifiesto importantes diferencias tanto entre suelos como entre horizontes de un mismo suelo, oscilando entre una disminución inferior a una unidad de pH (p.ej perfil 3 y 4) hasta valores inferiores a 3.5 (p.ej. perfiles 1, 2, 7). Sin embargo, la reacción ácida potencial (pH de oxidación) supuso una caída mucho más brusca y generalizada del pH, de manera que prácticamente todos los horizontes subsuperficiales presentaron valores inferiores a 3, mientras que en superficie mostraron valores especialmente bajos los perfiles 6, 7, 8 (Fig. 5). Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por otros autores que al drenar un suelo potencialmente sulfato ácido y tras un periodo de 70 días sólo obtuvieron la oxidación de un 0.038% (peso húmedo) de la piritita, estimando necesario un periodo superior a los 10 años para su total oxidación (2.086% peso húmedo) (Ritsema y Groenenberg, 1993). Esta lenta cinética de oxidación puede ser consecuencia de la precipitación de oxihidróxidos de Fe (principalmente ferrihidrita) en torno a los cristales de piritita cuando la oxidación ocurre a un pH superior 4 (Ritsema y Groenenberg, 1993; Zhang y Evangelou, 1996). En nuestro caso, los resultado obteni-

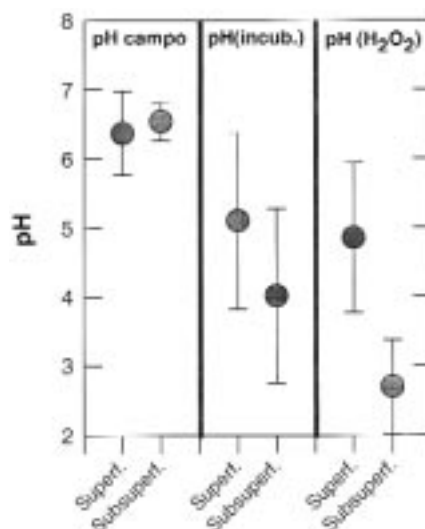


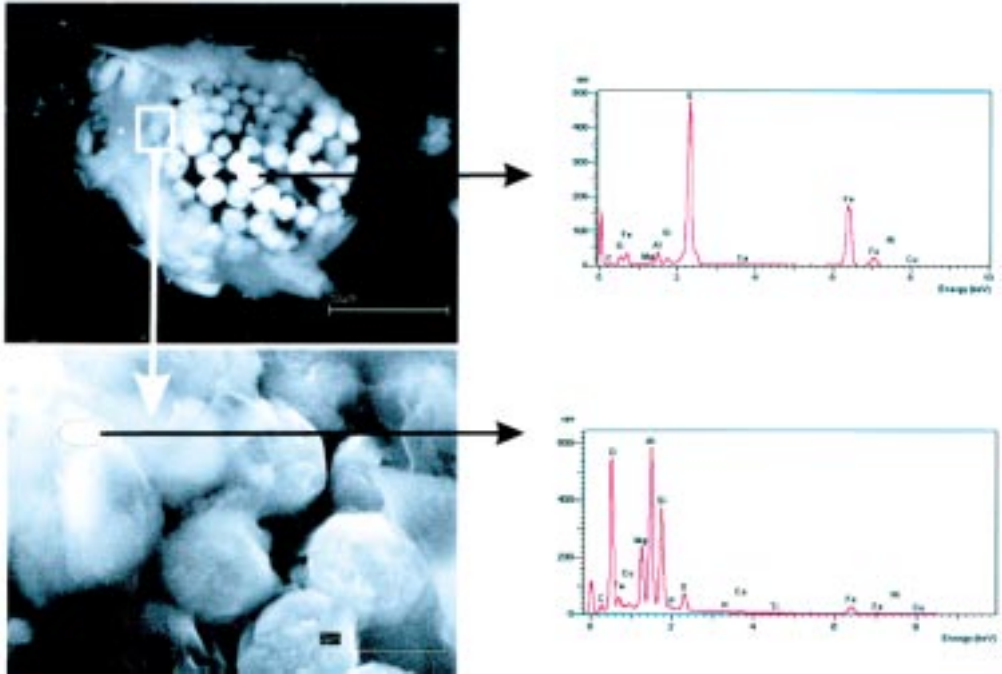
FIGURA 5. Variación del pH de campo, de incubación y oxidación en horizontes superficiales y subsuperficiales (media±D.E.).

dos por microscopía electrónica (SEM) han puesto de manifiesto en las pirititas framboidales recubrimientos constituidos por aluminio, oxígeno y silicio que podrían actuar como freno a su oxidación (Fotografía 16).

Por otra parte, la caída brusca del pH cuando la muestra es oxidada con H₂O₂, incluso en suelos con cantidades muy reducidas de sulfuros de Fe (Otero, 2000), puede estar relacionada también con la ausencia de carbonatos (excepto en el caso del perfil 8) y la baja capacidad de los minerales de la arcilla para neutralizar la acidez derivada de la oxidación de la piritita y de la materia orgánica. De hecho, el mineral dominante en la fracción arcilla en suelos y sedimentos de las rías gallegas es la caolinita (Cabaneiro y Macías, 1978; Macías y Calvo 1988), la cual presenta una reducida capacidad de neutralización de la acidez por su reducida CIC.

Carbono orgánico y S total

Los valores más elevados de C orgánico correspondieron a los suelos de marisma colonizados por plantas vasculares (Tabla 2),



FOTOGRAFÍA 16.- Microfotografía de una pirita framboidal con recubrimiento rico en sílice.

destacando los porcentajes obtenidos para la zona sobre la que se desarrolla la especie *Scirpus maritimus* (perfil 1) con un 38% de materia orgánica en el horizonte superficial. Las concentraciones más bajas correspondieron a los horizontes subsuperficiales de los suelos no colonizados por la vegetación (perfil 6 y 8) con valores inferiores al 3%. En la mayoría de los perfiles se ha encontrado una disminución irregular del C orgánico con la profundidad, tal y como corresponde a su carácter fluvéntico (Fig. 3).

El porcentaje de S total osciló entre 0.1% y 3.2% (Tabla 2). Los resultados muestran que las concentraciones de S más elevadas no se corresponden exactamente con las concentraciones más altas de C orgánico. Así, suelos con concentraciones relativamente bajas de materia orgánica presentaron porcentajes muy elevados de S total, como el perfil 7 (S total: 3.2-2.9%; mat. org.: 9.4-6.4%) o el

perfil 8 (mat. org. 5.2-4.4 y S total: 1 y 1.5%). Estos resultados indican que en estos suelos la concentración de S es independiente de la de C y se produce por la acumulación de formas inorgánicas de azufre debido a los procesos de reducción del sulfato.

Salinidad, conductividad eléctrica y porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

En todos los casos el catión dominante fue el sodio, seguido del magnesio, calcio y potasio, mientras que el cloruro fue el anión más abundante (Tabla 3). La conductividad eléctrica y PSI más bajos se obtuvieron en el perfil 1 (cond. elect. 3.9 ± 4.1 ; PSI: 8.76 ± 8.9 ; Tabla 3), que corresponde a un suelo salino según la clasificación establecida por Richards (1954). Los restantes suelos presentaron una conductividad superior a 4 dS m^{-1} y un PSI muy superior al 15%, lo que indica que se trata de suelos salino-alcalinios (Richards, 1954).

Caracterización físico-química del agua intersticial

En general, la conductividad eléctrica fue elevada, superando en la mayor parte de los casos los 15 dS m⁻¹. Sin embargo, se ha encontrado una gran variabilidad espacial, oscilando entre 0.8 dS m⁻¹ del perfil 1 a más de 50 dS m⁻¹ del perfil 6 (Tabla 4). Esta variabilidad se explica por la gran heterogeneidad de combinaciones posibles entre la inundación mareal, la precipitación y la evapotranspiración (Beefink, 1977) y la influencia de los niveles freáticos y aguas flu-

viales. En cuanto a la variación espacial del pH, los resultados muestran que en la mayor parte de los casos oscila dentro de un estrecho intervalo comprendido entre 7 y 8. Valores que fueron ligeramente superiores al pH del suelo realizado *in situ* (Tablas 2 y 4).

Un aspecto de especial interés en los suelos de marisma es la reducción del sulfato. En medios anóxicos una buena parte de la respiración microbiana utiliza como aceptor de electrones el sulfato según la reacción 1 (Howarth, 1984).



Cuando esto ocurre el sulfato del agua intersticial es consumido y la relación SO₄/Cl pasa a ser inferior a la del agua de mar (Giblin, 1988) (SO₄/Cl del agua de la Ría de Ortigueira = 0.14; Otero, 2000). Valores inferiores a 0.14 se han encontrado en la mayor parte de los horizontes subsuperficiales y especialmente en el perfil 7 de la marisma baja, con un valor para esta relación de 0.08 en el horizonte Cr (Tabla 4). Como producto final de la reducción del sulfato se genera la pirita (FeS₂), motivo por el cual algunos horizontes con bajo contenido en C orgánico pueden presentar en cambio un contenido elevado de S total.

Clasificación de los suelos

Atendiendo a los resultados obtenidos para los suelos estudiados, los principales horizontes y propiedades de diagnóstico identificados fueron: presencia de horizonte H hístico (perfil 1), propiedades ácuicas (*rasgos redoximorfos*), material sulfúrico y valores de madurez n > 0.7, según la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999). Por otra parte, aplicando los criterios de la FAO (1998), habría que añadir a las anteriores: propiedades gleicas y flúvicas. Según la Soil Taxonomy, todos los suelos pertenecen al suborden Aquents, como consecuencia de sus condiciones reductoras, su bajo grado de madurez y presencia de material sulfúrico. Esta última propiedad se puso de manifiesto

TABLA 3. Concentración de cationes, aniones, conductividad eléctrica y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (media±desviación típica) de los horizontes superficiales

| Perfil | Ca | Mg | Na | K | Cl | SO ₄ | pH | C.E. | PSI |
|----------|----------------------|----------|----------|----------|----------|-----------------|-----|--------------------|----------|
| | cmol l ⁻¹ | | | | | | | dS m ⁻¹ | % |
| Perfil 1 | 12.2±9.8 | 16.6±10 | 28.7±27 | 1.22±0.6 | 383±30 | 36.6±38.0 | 7.6 | 3.9±4.1 | 8.7±8.9 |
| Perfil 2 | 23.8±8.8 | 60.3±18 | 559±169 | 15.6±6.5 | 818±212 | 201±114 | 7.7 | 15.3±3.3 | 55.3±5.1 |
| Perfil 3 | 5.4±4.1 | 26.0±17 | 186±52 | 3.90±1.7 | 39.7±10 | 278±112 | 7.0 | 6.70±4.5 | 39.7±10 |
| Perfil 4 | 13.2±4.4 | 34.9±19 | 361±71 | 8.30±1.2 | 52.4±3.2 | 501±107 | 7.6 | 14.1±4.9 | 52.4±3.2 |
| Perfil 5 | 25.6±9.0 | 66.4±5.0 | 597±127 | 17.6±5.4 | 55.8±4.1 | 785±214 | 6.9 | 16.3±2.1 | 55.8±4.1 |
| Perfil 6 | 26.0±13 | 67.5±4.4 | 491±110 | 12.8±3.8 | 633±198 | 131±62 | 7.4 | 17.0±1.4 | 50.6±5.4 |
| Perfil 7 | 35.1±11 | 56.1±14 | 430±159 | 10.4±3.4 | 570±222 | 116±50 | 7.4 | 12.8±4.4 | 47.0±7.6 |
| Perfil 8 | 37.7±3.7 | 66.8±2.8 | 504±33.4 | 11.6±1.8 | 677±40.0 | 157±70 | 7.4 | 11.2±1.4 | 50.4±1.4 |

en los perfiles 1, 2, 5 y 7 y está de acuerdo con la idea de que el material sulfúrico va asociado a porcentajes de S pirítico superiores a 0.75% valor que, según van Breemen, (1982), representa la capacidad de neutralización de la acidez generada por la oxidación de los sulfuros por parte de los minerales de

la fracción arcilla y cationes de intercambio. Estos suelos fueron clasificados como Typic Sulfaquents (Soil Survey Staff, 1999), Fluvisoles prototiónico-endosódico según la FAO (1998); excepto en el caso del perfil 1, que al presentar un horizonte H hístico, fue clasificado como Histic Sulfaquents

TABLA 4. Características físico-químicas del agua intersticial

| Horiz. | Prof. (cm) | pH | C. eléctrica dS m ⁻¹ | SO ₄ ⁻ . ----- mg l ⁻¹ ----- | Cl ⁻¹ | SO ₄ ⁻ /Cl |
|--|------------|-----|---------------------------------|--|------------------|----------------------------------|
| PERFIL 1: Borde marisma alta con <i>Scirpus maritimus</i> | | | | | | |
| H | 0-20 | 7.6 | 0.82 | 148 | 166 | 0.89 |
| Cr | >20 | 7.4 | 3.50 | 276 | 662 | 0.41 |
| PERFIL 2: Depresión marisma alta con <i>Spartina maritima</i> (forma alta) | | | | | | |
| Ag | 0-10 | 7.6 | 29.9 | 1243 | 9490 | 0.13 |
| ACg | 10-15 | - | - | - | - | - |
| Cr | >15 | 7.5 | 48.3 | 1760 | 17931 | 0.10 |
| PERFIL 3: Borde canal de marisma alta con <i>Halimione portulacoides</i> | | | | | | |
| Ag | 0-25 | 7.0 | 15.5 | 713 | 4512 | 0.16 |
| Cg | >25 | 6.8 | 6.20 | 2624 | 22320 | 0.12 |
| PERFIL 4: Planicie de marisma alta con <i>Juncus maritimus</i> | | | | | | |
| Ag | 0-17 | 7.6 | 19.8 | 904 | 5506 | 0.16 |
| Cg | 17-40 | - | - | - | - | - |
| Cr | >40 | 6.6 | - | 2740 | 20992 | 0.13 |
| PERFIL 5: Depresión marisma alta con <i>Spartina maritima</i> (forma baja) | | | | | | |
| Ag | 0-10 | 7.0 | 34.6 | 1335 | 11197 | 0.12 |
| Cg | 10-25 | - | - | - | - | - |
| Cg | >25 | 7.0 | 44.8 | 1906 | 16631 | 0.11 |
| PERFIL 6: Cubeta marisma alta, sin vegetación | | | | | | |
| Ar | 0-10 | 7.4 | 54.1 | 1840 | - | - |
| Cg | 10-25 | 7.4 | 12.3 | 1735 | - | - |
| PERFIL 7: Planicie de marisma baja con <i>Spartina maritima</i> (forma alta) | | | | | | |
| Ag | 0-10 | 7.4 | 40.2 | 1610 | 1910 | 0.11 |
| Cr1 | 10-25 | - | - | - | - | - |
| Cr2 | >25 | 7.5 | 21.7 | 957 | 957 | 0.08 |
| PERFIL 8: Fondo canal marisma alta, sin vegetación | | | | | | |
| Ag | 0-12 | 7.3 | 26.1 | 1052 | 7884 | 0.13 |
| Cr | >12 | 7.9 | 31.1 | 1190 | 9898 | 0.12 |

(Fluvisol hístico-prototiónico). En el caso del perfil 8 (fondo de canal) a pesar de presentar cantidades elevadas de S pirítico (S pirítico > 1%; Tabla 2) el pH se mantuvo por encima de 5, debido a la presencia de conchas en el perfil que incrementa la capacidad de neu-

tralización de ácidos del suelo impidiendo su acidificación por oxidación. Este perfil, así como el 4, 5, y 6 fueron clasificados como Sodic Hydraquents (Fluvisol epigleico-endosódico los perfiles 4,5 y Fluvisol estágnico-endosódico el perfil 6) (Tabla 5).

TABLA 5. Clasificación de los suelos

| Perfil | Soil Taxonomy (1999) | FAO (1998) |
|--------|----------------------|----------------------------------|
| 1 | Histic Sulfaquents | Fluvisol hístico-prototiónico |
| 2 | Typic Sulfaquents | Fluvisol prototiónico-endosódico |
| 3 | Sodic Hidraquents | Fluvisol epigleico-endosódico |
| 4 | Typic Hidraquents | Fluvisol epigleico-endosódico |
| 5 | Typic Sulfaquents | Fluvisol prototiónico-endosódico |
| 6 | Sodic Hidraquents | Fluvisol estágnico-endosódico |
| 7 | Typic Sulfaquents | Fluvisol prototiónico-endosódico |
| 8 | Sodic Hidraquents | Fluvisol epigleico-endosódico |

REFERENCIAS

- Armstrong, W, Wright, E.J., Lythe, S. y Gaynard, T.J. (1995): Plant zonation and the spring-neap tidal cycle on soil aeration in a Humber salt marsh. *J. Ecol.* 7: 323-339.
- Beefink, W. G. (1977): The coastal salt marshes of western and northern Europe: An ecological and phytosociological approach. En V.J. Capman (ed), *Wet Coastal Ecosystem*, Elsevier, Amsterdam, 109-155.
- Bescansa, P. y Roquero, C. (1990): Characterization and classification of tidal marsh soils and plant communities in North-west Spain. *Catena*: 17: 347-355.
- Buurman, P. (1967): Relaciones entre suelo y vegetación de unas rías de la España occidental. Departamento de Geología, Suelo y Agricultura. Universidad de Wageningen. Holanda.
- Cabaneiro, A. y Macías, F (1978): Mineralogía de las arcillas en sapropelas en Galicia. *Trabajos Compostelanos de Biología* 7: 87-101.
- Carballeira, A.; Devesa, C.; Retuerto, R.; Santillán, E. y Uceda, F. (1983): *Bioclimatología de Galicia*. Fundación P. Barrié de la Maza. A Coruña.
- Dent, D. (1986): Acid sulphate soils: A baseline for research and development. Int. Inst. Land Reclam. and Improvement (IILRI). Publ. 39. Wageningen
- Evans, C.V. y Franzmeier, D.P. (1988): Color index values to represent wetness and aeration in some Indiana soils. *Geoderma* 41: 353-368.
- FAO (1998): World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resource Report 85. Roma
- Gee, G.W., y Bauder, J.W. (1986): Particle-size analysis. En A Klute (Ed) *Methods of Soil Analysis Part 1.-Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Inc., Soils Science Society of America. Madison-Wisconsin, USA, 383-411.
- Giblin, A.E. (1988): Pyrite formation in marshes during diagenesis. *Geomicrobiol. J.* 6: 77-97.

- Gil, J.I. y Girardeau, J. (1991): El Complejo de Cabo Ortegal. *Investigación y Ciencia* 180:6-14.
- Girardeau, J.; J.I. Gil y N.B. Jamaa (1989): Evidence for a heterogeneous Upper Mantle in the Cabo Ortegal Complex, Spain. *Science* 245: 1231-1233.
- González, S.J., Lista, M., Carballas, M., y Carballas, T (1989): Humic substances in a catena of estuarine soils: Distribution of organic nitrogen and carbon. *Sci. Total Environ.* 81/82: 363-372.
- Guitián Ojea, F. y Muñoz Taboadela, M. (1966): Estudio agrobiológico de la provincia de La Coruña. Instituto Nacional de Edafología y Agrobiología "José M^a Albareda" del C.S.I.C., Instituto de Investigaciones Geológicas y Agrobiológicas de Galicia. Santiago de Compostela.
- Guitián Ojea, F (1974): Itinerarios de los suelos en Galicia. Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela.
- Guitián Ojea, F., Carballas, T. y Muñoz Taboadela, M. (1982): Suelos naturales de la provincia de Lugo. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia. Santiago de Compostela.
- Howarth, R.W. (1984): The ecological significance of sulfur in the energy of salt marsh and coastal marine sediments. *Biogeochem.* 1: 5-27.
- Huerta-Díaz, M.A y Morse, J.W. (1990): A quantitative method for determination of trace metal concentrations in sedimentary pyrite. *Mar. Chem.* 29:119-144.
- IGME (1977): Mapa geológico de España. Hoja de Cariño (1:50.000) n° 1(6-2).
- Konsten, C.J.M., Adriesse, W. y Brinkman, R. (1988): A field laboratory method to determine total potential and actual acidity in acid sulphate soils. *In Selected Papers of the Dakar Symposium on Acid Sulphate Soils.* Internacional Institute for Land Reclamation and Improvement. 44: 106-134, Wageningen.
- Kostka, J.E. y Luther III, G.W. (1995): Seasonal cycling of Fe in saltmarsh sediments. *Biogeochem.* 29: 159-181.
- Kubiena, W.L. (1952): Claves sistemáticas de suelos. Instituto de Edafología, C.S.I.C. Madrid.
- Leiros, M.C. (1979): Suelos hidromorfos en Galicia. Tesis Doctoral. Facultad de Biología. Universidad de Santiago de Compostela.
- Leirós M.C. y Guitián Ojea, F. (1981): Suelos de la zona húmeda española. XI.- Contribución al estudio de los suelos hidromorfos de Galicia. I. Suelos costeros. *An. Edafol. Agrobiol.* 40: 1707-1734.
- Long, S.D. y Mason, C.F. (1983): Salt marsh ecology. Blackie. London. 160 p.
- Luther, G.W. III; Ferdelman, T.G.; Kostka, J.E.; Tsamakis, E.J. & Church, T.M. (1991). Temporal and spatial variability of reduced sulfur species (pyrite, thiodulfate) and pore water parameters in salt marsh sediments. *Biogeochem.* 14: 57-88.
- Macías, F. y Calvo, R. (1988): Arcillas y limos de sedimentos actuales de las rías de Galicia. Consideraciones genéticas. *Geociencias* 3:179-187.
- Megonical, J.P., Patrick, W.H. Jr y Faulkner, S.P. (1993): Wetland identification in seasonally flooded forest soils: Soil morphology and redox dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 140-149.
- Munsell Color Company (1975): Mussel Soil Color Charts. Munsell Color Co. (ed). Baltimore. MD.
- Otero, X.L. (2000): Biogeoquímica de metales pesados en ambientes sedimentarios marinos. I. Fluvisoles de la marismas de la Ría de Ortigueira. II Sedimentos de la Fosa hidrotermal de Guaymas (Golfo de California-Mexico). Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Otero, X.L., Sánchez, J.M. y Macías, F (2000b): Bioacumulación de heavy

- metals in thionic fluvisols by a marine polychaete: The role of metal sulfides. *J. Environ. Qual.* 29:1133-1141
- Pons, L.J. y Zonneveld, I. (1965): Soil ripening and soil classification. Initial soil formation in alluvial deposits and a classification of the resulting soils. Int. Inst. Land Reclam. and Improvement (IILRI). Publ. 13. Wageningen. The Netherlands. 128 p.
- Rhoades, J.D. (1982): Soluble salts. En A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeny (eds.), *Methods of soils analysis. Part. 2, Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy y American Soil Science Society, Soil Science Society of America, Madison-Wisconsin, 167-179.
- Richards, L.A. (1954): Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. USDA Manual n° 60. Limusa, México.
- Ritsema, C.J. y Groenbergen, J.E. (1993): Pyrite oxidation, carbonate weathering and gypsum formation in a drained potential acid sulfate soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 968-976.
- Singer, C.E. y Havill, D.C. (1993): Resistance to divalent manganese of salt-marsh plants. *J. Ecol.* 81:797-806.
- Sánchez, J.M. (1995): Caracterización florística y fitosociológica de las rías de Ortigueira y Ladrado (NW de la Península Ibérica) en relación con factores ambientales. Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela.
- Sánchez, J.M., Otero, X.L., Izco, J. y Macías, F. (1997): Growth form and population density of *Spartina maritima* (Curtis) Fernald in Northwest Spain. *Wetlands* 17: 368-374.
- Sánchez, J.M., Otero, X.L., Izco, J. (1998): Relationships between vegetation and environmental characteristics in a salt-marsh system on the coast of Northwest Spain. *Plant Ecology* 136: 1-8.
- Soil Survey Staff (1975): Soil taxonomy. USDA. Handb. 436. U.S. Government Printing Office, Washington.
- Soil Survey Staff (1999): Soil Taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil survey. Second edition. USDA. Washington, 869 p.
- Stoops, G y Eswaran, H. (1985): Morphological characteristics of wet soils. En *Wetland soils. Characterization, Classification and Utilization.* International Rice Research Institute. Manila-Philippines, 177-189.
- Van Breemen, N. (1982): Genesis, morphology and classification of acid sulfate soils in coastal plains. En J.A. Kittrick *et al.* (Ed.), *Acid sulfate weathering.* Spec. Pub. 10. Soil Science Society of America. Madison-Wisconsin, WI, USA, 95-108.
- Van Breemen, N. (1988): Effects of seasonal redox processes involving iron on chemistry of periodically reduced soils. En J.W. Stucki *et al.* (Eds), *Iron in soils and clays minerals.* Reidal Publi. Co., Boston, 797-809.
- Vepraskas, M.J. y Wilding, L.P. (1983): Aquic moisture regimes in soils with and without low chroma colors. *Soil Sci Soc. Am. J.* 47: 280-285.
- Zhang, Y.L. y Evangelou, V. P. (1996): Influence of iron oxide forming conditions on pyrite oxidation. *Soil Science* 161: 852-864.

