Agrociencia Uruguay 2022 | Volume 26 | Number NE1 | Article 508
DOI: 10.31285/AGRO.26.508
ISSN 2730-5066

Número especial en homenaje al Prof. Jorge Bossi (1934-2020)

# Verification of deep root exploration of *Eucalyptus grandis* to permian sedimentary rocks of northeastern Uruguay

## Verificación de exploración radicular profunda de *Eucalyptus grandis* hasta rocas sedimentarias pérmicas del noreste uruguayo

## Verificação da exploração de raízes profundas de *Eucalyptus grandis* até rochas sedimentares Permianas do nordeste do Uruguai

Mármol, S.[1]; Bentancor, L.[1]; Francia, M.[1]; Hirigoyen, A.[2]; Pérez Bidegain, M.[1]; Blanco, G.[3]; Pérez, M.[1]

[1]*Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas, Montevideo, Uruguay*
[2]*Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Programa Forestal, Tacuarembó, Uruguay*
3*Universidad de la República, CURE, Treinta y Tres, Uruguay*

**Editor**

Antonella Celio
*Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay*

Claudio Gaucher
*Universidad de la República, Facultad de Ciencias, Montevideo, Uruguay*

**Received** *19 Jan 2021*
**Accepted** *13 Nov 2021*
**Published** *27 May 2022*

**Correspondence**

Sebastián Mármol,
*sebastianmarmol@gmail.com*

## Abstract

Studies have shown that *Eucalyptus spp.* plantations develop a rapid and deep root system, reaching almost symmetrical relationships with the aerial part of the trees. In the present work, preliminary information on the deep root development of *E. grandis* and its interaction with soils, saprolites and rocks in northwestern Uruguay was collected. Starting from a geological base, three deep pits were made, which were classified according to a new saprolite proposal. Chemical and physical analyzes of the profiles, macroscopic descriptions of the roots in situ and microscopic observations (magnifying glass, electron microscopy and anatomical sections) of roots, saprolites and rocks were carried out. The deep root development was corroborated, showing varied and adapted roots that reach up to the rocks, observing indications of different root behaviors according to the different parts of the profile (soil, saprolite or rock). Finally, it is discussed how to focus future studies of the deep root system of *E. grandis.*, the characterization of the saprolite and rock based on this crop, and the possible effects on productive management and the environment.

**Keywords**: eucalyptus, deep roots, saprolite, rocks, Uruguay

CC BY

Mármol S, Bentancor L, Francia M, Hirigoyen A, Pérez Bidegain M, Blanco G, Pérez M. Verificación de exploración radicular profunda de *Eucalyptus grandis* hasta rocas sedimentarias pérmicas del noreste uruguayo. Agrociencia Uruguay [Internet]. 2022 [cited dd mmm yyyy];26(NE1):e508. doi:10.31285/AGRO.26.508.

## Resumen

Estudios han demostrado que las plantaciones de *Eucalyptus spp.* desarrollan un rápido y profundo sistema radicular, alcanzando relaciones casi simétricas con la parte aérea de los árboles. En el presente trabajo se relevó información preliminar sobre el desarrollo radicular profundo de *E. grandis* y su interacción con suelos, saprolitos y rocas en el noroeste de Uruguay. Partiendo de una base geológica, se realizaron tres calicatas profundas, que se clasificaron según una nueva propuesta de saprolitos. Se realizaron análisis químicos y físicos de los perfiles, descripciones macroscópicas de las raíces *in situ* y observaciones microscópicas (lupa, microscopia electrónica y cortes anatómicos) de raíces, saprolitos y rocas. El desarrollo radicular profundo fue corroborado, mostrando variadas y adaptadas raíces que alcanzan hasta las rocas, observándose indicios de comportamientos radiculares diferentes según las diferentes partes del perfil (suelo, saprolita o roca). Finalmente se discute cómo enfocar el estudio a futuro del sistema radicular profundo de *E. grandis.*, la caracterización del saprolito y la roca en función de este cultivo, y los posibles efectos en el manejo productivo y en el ambiente.


**Palabras clave**: *eucalyptus*, raíces profundas, saprolito, rocas, Uruguay


## Resumo

Estudos mostram que as plantações de *Eucalyptus spp* desenvolvem um sistema radicular rápido e profundo, alcançando relações quase simétricas com a parte aérea das árvores. No presente trabalho, foram coletadas informações preliminares sobre o desenvolvimento das raízes profundas do *E. grandis* e sua interação com os solos, saprólitos e rochas do noroeste do Uruguai. A partir de uma base geológica, foram feitas três cavas profundas, que foram classificadas de acordo com uma nova proposta de saprólito. Foram realizadas análises químicas e físicas dos perfis, descrições macroscópicas das raízes in situ e observações microscópicas (lupa, microscopia eletrônica e cortes anatômicos) de raízes, saprólitos e rochas. O desenvolvimento radicular profundo foi comprovado, apresentando raízes variadas e adaptadas que chegam até as rochas, observando-se indícios de diferentes comportamentos radiculares de acordo com as diferentes partes do perfil (solo, saprólito ou rocha). Por fim, discute-se como focar o estudo futuro do sistema radicular profundo do *E. grandis*, a caracterização do saprólito e da rocha com base nesta cultura e os possíveis efeitos no manejo produtivo e no meio ambiente.


**Palavras-chave**: eucalyptus, raízes profundas, saprólito, rochas, Uruguai

## 1. Introducción

Se presenta la primera investigación a nivel nacional sobre el sistema radicular profundo en *E. grandis*, que servirá de precedente para continuar investigaciones y para ser utilizada en otras especies forestales.

Las raíces profundas abarcan un conjunto mal definido de raíces finas que van desde 1 m hasta varios metros por debajo de la superficie del suelo, a veces penetrando la roca alterada[1]. Los *Eucalyptus spp.* se caracterizan por presentar un sistema radicular dual, formado por raíces superficiales y profundas[2-3]. Diversos autores han encontrado que los *Eucalyptus spp.* plantados comercialmente desarrollan un rápido y profundo sistema radicular[2][4-8]. Estudios en *E. grandis* muestran que la extensión vertical aérea y subsuperficial es casi simétrica (crecimiento sincrónico), y ocurre desde el inicio del crecimiento, lo que sugiere una fuerte determinación ontogénica que puede determinar una ventaja competitiva por recursos en su ambiente natural[7]. Este crecimiento rápido y sincrónico ocurre tanto en árboles provenientes de semillas como clonales[8], siendo válido hasta que las raíces encuentren una napa freática[7] o existan barreras físicas o químicas en el suelo[8].

A partir de los primeros 20 cm de suelo se reduce la densidad de raíces en *Eucalyptus spp.*[9], sin embargo, las capas mayores a 1 m de profundidad podrían contener una porción grande del total de biomasa radicular[2][5][8]. Las raíces finas (≤ 2 mm de diámetro), con función de absorción y transporte[10-11], en su gran mayoría se encuentran por debajo de los 50 cm de suelo[8] con desarrollo isotrópico[2]. Las raíces finas y profundas presentan una fuerte relación con la producción de biomasa aérea en etapas tempranas[8][12-13] y avanzadas del cultivo[5].

Los estudios que comprueban el desarrollo sincrónico de *Eucalyptus spp.* así como el uso de agua y nutrientes profundos han sido realizados en suelos (Ferralsoles) con profundidades mayores a los 10 m y sin barreras para el desarrollo radicular[2-3][6-9][14-15]. Las características de los suelos de prioridad forestal de Uruguay son muy diferentes a las mencionadas, pues se identifican por poseer

originalmente vegetación natural de praderas, ser notoriamente más fértiles[16], muchas veces asociados a rocosidad o pedregosidad[17], de profundidad máxima de 3 m y presentar horizontes B argilúvicos (de texturas finas, estructuras gruesas y compactas) propuestos como un factor restrictivo a la penetración radicular[18]. El sustituir sistemas de exploración superficial como praderas por vegetación con exploración radicular profunda puede generar cambios en el almacenaje de carbono[19] y en el uso del agua y los nutrientes[2]. Las raíces finas profundas de *Eucalyptus spp.* tienen la capacidad de tomar grandes cantidades de agua profunda[2][20], jugando un importante rol funcional durante déficits hídricos[3][5][7][9][20]; además, aumentan el volumen total de exploración y la consiguiente presencia total de nutrientes[5] potencialmente utilizables, con indicios de especialización funcional en *E. grandis* para la absorción de nutrientes en relación con la profundidad[14].

El desarrollo radicular profundo sincrónico de *Eucalyptus grandis* implicaría que las raíces podrían utilizar a corta edad, además del suelo, el saprolito y la roca. Las características del saprolito y de las rocas que afecten la profundidad efectiva, el volumen de arraigamiento y la capacidad de retención de agua han sido descritas como muy importantes para determinar el potencial de enraizamiento al evaluar la calidad de sitio forestal[18].

Se propone: 1- verificar el desarrollo radicular profundo hasta el material litológico; 2- describir características y comportamiento radicular de manera macroscópica y microscópica en horizontes B argilúvicos, saprolitos (horizontes C) y rocas; 3- relacionar de manera preliminar dicho comportamiento radicular con parámetros físico-químicos de los diferentes materiales, y 4- aportar criterios que permitan dilucidar los mejores métodos prácticos para estudiar el desarrollo radicular profundo a campo y el perfil completo del suelo SSR, para obtener datos cuantitativos y cualitativos útiles para ser comparados entre diferentes sitios.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Sitio de estudio

La investigación fue desarrollada en plantaciones comerciales de la empresa UPM, establecidas en Cerro Largo (32°13'S, 54°25'W), Uruguay. Las estadísticas climáticas históricas (1961-1991) indican lluvia anual de 1238 mm (clima isohigro) y temperatura media anual de 17 °C (11,6 °C en promedio desde julio a agosto y 22,6 °C desde diciembre a febrero). La topografía comprende 130-180 m de elevación, dominando lomadas suaves (2,7% pendiente promedio) y escasas lomadas fuertes (7,5% pendiente promedio). Las plantaciones de *E. grandis* clonales con 17 y 23 meses poseen alturas promedio de 5 m y 9 m, respectivamente. La unidad geológica dominante es la Formación Buena Vista, encontrándose la Formación Yaguarí de manera marginal[21]. La Unidad de Suelos Zapallar ocupa toda el área de estudio[22] y los grupos CONEAT presentes son 8.5, 7.31, G03.21 y 13.32.

### 2.2 Definición de sitios para calicatas profundas

La cartografía geológica cubrió un área de 1440 ha, realizándose fotointerpretación de imágenes satelitales y estereoscopia en fotos aéreas 1/40.000 y 1/20.000 (año 1967). Se relevaron 56 puntos de campo, describiéndose litologías, estructuras sedimentarias y paleocorrientes, información resumida en litofacies usando códigos[23] modificados y pautas[24-26] (Figura 1 en material complementario). Según las litofacies encontradas se seleccionaron 3 puntos con litologías diferentes para maximizar la posibilidad de que presenten saprolitos y suelos distintos. Se realizaron calicatas profundas con una retroexcavadora hasta que se expusiera con certeza una litología identificable, dentro de la segunda fila, abarcando 2 a 3 árboles en rodales de *E. grandis*.

### 2.3 Descripción del perfil en calicatas profundas

La capa R se define como la roca consolidada, que puede contener grietas revestidas o rellenas con arcillas u otro material[27]. La capa C incluye sedimentos, saprolita y rocas inconsolidadas[27], siendo la saprolita el material parental meteorizado[28] carente de las propiedades de los horizontes del suelo superiores[27] con pocos procesos pedogenéticos (porosidad alta, translocación, formación de minerales arcillosos, óxidos de Fe/Mn y bioturbación), pero que todavía retiene características de la roca madre (estructuras sedimentarias, fracturas)[28]. En el horizonte B se ha borrado la mayoría o toda la estructura de la roca original en conjunto con una o combinaciones de: concentración de arcilla, hierro, etc., evidencia de remoción de carbonatos, cambios de coloración y formación de estructuras granulares, bloques o prismáticas[27]. Las características de las rocas en su estado de poca o mínima meteorización son relevadas en la etapa de cartografía geológica, pero el inicio de la capa C plantea mayores dificultades en su descripción y definición, por lo que se proponen diferentes límites y grados de

diferenciación entre la capa R y la C[29-30], utilizándose como referencia criterios de grados de meteorización de la roca[30] y descripciones modificadas de capas, contactos líticos y saprolíticos[31], que se integran en el Cuadro 1.

### 2.4 Análisis físicos y químicos de los perfiles

Se tomaron muestras y medidas de todos los horizontes y las capas, obtenidas de manera perpendicular a la pared de las calicatas. Las muestras fueron secadas a estufa por 48 horas a 40 °C y molidas a un tamaño menor a 2 mm; se determinó textura[32], materia orgánica por oxidación con $K_2Cr_2O_7$ en $H_2SO_4$[33], cationes intercambiables (Ca, Mg, K, Na) por extracción con acetato de amonio 1M y determinación por absorción atómica y espectrofotometría de emisión[34], fósforo disponible (P Bray I) y determinación colorimétrica a 660 nm[35], pH $H_2O$ relación 1:1 por medio de electrodo de actividad específica y acidez intercambiable. La CIC pH 8.2 fue estimada[36]. Se midió la resistencia a la penetración (RP) con penetrómetro (Fiel Scout SC 900 Soil Compaction Meter) y se realizó la densidad aparente (DAP) por método de anillos[37]. La fracción arena obtenida en las rocas se tamizó en filtros sucesivos para obtener las fracciones arena muy gruesa (1.0-2.0 mm), gruesa (0.5-1.0 mm), media (0.25-0.5 mm), fina (0.125-0.25 mm) y muy fina (0.0625-0125 mm).

Cuadro 1. Metodología para la descripción cualitativa macroscópica de perfiles SSR

| *Horizonte/ Capa* | *Descripción general (desde profundidad a superficie)* |
|---|---|
| Capa R (Roca fresca) | Sin decoloraciones o incipientes |
| | Estructuras sedimentarias fácilmente reconocibles |
| | Litología identificable |
| | Fracturas distanciadas |
| | Acumulaciones de Fe-Mn en caras de fracturas |
| | Fósiles conservados |
| Capa Rr Saprolito (Roca alterada) | Pocas decoloraciones |
| | Estructuras sedimentarias apreciables |
| | Litología identificable |
| | Fracturas escasamente conectadas y poco rellenas |
| | Escasas acumulaciones laminares de Fe-Mn en caras de fracturas |
| Capa CrR Saprolito (Roca muy alterada) | Decoloraciones frecuentes |
| | Estructuras sedimentarias poco apreciables. Estratificación identificable |
| | Litología identificable con dificultad |
| | Fracturas más abundantes, interconectadas, que pueden estar rellenas |
| | Frecuente acumulación de Fe-Mn en manchas y laminares |
| Capa Cr Saprolito (Horizonte C alterado) | Decoloraciones desde el color original muy frecuentes |
| | Color general cambia de matiz |
| | Estructuras sedimentarias difícilmente reconocibles conservadas en fragmentos líticos |
| | Estratificación original conservada de forma difusa de fondo |
| | Se reconocen estructuras granulares, bloques o prismáticas |
| | Dispersas concreciones de Fe-Mn, moteados y bioturbación |
| | Fracturas difíciles de reconocer al ser muy frecuentes, pequeñas y muy interconectadas |
| Horizonte C (Capa C) Saprolito | Pocos procesos pedogenéticos claros: translocación, moteados, revestimientos, concreciones y bioturbaciones |
| | Estructura de suelo en etapa incipiente, pero clara |
| | Cambio de color en valor o en croma |
| | Estratificación original de la roca apenas reconocible de fondo |
| | Fragmentos líticos meteorizados escasos |
| | Fracturas ya no reconocibles |

### 2.5 Descripción macroscópica de las raíces finas

Por criterios visuales, morfológicos y de resistencia a la ruptura se pudo identificar las raíces de *E. grandis*, diferenciándolas con seguridad de las escazas raíces herbáceas de la rala vegetación de pastura presente. En cada calicata se procedió a limpiar un sector vertical de aproximadamente 50 cm de ancho, describiéndose cualitativamente: presencia de raíces, diámetro (finas ≤ 2 mm), grado de ramificación, resistencia asociada a tejido leñoso visible, disposición (horizontal, vertical o inclinadas) y caracteres morfológicos resaltantes. Por medio del diámetro y el orden de ramificación se infiere la función (transporte y/o absorción) de las raíces finas[38]. Se recolectaron muestras de raíces superiores e inferiores que fueron almacenadas en formaldehído y refrigeradas.

### 2.6 Observaciones microscópicas de raíces, saprolitos y rocas

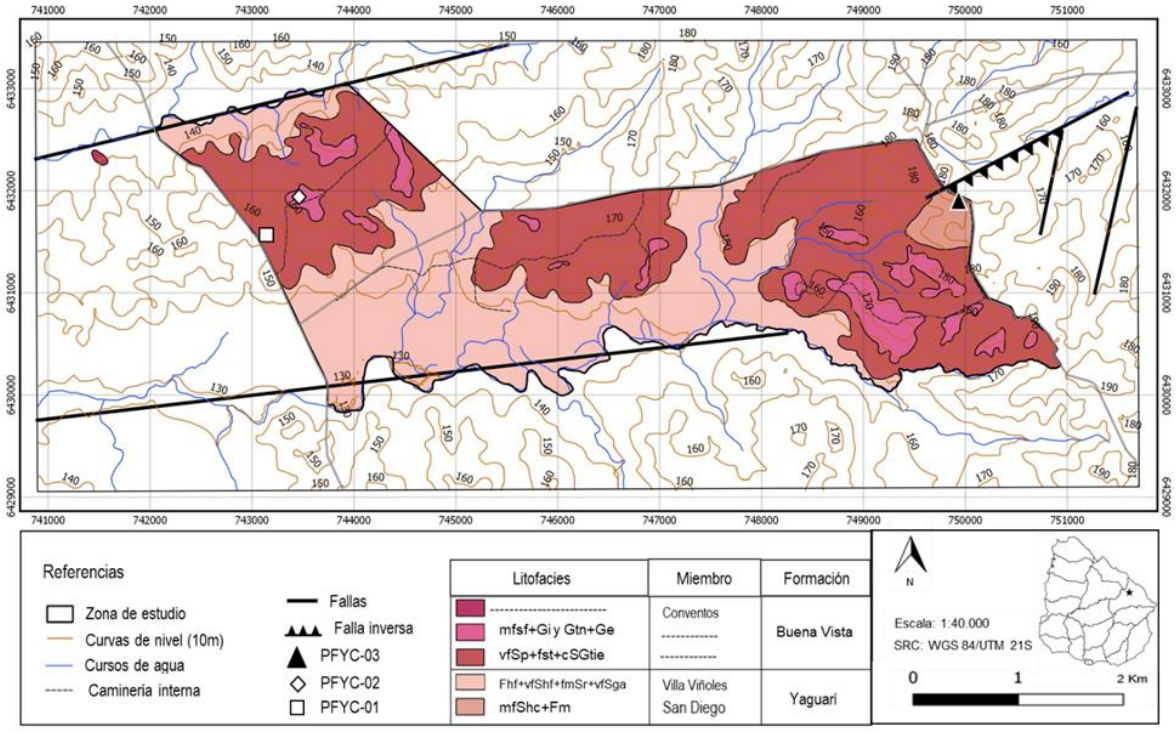
Dado que varios autores han asignado menores diámetros dentro de las raíces finas para resaltar sus funciones[38], así como han encontrado diferencias fisiológicas y funcionales entre raíces profundas y superficiales[15], se observaron muestras de las capas y los horizontes en lupa (Olympus sz61), describiéndose raíces y su interacción con los diferentes materiales para identificar raíces no visibles a simple vista. Se observaron muestras en microscopios electrónicos de barrido con cobertura de oro (Jeol NeoScope JCM-6000 y Jeol JSM 5900-LV Plus). Se realizaron cortes histológicos con micrótomo de mano, sin tinción y con tinción en azul de toluidina en raíces superficiales y profundas.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Cartografía geológica y selección de sitios de calicatas

Se identificaron 5 asociaciones de litofacies que permiten interpretar las condiciones de depósito, el ambiente, el arreglo estructural interno, el área que abarcan, su potencia estimada y la formación correspondiente (Figura 1). Se realizaron 3 calicatas (PFYC-01 a 03) en litofacies representativas de las áreas productivas con *E. grandis*, descartándose la asociación de litofacies Fhf+vfShf+fmSr+vfSga por presentar notorios problemas de drenaje dada su ubicación topográfica, además de estar ocupada por *E. Dunni y E. Benthamii*. (Figura 1).

Figura 1. Mapa geológico




La asociación de litofacies mfShc+Fm corresponde a la descripción del Miembro San Diego[39], y la asociación Fhf+vfShf+fmSr+vfSga con el Miembro Villa Viñoles[39], diferenciándose en las estructuras que evidencian posible acción de marea. Ambos Miembros corresponden a la Formación Yaguarí.

La asociación de litofacies vfSp+fSt+cSGtie, mfSf+Gi, Gtn+Ge y litofacies Gtn corresponde a ambientes fluviales y se agrupan en términos generales dentro de la Formación Buena Vista[39], pero no corresponden en características importantes a las descripciones de Miembros propuestos[40]; particularmente, la cantidad y el tipo de areniscas gruesas y conglomerados podrían adjudicarse a una parte proximal de un sistema *braided*[41]. Un nuevo sitio de areniscas eólicas del Miembro Conventos[40] fue descubierto en las cercanías.

La calicata PFYC-01 (litofacies VfSp) presenta como litología de referencia (ubicada a escasos metros en una cantera) una arenisca muy fina, cuarzo-feldespática con poca biotita, color rojizo y decoloraciones blancas que acompañan a las estructuras cruzadas planares y cementación arcillosa. Dicha litología sin meteorización no fue alcanzada en la calicata siguiendo estrictamente la descripción propuesta en la Tabla 1.

La calicata PFYC-02 presenta un intraconglomerado matriz soportado. La matriz consta de una arenisca media a fina, amarilla oscura, feldespática, con mucha muscovita que se acumula en niveles discontinuos marrones, cementación arcillosa, friable y porosidad primaria notoria. Los clastos son de pelita arcillosa mal laminados, de forma aplanada, de 10 cm de largo máximo, poco redondeados, desordenados y fracturados. Lateralmente este intraconglomerado pasa a una arenisca similar a la de la matriz con estructuras flaser (asociación de litofacies mfSf+Gi).

La calicata PFYC-03 presenta una pelita limosa gris, masiva, sin porosidad primaria, con esporádicos pequeños lentes irregulares de arena fina amarillenta y frecuentes fósiles fragmentados de *Glossopteris* y frondas de *Pecopoteris* (litofacies Fm).

### 3.2 Descripción morfológica de los perfiles SSR

Se presentan en los Cuadros 2 a 4 las descripciones morfológicas de los perfiles SSR de las calicatas PFYC-01 a 03 (Fotografías en material complementario, Figura 2).

Cuadro 2. Descripción morfológica del perfil SSR calicata PFYC-01

| *Horizonte/ Capa* | *Profundidad (cm)* | *Descripción* |
|---|---|---|
| Ap | 0-10 | Color 7,5YR 3/2 seco, 7,5YR 2,5/1 húmedo; franco arenoso; transición gradual. |
| AB | 10-25 | Color 7,5YR 3/2 seco, 7,5YR 2,5/1 húmedo; franco arenoso; transición gradual. |
| Bt1 | 25-50 | Color a 7,5YR 2,5/3 seco, 7,5YR 2,5/2 húmedo; películas de arcilla; transición clara. |
| Bt2 | 50-100 | Color 10YR 6/1 seco, 10YR 5/1 húmedo; franco arcillo arenoso; estructura granular a pequeños bloques; transición clara; concentración iluvial marcada de arcilla y de óxidos de hierro; moteados abundantes, bordes difusos de color 7,5YR 5/8; la estructura de la roca original ya no se reconoce como tal. |
| C | 100-140 | Color 7,5 YR 5/8 seco, 7,5YR 4/6 húmedo; decoloraciones a colores blancos frecuentes; acumulación de arcillas notoria al tacto; acumulación de material fino muy arcilloso oscuro alrededor de las raíces más grandes; concreciones de Fe-Mn y moteados muy frecuentes; estructuras prismáticas y columnares incipientes; estratificación original apenas conservada, difícil de observar fácilmente, apreciable al romper los bloques; algunos núcleos pequeños conservados de la capa CrR apreciables por el color y mayor tenacidad. |
| | ~140 | Línea blanca donde hay fuerte decoloración, lixiviación y concreciones de Fe-Mn, quedando acumulación de arena fina. |
| CrR | 140-200 | Color 5R 5/6 seco, 5R 4/4 húmedo; decoloraciones blancas asociadas a raíces y acumulación de agua; estratificación original de la roca conservada; pequeñas fracturas que provocar roturas en bloques angulares de máximo 10 cm de lado o en formas planas siguiendo la estratificación; fracturas rellenas con raíces y materiales finos asociados a la rizosfera; manchas pequeñas negras de Fe-Mn en los planos de fracturas; percolación de agua importante. |
| R | Referencia | Color 5R 4/8 seco, 5R 3/6 húmedo; areniscas muy finas cuarzo feldespáticas con poca biotita; estructuras cruzadas planares de alto ángulo que hacia la cima son de menor ángulo; buena selección; color rojizo constante que se decolora en diversos patrones acompañando la estratificación; fracturas distanciadas a más de 30 cm. |

Cuadro 3. Descripción morfológica del perfil SSR calicata PFYC-02

| *Horizonte/ Capa* | *Profundidad (cm)* | *Descripción* |
|---|---|---|
| Ap | 0-15 | Color 7,5YR 3/4 seco, 7,5YR 2,5/3 húmedo; franco arenoso; bloques subangulares débiles < 5 a 5 - < 10 mm; transición abrupta. |
| 1A | 15-30 | Color 7,5YR 3/3 seco, 7,5YR 2,5/1 húmedo; nivel de acumulación de cantos rodados de diversos tamaños. |
| Bt | 30-62 | Color 2,50YR 3/6 seco, 2,5YR 2,5/4 húmedo; textura arcillosa; bloques subangulares 10 - < 20 mm; transición clara; concentración marcada de arcilla iluvial; la estructura de la roca original ya no se reconoce como tal. |
| C | 62-85 | Color 10YR 5/8 seco, 10YR 4/6 húmedo; franco arcillo arenoso; bloques angulares 10 - < 20 mm; transición gradual; la acumulación de arcilla en esta capa probablemente no sea iluvial, sino producto de los clastos pelíticos meteorizados; muchos moteados de Fe-Mn pequeños y difusos; láminas de Fe-Mn; la estratificación original no es apreciable; algunos clastos de arcilla de hasta 5 cm todavía definibles, pero muy meteorizados; fracturas no reconocibles. |
| CrR | 85-120 | Color 2,5YR 4/8 seco, 2,5YR 3/6 húmedo; decoloraciones blancas; color 10R 4/6 en clastos pelíticos; franco arcillo arenoso; láminas de Fe-Mn; la estratificación original todavía es apreciable; clastos de arcilla más fragmentados pero identificables, con algunos núcleos todavía frescos; fracturas más frecuentes que dan apariencia de pequeños bloques angulosos; moteados laminares negros en planos de fractura o sobre restos de clastos de arcilla conservados. |
| | 120-130 | Línea blanca donde hay fuerte decoloración y lixiviación, quedando acumulación de arena fina. |
| Rr | 130-170 | Color matriz 10YR 7/6 seco, 10YR 6/4 húmedo; color clastos 5R 4/6; decoloraciones escasas blanquecinas en la arenisca y algunos moteados negros en los clastos pelíticos; estructuras sedimentarias conservadas, niveles marrones muscovíticos; intraconglomerado con clastos pelítico y arenisca media a fina arcósica; matriz soportado; fracturas presentes en clastos pelíticos que deberían de continuar en la matriz arenosa, pero no se aprecian a simple vista ni por rotura. |
| R | Referencia | Color 10YR 6/8 seco, 10YR 5/6 húmedo; arenisca media a fina arcósica, con mucha muscovita y cuarzo muy lustrado; color amarillento y pigmentaciones bordó; niveles de acumulación de micas, arenisca gruesa cuarzosa y clastos pequeños de cuarzo en una matriz barrosa marrón/bordó. |

En los tres casos se pudo aplicar la metodología para la descripción cualitativa macroscópica de perfiles SSR (Cuadro 1), pudiéndose subdividir más capas dentro del saprolito de manera más precisa, así como definir si se alcanza la capa R. No se observaron secuencias completas de capas saprolíticas a las teóricas de la metodología.

En PFYC-02 ocurre un nivel de acumulación de cantos rodados (horizonte 1A 15-30 cm), sugiriendo la meteorización de un extraconglomerado (litofacies Ge), indicando una discontinuidad en cuanto a material generador del horizonte Ap respecto a los horizontes y las capas profundas.

En las calicatas PFYC-01 y 02 situadas en areniscas se presenta, a diferentes profundidades y entre diferentes capas, una línea blanca que evidencia lixiviación por la marcada decoloración y la concentración de arena, posiblemente relacionada con la circulación de agua estacional, dadas además las concreciones de Fe-Mn. Se descarta que sea una discontinuidad entre dos litologías dada la continuidad de características del material litológico. Se puede tratar de un límite de meteorización ya que debajo de estas líneas las características litológicas se hacen más notorias, con las variaciones de magnitud de estas características acordes a las litologías diferentes. En estas dos calicatas no se alcanzaron las rocas frescas, describiéndose rocas de referencia inmediatamente cercanas en canteras.

Cuadro 4. Descripción morfológica del perfil SSR calicata PFYC-03

| *Horizonte/ Capa* | *Profundidad (cm)* | *Descripción* |
|---|---|---|
| Ap | 0-15 | Color 7,5YR 2.5/1 seco, 10YR 2/1 húmedo; franco arcillo limoso; bloques subangulares débiles 10 - < 20 mm; transición gradual. |
| AB | 15-30 | Color 10YR 2/1 seco, 10YR 2/2 húmedo; franco arcillo limoso; bloques angulares moderados 10 - < 20 mm; transición clara; revestimientos de arcilla, pocos y medios. |
| Bt1 | 30-45 | Color 7,5YR 2,5/3 seco, 10YR 2/2 húmedo; arcilloso; bloques angulosos moderados a fuertes 10 - < 20 mm; transición clara; revestimientos de arcilla, pocos y gruesos; fragmentos líticos conservados de pelita de color interno naranja rojizo. |
| Bt2 | 45-90 | Color 2,5Y 3/1 seco, 2,5Y 2,5/1 húmedo; arcilloso; bloques angulares moderados a fuertes 20 - < 50 mm; transición gradual; revestimientos de arcilla, pocos y gruesos; fragmentos líticos conservados de pelita de color interno naranja rojizo. |
| C | 90-100 | Color 2,5Y 5/1 seco, 2,5Y 4/1 húmedo; arcilloso; bloques angulares moderados 20 - < 50 mm; transición gradual a clara; revestimientos arcillosos pocos y medios; aumento en el contenido de arcilla por translocación; revestimientos laminares negros de Fe-Mn; en algunos bloques angulares de 3 cm se conserva fresca la pelita masiva; abundantes fragmentos líticos pequeños ovoides conservados de pelita de color naranja a amarillentos que dan la apariencia de moteados; la fracturación ya no es reconocible dada la estructura en bloques. |
| CrR | 115-130 | Color 5Y 4/1 seco, 5Y 3/1 húmedo; frecuentes decoloraciones a gris claro, asociadas a las fracturas; la pelita se conserva fresca en los bloques que se forman; los lentes de arena fina se encuentran modificados en forma y color; muchas fracturas 3 a 5 cm de lado rellenas que forman bloques angulares; muchas fracturas rellenas de material arcilloso; frecuentes revestimientos laminares de Fe-Mn en las caras de los bloques; se encuentran fósiles, pero alterados. |
| R | 130-160 | Color 5Y 6/1; pelita de iguales proporciones de limo, arcilla y arena muy fina; presenta esporádicos niveles lenticulares de 1 cm de ancho y menos de 15 cm de largo de arena fina amarillo-ocre; la estructura de la pelita es masiva, presenta diaclasas subverticales espaciadas entre 30 y 50 cm, produciendo grandes bloques angulares; presenta numerosos fósiles de megaplantas bien conservados como impresiones en disposición al azar, dada la estructura masiva de la roca; la roca presenta poca decoloración solamente en las fracturas donde las raíces han ingresado. |

### 3.3 Resultados de análisis físicos y químicos de los perfiles SSR

Los Cuadros 5 a 7 presentan los resultados analíticos de los perfiles SSR de las calicatas PFYC-01 a 03. El suelo correspondiente a PFYC-01 se clasifica como un Luvisol Ocrico Típico[42] (Alfisol clasificación USDA) y el correspondiente a PFYC-02 como Luvisol Ocrico Abrúptico[42] (Alfisol clasificación USDA), ambos de prioridad forestal[43], mientras que el suelo de PFYC-03 se clasifica como un Brunosol Subéutrico Lúvico[42] (Molisol clasificación USDA) no clasificado como de prioridad forestal[43]. Los análisis arrojaron datos para todas las capas C y R muestreadas. Los valores de C orgánico y materia orgánica se comportan dentro de lo esperado, descendiendo en profundidad en todos los casos, acentuándose la reducción después de los horizontes Bt. Las bases Ca, Mg, K y Na tienden a aumentar en diferentes magnitudes, en general, a mayor profundidad, lo que se justificaría por el aumento de la fracción mineral al acercase a la roca madre.

Cuadro 5. Resultados de análisis físicos y químicos del perfil SSR calicata PFYC-01

| *Horizonte/ Capa* | Profundidad (cm) | *Arena* | *Limo* | *Arcilla* | *Clase textural* | *DAP* | *RP* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | % | | | | g.cm-3 | KPa |
| Ap | 0-10 | 73,0 | 13,0 | 14,0 | Franco arenoso | 1,23 | 879 |
| AB | 10-25 | 73,7 | 10,2 | 16,1 | Franco arenoso | 1,28 | 723 |
| Bt1 | 25-50 | 61,5 | 14,8 | 23,7 | Franco arcillo arenoso | 1,44 | 1104 |
| Bt2 | 50-100 | 58,4 | 19,1 | 22,5 | Franco arcillo arenoso | 1,59 | 1666 |
| C | 100-140 | 64,7 | 12,4 | 22,9 | Franco arcillo arenoso | 1,69 | 1636 |
| CrR | 140-200 | 72,3 | 11,8 | 15,9 | Franco arenoso | 1,63 | 1434 |

Cuadro 5. Continuación

| *pH* | *C org.* | *M org.* | *P* | *Al* | *Ca* | *Mg* | *K* | *Na* | *BT* | *CICe* | *CIC pH7* | *SB pH7* | *CIC pH8,2* | SB pH8,2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | % | | ppm | meq/100 g suelo | | | | | | % | | | | |
| 4,4 | 0,9 | 1,5 | 2,9 | 0,9 | 2,6 | 0,8 | 0,2 | 0,1 | 3,7 | 4,6 | 7,9 | 47,0 | 29,7 | 35,7 |
| 4,8 | 0,6 | 1,0 | 2,3 | 1,5 | 2,6 | 0,7 | 0,2 | 0,1 | 3,6 | 5,1 | 8,5 | 42,3 | 31,1 | 32,3 |
| 5,1 | 0,8 | 1,3 | 2,9 | 0,8 | 6,4 | 0,7 | 0,3 | 0,1 | 7,5 | 8,3 | 12,4 | 60,7 | 37,4 | 45,6 |
| 5,6 | 0,6 | 1,0 | 2,3 | - | 11,8 | 1,1 | 0,4 | 0,2 | 13,5 | 13,5 | 18,5 | 72,7 | 43,8 | 54,2 |
| 7,7 | 0,4 | 0,7 | 1,7 | - | 14,6 | 1,1 | 0,4 | 0,2 | 16,2 | 16,2 | 21,8 | 74,3 | 46,2 | 55,3 |
| 7,9 | 0,2 | 0,4 | 1,2 | - | 13,8 | 1,2 | 0,3 | 0,2 | 15,5 | 15,5 | 21,0 | 73,9 | 45,6 | 55,1 |

Cuadro 6. Resultados de análisis físicos y químicos del perfil SSR calicata PFYC-02

| *Horizonte/ Capa* | Prof. (cm) | *Arena* | *Limo* | *Arcilla* | *Clase textural* | *DAP* | *RP* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | % | | | | g.cm-3 | KPa |
| Ap | 0-15 | 67,4 | 16,8 | 15,8 | Franco arenoso | 1,32 | 740 |
| 1A | 15-30 | - | - | - | Cantos rodados | - | - |
| Bt | 30-62 | 42,7 | 14,6 | 42,7 | Arcilloso | 1,45 | 1009 |
| C | 62-85 | 49,9 | 15,3 | 34,8 | Franco arcillo arenoso | 1,48 | 2216 |
| CrR | 85-120 | 57,3 | 15,3 | 27,4 | Franco arcillo arenoso | 1,67 | 2290 |
| Rr | 120-140* | 37,2 | 27,6 | 35,2 | Franco arcilloso | 1,32 | 3171 |
| | 140-150 ** | 59,6 | 16,6 | 23,8 | Franco arcillo arenoso | 1,45 | - |
| | 150-170* | 40,3 | 26,0 | 33,7 | Franco arcilloso | 1,57 | - |

*Muestra de matriz arenosa **Muestra de clasto pelítico

Cuadro 6. Continuación

| *pH* | *C org.* | *M org.* | *P* | *Al* | *Ca* | *Mg* | *K* | *Na* | *BT* | *CICe* | *CIC pH7* | *SB pH7* | *CIC pH8,2* | SB pH8,2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | % | | ppm | meq/100 g suelo | | | | | | % | | | | |
| 4,8 | 1,2 | 2,0 | 4,1 | 0,9 | 1,4 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | 2,2 | 3,1 | 6,1 | 36,6 | 24,6 | 28,1 |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4,8 | 0,6 | 1,0 | 2,3 | 2,3 | 5,4 | 2,7 | 0,4 | 0,2 | 8,6 | 10,9 | 15,4 | 55,9 | 41,0 | 42,2 |
| 5,1 | 0,3 | 0,5 | 2,3 | 1,2 | 5,0 | 2,6 | 0,3 | 0,2 | 8,1 | 9,3 | 13,5 | 59,7 | 38,9 | 44,9 |
| 5,4 | 0,2 | 0,3 | 2,3 | - | 3,7 | 1,9 | 0,2 | 0,2 | 6,0 | 6,0 | 9,5 | 62,6 | 33,2 | 47,0 |
| 6,5 | 0,3 | 0,4 | 2,3 | - | 8,4 | 2,1 | 0,3 | 0,2 | 11,0 | 11,0 | 15,5 | 70,6 | 41,1 | 52,7 |
| 5,6 | 0,4 | 0,6 | 2,3 | - | 3,5 | 1,7 | 0,2 | 0,3 | 5,8 | 5,8 | 9,3 | 62,1 | 32,7 | 46,6 |
| 5,8 | 0,3 | 0,5 | 1,7 | - | 7,5 | 3,4 | 0,4 | 0,4 | 11,6 | 11,6 | 16,3 | 71,2 | 41,8 | 53,1 |

Cuadro 7. Resultados de análisis físicos y químicos del perfil SSR calicata PFYC-03

| *Horizonte/ Capa* | Profundidad (cm) | *Arena* | *Limo* | *Arcilla* | *Clase textural* | *DAP* | *RP* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | % | | | | g.cm-3 | KPa |
| Ap | 0-15 | 57,4 | 16,0 | 26,6 | Franco arcillo arenoso | 1,09 | 1075 |
| AB | 15-30 | 50,4 | 18,8 | 30,8 | Franco arcillo arenoso | 1,29 | 1003 |
| Bt1 | 30-45 | 26,3 | 10,3 | 63,4 | Arcilloso | 1,19 | 807 |
| Bt2 | 45-90 | 19,2 | 23,6 | 57,2 | Arcilloso | 1,20 | 805 |
| C | 90-100 | 24,6 | 28,8 | 46,6 | Arcilloso | 1,35 | 2419 |
| Cr | 100-115 | 15,6 | 49,1 | 35,3 | Franco arcillo limoso | 1,38 | 2424 |
| CrR y R | 115-160 | 30,3 | 38,5 | 31,2 | Franco arcilloso | - | 5000 |

Cuadro 7. Continuación

| *pH* | *C org.* | *M org.* | *P* | *Al* | *Ca* | *Mg* | *K* | *Na* | *BT* | *CICe* | *CIC pH7* | *SB pH7* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | % | | ppm | meq/100 g suelo | | | | | | % | | |
| 5,6 | 2,4 | 4,1 | 9,5 | - | 8,6 | 2,2 | 0,6 | 0,1 | 11,6 | 11,6 | 16,2 | 71,2 |
| 5,2 | 2,1 | 3,7 | 5,3 | - | 9,6 | 2,0 | 0,5 | 0,2 | 12,2 | 12,2 | 17,0 | 71,7 |
| 5,4 | 2,0 | 3,4 | 5,3 | - | 21,5 | 4,2 | 0,8 | 0,5 | 27,0 | 27,0 | 34,8 | 77,7 |
| 5,3 | 0,7 | 1,2 | 5,3 | - | 24,2 | 4,7 | 0,9 | 0,6 | 30,4 | 30,4 | 38,9 | 78,3 |
| 5,5 | 0,6 | 1,1 | 4,1 | - | 37,1 | 7,5 | 0,9 | 0,8 | 46,3 | 46,3 | 57,9 | 79,9 |
| 6,8 | 0,4 | 0,7 | 11,8 | - | 27,6 | 5,0 | 1,0 | 0,7 | 34,2 | 34,2 | 43,4 | 78,8 |
| 6,8 | 0,3 | 0,5 | 7,1 | - | 26,0 | 4,1 | 1,0 | 0,6 | 31,7 | 31,7 | 40,4 | 78,4 |

El P desciende a profundidad en las capas C en PFYC-01 y 02, ubicándose en niveles cercanos a la mitad de los horizontes superficiales. En el caso de PFYC-03, el P desciende desde el horizonte A, pero retorna a niveles similares en las últimas capas saprolíticas y en la roca, lo que indicaría que la roca es portadora de P. La CIC en todos los casos tiende a aumentar considerablemente en profundidad, posiblemente por el aumento de los minerales arcillosos filosilicatados menos meteorizados.

### 3.4 Descripciones macroscópicas cualitativas radiculares en perfiles SSR

Los Cuadros 8 a 10 presentan las observaciones de raíces gruesas y finas en los perfiles SSR de las calicatas PFYC-01 a 03. El estudio de calicatas profundas permite una rápida y detallada visión cualitativa de la distribución espacial de las raíces en relación con las características del suelo, aunque puede subestimar la proporción de raíces finas, particularmente en suelos arcillosos[44]. En todas las calicatas se observaron raíces gruesas leñosas hasta la Capa C, y en PFYC-03 hasta la capa R, con el rol estimado de transporte, identificándose a partir de ellas ramificaciones de raíces finas que se utilizaban de criterio comparativo para identificar otras aisladas. Las raíces finas y gruesas muestran un comportamiento de colonización homogéneo del suelo, con diferentes preferencias de disposición. Este comportamiento se ve alterado cuando se llega a capas del saprolito donde las raíces se concentran más en las fracturas o en la estratificación remanente de la roca. El grado de ramificación y el orden de las raíces parecerían indicar *a priori* que en todo el SSR las raíces finas presentan tanto funciones de absorción como de transporte.

Cuadro 8. Descripciones macroscópicas cualitativas de raíces en perfil SSR calicata PFYC-01

| *Horizonte/ Capa* | *Prof. (cm)* | *Diámetro de raíces* | | *Grado de ramificación (orden)* | | *Función estimada* | | *Disposición* | | *Observaciones* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Rg | Rf | Rg | Rf | Rg | Rf | Rg | Rf | |
| Ap | 0-10 | Dominantes 3-0,5 mm | Muy abundantes y notorias | 5$^{to}$ | 4$^{to}$ a 1$^{er}$ | An T | A T | L | L V | Se encuentran distribuidas sin orden aparente por todo el sector expuesto. |
| AB | 10-25 | | | | | | | | | |
| Bt1 | 25-50 | Escasas 0,3 mm | Escasas | 5$^{to}$ | No visible | T | T | L | L | |
| Bt2 | 50-100 | Escasas 0,4-0,3 mm | Notorias | 5$^{to}$ | 4$^{to}$ a 2$^{do}$ | T | A T | L | V | |
| C | 100-140 | Escasas 0,3 mm | Muy notorias 0,1 mm | 5$^{to}$ | 4$^{to}$ a 1$^{er}$ | T | A T | L | V | |
| CrR | 140-200 | No visible | Escasas 0,1 mm | - | 4$^{to}$ y 3$^{er}$ | - | T A | - | L | Siguen la estratificación marcadamente. |

Rg- raíces gruesas, Rf- raíces finas ≤2 mm; A- Absorción; T- Transporte; An- Anclaje-laterales; V-verticales

Cuadro 9. Descripciones macroscópicas cualitativas de raíces en perfil SSR calicata PFYC-02

| *Horizonte/ Capa* | *Prof. (cm)* | *Diámetro de raíces* | | *Ramificación(orden)* | | *Función estimada* | | *Disposición* | | *Observaciones* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Rg | Rf | Rg | Rf | Rg | Rf | Rg | Rg | |
| Ap | 0-15 | Dominantes 5 -0,5 mm | Muy abundantes y notorias | 5$^{to}$ | 4$^{to}$ a 1$^{er}$ | An T | A T | L | L V | Se encuentran distribuidas sin orden aparente por todo el sector expuesto. |
| 1A | 15-30 | Nivel de cantos rodados dificulta observación | | | | | | | | |
| Bt | 30-62 | Notorias 0,5-0,3 mm | Notorias 0,1mm | 5$^{to}$ | 4$^{to}$ a 2$^{do}$ | T | T A | L | V | |
| C | 62-85 | Muy notorias 0,3 mm | Escasas 0,1mm | 5$^{to}$ | 4$^{to}$ | T | T | L V | V | |
| CrR | 85-120 | No visible | Muy notorias 0,1mm | - | 4$^{to}$ a 1$^{er}$ | No visible | A T | - | V L | Siguen las fracturas o la estratificación. |
| Rr | 120-170 | No visible | Notorias 0,1mm | - | 4$^{to}$ a 1$^{er}$ | No visible | A T | - | V | Atraviesan la arenisca y los clastos. |

Rg- raíces gruesas, Rf- raíces finas ≤2 mm; A- Absorción; T- Transporte; An- Anclaje-laterales; V-verticales

Cuadro 10. Descripciones macroscópicas cualitativas de raíces en perfil SSR calicata PFYC-03

| *Horizonte* | *Prof. (cm)* | *Diámetro de raíces* | | *Ramificación (orden)* | | *Función estimada* | | *Disposición* | | *Observaciones* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Rg | Rf | Rg | Rf | Rg | Rf | Rg | Rf | |
| Ap | 0-15 | Dominantes 3-0,5 mm | Muy abundantes y notorias | 5to | 4to a 1er | An T | A T | L | L V | Se encuentran distribuidas sin orden aparente por todo el sector expuesto.<br><br>En Bt2 se observan de morfología ovalada a planar. |
| AB | 15-30 | | | | | | | | | |
| Bt1 | 30-45 | Escasas 0,5-0,3 mm | Muy notorias | 5to | 4to y 3er | T | T A(?) | V | V | |
| Bt2 | 45-90 | Notorias 0,3 mm | Escasas | 5to | 4to a 1er | T | A T | L | L V | |
| C | 90-100 | Escasas 0,5 mm | Notorias 0,2-0,1 mm | 5to | 4to a 1er | T | A T | V | V | |
| Cr | 100-115 | No visible | Muy notorias | - | 4to y 3er | - | T A(?) | - | L V | Circulares y aplanadas, siguen las fracturas marcadamente. |
| CrR y R | 115-160 | Escasas 1-0,5 mm | Notorias | 5to | 4to a 1er | T | A T | L V | L V | Muy aplanadas, siguen las fracturas marcadamente. |

Rg- raíces gruesas, Rf- raíces finas ≤2 mm; A- Absorción; T- Transporte; An- Anclaje-laterales; V-verticales

Figura 2. Cortes histológicos transversales de raíces aplanadas y cilíndrica de CrR/R-PFYC-03

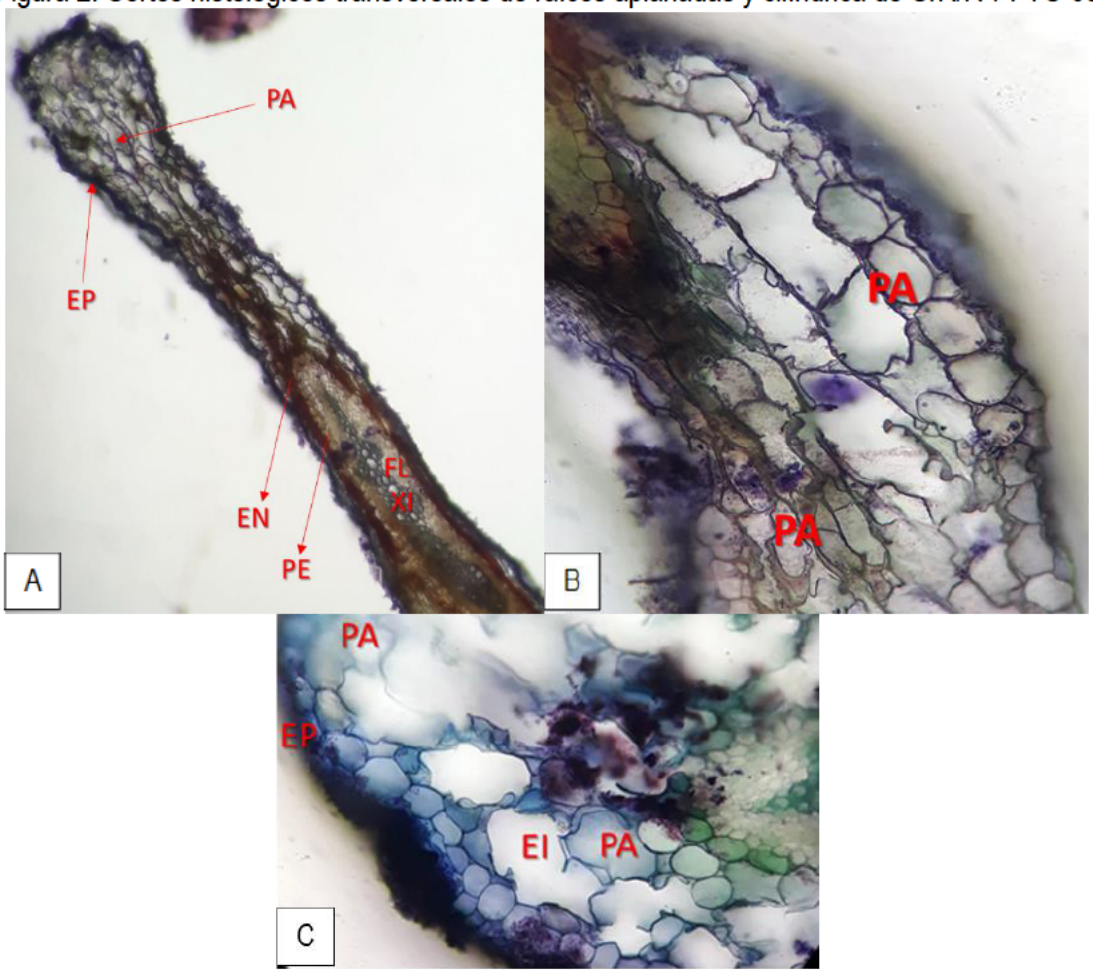


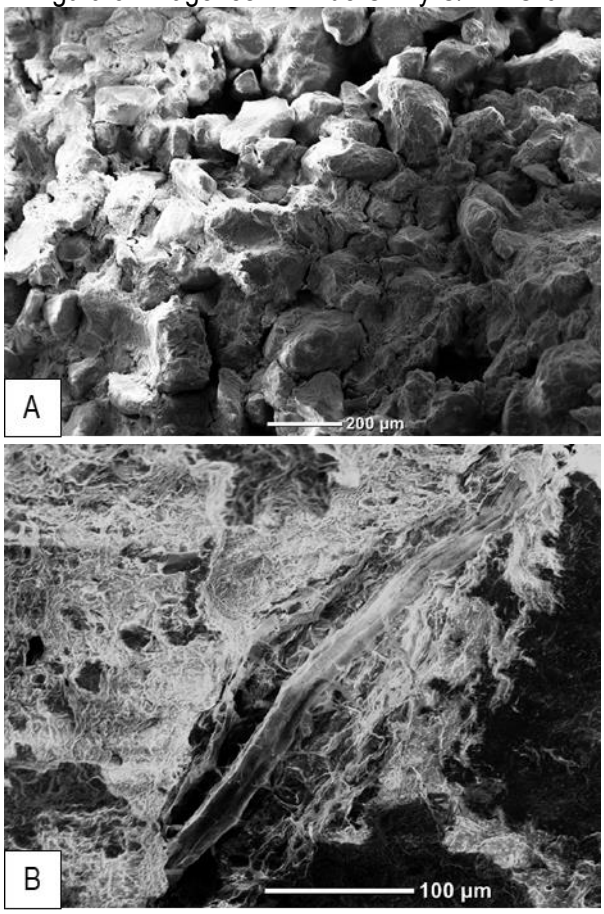

Imagen A y B sin tinción. EP-Epidermis, PA-Aerénquima, EN-Endodermis, PE-Periciclo, FL-Floema, XI-Xilema, EI-Espacio intercelular

### 3.5 Observaciones microscópicas

Se realizaron cortes comparativos de las raíces superficiales y profundas de PFYC-03 dado que presentan diferencias morfológicas externas. En las Figuras 2A y 2B se muestran raíces profundas de aplanadas (0,4 mm de alto), los tejidos vasculares se encuentran poco desarrollados y aplanados, la epidermis es muy fina y el tejido parenquimático está modificado en aerénquima. La Figura 2C muestra una raíz de 1 mm con las mismas características que la anteriores, pero con morfología cilíndrica y sin deformación en los tejidos. Todas estas raíces poseen la función de circular aire a profundidad por los grandes espacios intercelulares del aerénquima, además de funciones de absorción.

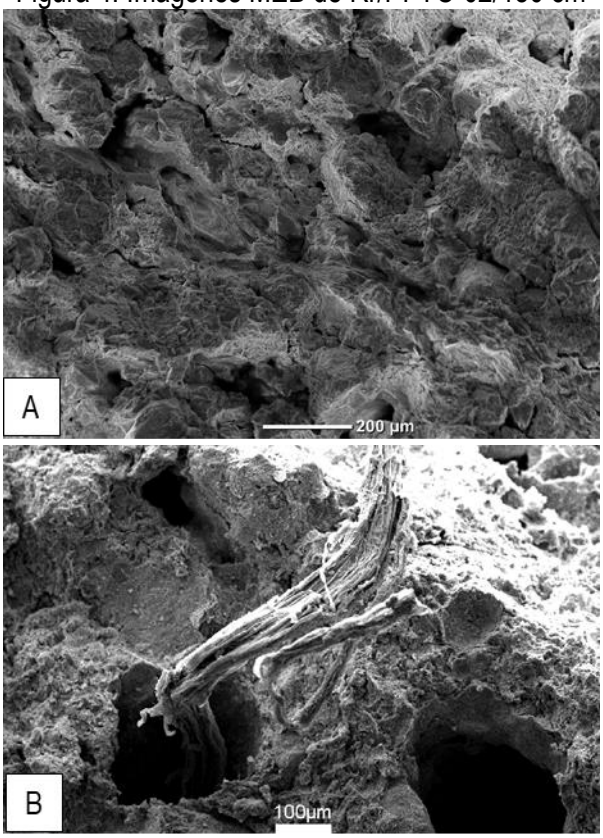
En la Figura 3A de CrR/PFYC-01, se aprecian granos de cuarzo y feldespato cementados por arcilla, porosidad con poros mayores de 35 µm promedio y más pequeños, interconectados en entramado. En la Figura 3B de C/PFYC-01, se observa un poro de manera lateral de 65-70 µm de ancho, con una raíz de 16,5 µm (2-3 células) de espesor de la que salen pelos radiculares o prolongaciones de tejidos dérmicos que entran en contacto con la fracción mineral directamente.

Figura 3. Imágenes MEB de CrR y C/PFYC-01



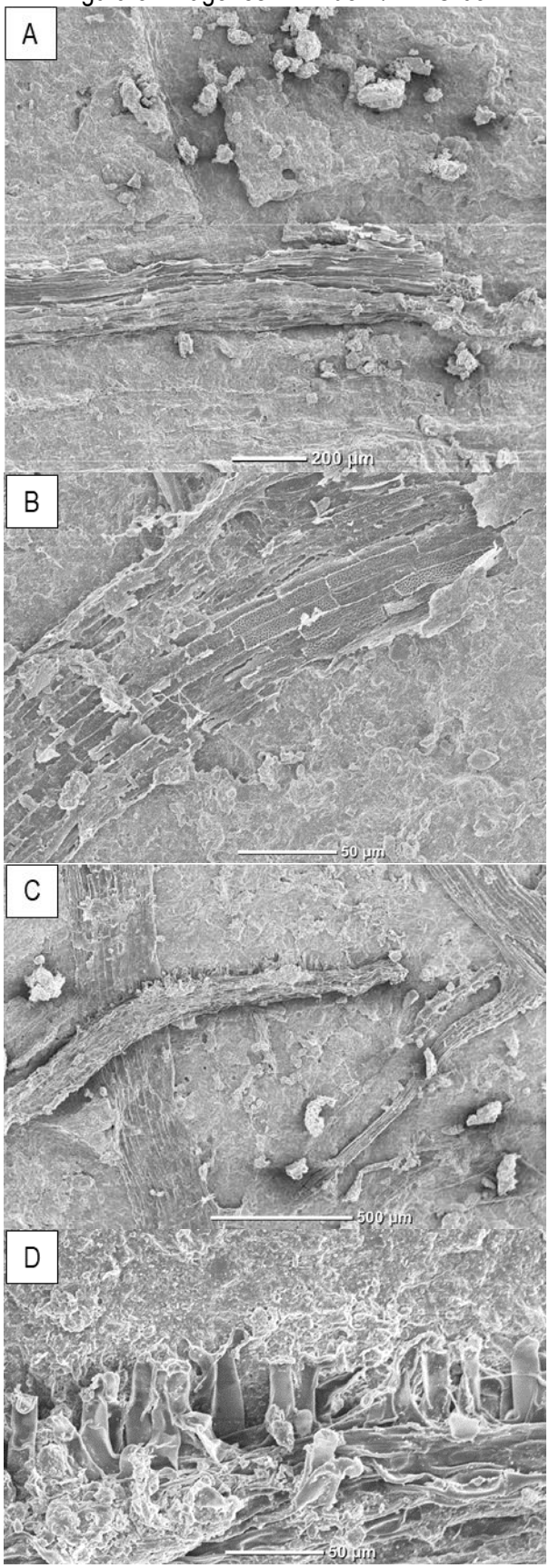

En la Figura 4A de Rr/PFYC-02/150 cm, se muestra la porosidad de la matriz arenosa con abundantes filosilicatos que recubren y cementan los granos de arena, generando una porosidad de forma irregular, aplanada e interconectada, donde los poros mayores son de 21-40 µm. En 6B se observa crecimiento radicular perforando huecos de 260 µm de radio, denotando carencia del material en resistencia mecánica para impedir el desarrollo de raíces.

Figura 4. Imágenes MEB de Rr/PFYC-02/150 cm



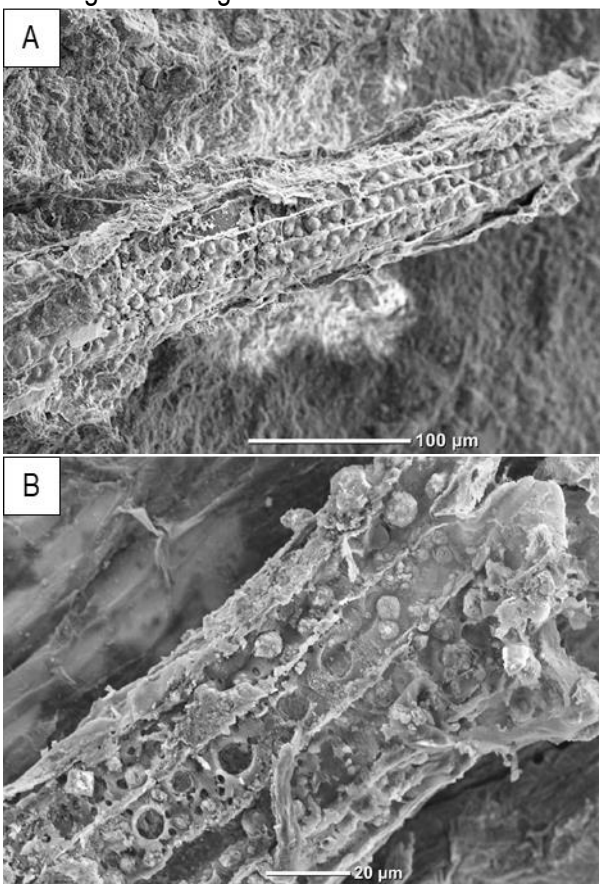

La Figura 5 de R/PFYC-03 muestra raíces aplanadas dentro de la pelita limosa masiva sin porosidad, ubicadas en planos de microfracturas al romper la roca. En 5A se observan dos canales labrados dentro de la pelita de 300 y 130 µm de ancho. En 5B se observa una raíz que ingresa por debajo del sedimento, de aproximadamente 108 µm de ancho, donde los vasos xilemáticos presentan numerosas puntuaciones. En 5C se observan raíces de 280, 145 y 108 µm, siendo esta última una porción de meristemo apical, donde se observan pelos radiculares recién formados. En 5D se aprecia que los pelos radiculares unicelulares de 13 µm de diámetro y 42 µm de longitud en promedio se encuentran en interacción directa con la roca.

Figura 5. Imágenes MEB de R/PFYC-03




En la Figura 6 de Cr/PFYC-03 se observa una raíz cilíndrica de 80 µm de diámetro promedio, que atraviesa sedimentos sin porosidad primaria. Dentro de esta raíz se pueden observar estructuras que difieren del tejido vegetal, en forma de cuerpos globos conectados por filamentos longitudinales y paralelos a modo de racimos. Dentro, las células vegetales se encuentran modificadas, ocurriendo orificios circulares correspondientes a los cuerpos globosos. Posiblemente se trate de micelio interno fúngico, conectando arbúsculos (acumulaciones o gránulos de nutrientes), por lo tanto, dada la relación con la raíz, se puede tratar de endomicorrizas.

Figura 6. Imágenes MEB de Cr/PFYC-03




### 3.6 Discusión sobre el desarrollo radicular profundo y su vínculo con los perfiles

Diversas investigaciones han planteado que el desarrollo radicular es significativamente impedido a valores de RP mayores a 1.300 y 1.500 kPa, y cesa en 2.000 kPa, pero estos valores han sido obtenidos para cultivos agrícolas, y comúnmente en suelos homogeneizados en laboratorio. No obstante, los suelos *in situ* contienen grietas explorables por las raíces[45] y, además, la RP desciende fuertemente al humedecerse el suelo, logrando que raíces de *Eucalyptus spp.* puedan crecer en suelos compactados con resistencias mayores a los 6.000 kPa[9]. En todos los casos aquí estudiados, tanto raíces gruesas como finas se encuentran superando RP de más de 5.000 KPa.

Si bien el volumen total y, en especial, las raíces gruesas disminuyen marcadamente en los horizontes B argilúvicos, en los tres casos estudiados son

un medio ampliamente explorado por raíces, aun siendo de textura fina (63% arcilla), estructuras de bloques angulares moderados a fuertes y gruesos (10-20 mm) y de espesor considerable (38 cm).

Hasta la capa C, en todos los casos las raíces gruesas y las finas se encuentran distribuidas homogéneamente, pero en las siguientes capas saprolíticas y en la capa R las fracturas o las estructuras sedimentarias pasan a determinar las vías de desarrollo radicular preferencial. En PFYC-01 las raíces finas siguen marcadamente la estratificación remanente utilizando la porosidad primaria (Figura 3) hasta el final del perfil. En PFYC-02 las raíces presentan ese comportamiento hasta la capa CrR, pero en la capa Rr, donde la DAP vuelve a descender, las raíces vuelven a ser de distribución homogénea atravesando el saprolito (Figura 4).

En PFYC-03 las raíces gruesas son más notorias hasta el Bt y se encuentran aun en la capa R con grosores mayores a los vistos en las otras calicatas con rodales de mayor edad. Esto se puede deber a que PFYC-03 presenta los menores valores de DAP en todo el perfil y a que las fracturas presentes son de mayor tamaño y cantidad. Pero estas raíces presentan adaptaciones morfológicas y funcionales que indican menor espacio de alojamiento e imposibilidad de vencer mecánicamente el medio (mayor contenido de limo y arcilla posiblemente expansible y estructura masiva de la litología), al adoptar formas planares y carencia de aire en profundidad, al presentar aerénquima. La carencia de porosidad primaria en la litología de PFYC-03 y la consiguiente limitación al espacio brindado por las fallas como medio de almacenaje de agua profunda probablemente generen una necesidad de capacidad de transporte mayor y localizada, que resulta en mayor presencia de raíces gruesas y de mayor diámetro. En los casos de PFYC-01 y 02, dados los suelos más arenosos y la porosidad primaria remanente en el saprolito, el agua sería más abundante (evidenciado por los moteados desde horizontes Bt y las líneas blancas de meteorización), facilitando el acceso a este recurso por medio de raíces finas que actúan tanto en absorción como en transporte.

El comportamiento general de los nutrientes y la CIC es de aumentar en profundidad, producto de aumentar la fracción mineral o producirse acumulaciones. En el caso del P, es remarcable que se encuentra presente en las capas profundas, llegando a valores iguales o superiores a los presentes en los horizontes Ap/AB. La presencia de nutrientes en conjunto con el aumento de volumen de exploración radicular profunda implica que las capas saprolíticas y la roca deban ser consideradas en la nutrición vegetal de este cultivo, de lo contrario se puede estar subestimando la extracción de nutrientes, así como las modificaciones en la generación de suelos y perfiles de meteorización.

Las raíces finas comprenden diámetros muy inferiores a lo visible a simple vista. Las raíces observadas por MEB y su interacción con saprolitos y rocas (aun sin porosidad) implican que se puede estar subestimando considerablemente la acción radicular profunda, más aún si se toman en cuenta las posibles asociaciones micorríticas.

## 4. Conclusiones

La presencia de raíces finas y gruesas en rodales de *E. grandis* (17 y 23 meses de edad) se ha verificado en las capas profundas en perfiles SSR arenosos y arcillosos. No fueron limitantes horizontes B argilúvicos (hasta 63% arcilla) o RP mayores a 5.000 kPa). Todos los horizontes y las capas estudiados son colonizados por raíces con funciones de absorción y transporte. No se observaron relaciones claras entre el comportamiento radicular con los parámetros físicos o químicos analizados, con excepción de la estructura de horizontes y capas. La exploración en horizontes Bt y C se desarrolla homogéneamente, pero en las capas más profundas la exploración es marcadamente condicionada por las fracturas y la porosidad remanente en los saprolitos o primaria en las rocas, por lo que serían los parámetros más útiles y prácticos a ser descritos y caracterizados en modelos. A su vez, las fracturas y la conservación de las estructuras sedimentarias son fundamentales para describir y diferenciar capas saprolíticas, por lo que se hace imprescindible un relevamiento geológico como base del estudio de perfiles SSR.

La posible relación del comportamiento radicular según la división de suelo, saprolito y roca, así como la constatación de un prolífero, diverso y adaptado sistema radicular (hasta posibles endomicorrizas) que interactúa directamente con saprolitos y rocas plantean la necesidad de reenfocar el estudio de las raíces y las capas profundas, tanto por el uso de agua y nutrientes como por el ingreso de COS profundo; así como considerar posibles modificaciones en la meteorización de las rocas y la generación de suelo forjadas por el cultivo de *Eucalyptus spp*.

**Agradecimientos**

Se agradece a CSIC por el financiamiento del Proyecto I+D 2016 “Caracterización de la Formación Yaguarí, una unidad de gran extensión en el noreste de Uruguay”, del que esta investigación fue derivada. A la empresa forestal UPM, por brindar el sitio de campo, así como la información necesaria. A la Ing. Agr. MSc Antonella Celio, por su apoyo constante en toda la gestión operativa; a la Ing. Agr. Virginia Takata, por su guía y ayuda en los análisis de suelos; a la Dra. Gabriela Speroni, por realizar los cortes histológicos, y al Dr. Jorge Hernández, por sus aportes.

Finalmente, al Dr. Jorge Bossi, por su impulso y su apoyo en abrir esta línea de investigación, así como por transmitir su pasión por la ciencia y la investigación.

**Declaración de contribución de los autores**

Sebastián Mármol creó y diseñó el estudio; recolectó la información de campo de geología, suelos y raíces; realizó los análisis de laboratorio; seleccionó las observaciones de MES; participó en la realización de los cortes histológicos; realizó el análisis de la información, y escribió el artículo.

Luis Bentancor participó en la creación y el diseño del estudio, recolectó la información de campo de suelos y guio los análisis de suelos.

Martin Francia participó en la recolección de la información de campo de geología y suelos, así como aportó ideas en esas áreas.

Andrés Hirigoyen participó en la creación del estudio y contribuyó en el análisis de los datos.

Mario Pérez Bidegain participó en la creación y el diseño del estudio, y contribuyó en la discusión de los datos.

Gonzalo Blanco participó en el análisis de la información referida a geología, así como dirigió las observaciones MES.

Marcelo Pérez participó en la recolección de la información de campo de suelos.

## References

1. Pierret A, Maeght, J-L, Clément C, Montoroi J-P, Hartmann C, Gonkhamdee S. Understanding Deep roots and their funcrions in ecosystems: an advocacy for more unconventional reserach. Ann Bot. 2016;118:621-35.

2. Laclau JP, da Silva EA, Rodrigues Lambais G, Bernoux M, le Maire G, Stape JL, Bouillet JP, Gonçalves JL, Jourdan C, Nouvellon Y. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in Eucalyptus grandis plantations. Front Plant Sci [Internet]. 2013 [cited 2022 Mar 30];4:243. doi:10.3389/fpls.2013.00243.

3. Christina M, Nouvellon Y, Laclau JP, Stape JL, Bouillet JP, Lambais GR, le Maire G. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. Funct Ecol. 2017;31:509-19.

4. Jama B, Buresh RJ, Ndufa JK, Shepherd KD. Vertical distribution of roots and soil nitrate: tree species and phosphorus effects. Soil Sci Soc Am J. 1998;62:280-6.

5. Bouillet JP, Laclau JP, Arnaud M, Thongo M’Bou A, Saint-Andre´ L, Jourdan C. Changes with age in the spatial distribution of roots of Eucalyptus clone in Congo Impact on water and nutrient uptake. For Ecol Manag. 2002;171:16-57.

6. Laclau JP, Jaques R, Gonçalves JLM, Maquere V, Krusche AV, M´Bou AT, Nouvellon Y, Saint-André L, Bouillet JP, de Cássia Piccolo M, Deleporte P. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations. Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. For Ecol Manag. 2010;259:1771-85.

7. Christina M, Laclau JP, Gonçalves JLM, Jourdan C, Nouvellon Y, Bouillet JP. Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world’s most productive forests. Ecosphere. 2011;2(3):1-10.

8. Pinheiro RC, de Deus JC Jr, Nouvellon Y, Campoe OC, Stape JL, Aló LL, Guerrini IA, Jourdan C, Laclau JP. A fast exploration of very deep soil layers by Eucalyptus seedlings and clones in Brazil. For Ecol Manag. 2016;366:143-52.

9. Laclau JP, Arnaud M, Bouillet JP, Jaques R. Spatial distribution of Eucalyptus roots in a deep sandy soil in the Congo: relationships with the ability of the stand to take up water and nutrients. Tree Physiol. 2001;21:129-36.

10. Jackson RB, Mooney HA, Schulze ED. A global Budget for fine root biomass, Surface área, and nutrient contents. Proc Natl Acad Sci USA. 1997;94:7362-6.

11. Butler AJ, Barbier N, Čermák J, Koller J, Thornily C, McEvoy C, Nicoll B, Perks MP, Grace J, Meir P. Estimates and relationships between aboveground and belowground resource exchange surface areas in a Sitka spruce managed forest. Tree Physiol. 2010;30:705-14.

12. Laclau JP, Bouillet JP, Gonçalves JLM, Silva EV, Jourdan C, Cunha MCS, Moreira MR, Saint-André L, Maquère V, Nouvellon Y, Ranger J. Mixed-species plantations of Acacia mangium and Eucalyptus grandis in Brazil. 1: Biomass allocation and net primary production. For Ecol Manag. 2008;255:3905-17.

13. O'Grady AP, Worledge D, Battaglia M. Above- and below-ground relationships, with particular reference to fine roots, in a young Eucalyptus globulus (Labill.) stand in southern Tasmania. Trees. 2006;20:531-8.

14. da Silva EV, Bouillet JP, Gonçalves JLM, Abreu CH, Hinsinger P, Jourdan C, Nouvellon Y, Stape JL, Laclau JP. Functional specialization of Eucalyptus fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths. Funcl Ecol. 2011;25:996-1006.

15. Marsden C, Nouvellon Y, Laclau JP, Corbeels M, McMurtrie RE, Stape JL, Epron D, le Maire G. Modifying the G'DAY process-based model to simulate the spatial variability of Eucalyptus plantation growth on deep tropical soils. For Ecol Manag. 2013;301:112-28.

16. Zamalvide JP, Ferrando M. Algunas consideraciones generales en relación al tema "fertilización de eucaliptos". In: Ferrando M, editor. Jornadas de Actualización Técnica: 10 años de investigación en producción forestal: productividad y preservación de los recursos suelo y agua. Montevideo: Universidad de la República; 2010. p. 38-42.

17. Hernández J. Evolución de parámetros químicos de suelos bajo forestación: acidez, bases, materia orgánica. In: Ferrando M, editor. Jornadas de Actualización Técnica: 10 años de investigación en producción forestal: productividad y preservación de los recursos suelo y agua. Montevideo: Universidad de la República; 2010. p. 16-9.

18. Durán A, García Préchac F. Capacidad de uso de la tierra. In: Durán A, García Préchac F, editors. Suelos del Uruguay: origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo: Hemisferio Sur; 2007. p. 249-354.

19. Jobbágy EG, Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecol Appl. 2002;10:423-36.

20. Dye PJ. Response of Eucalyptus grandis trees to soil water deficits. Tree Physiol. 1996;16:233-8.

21. Bossi J, Ferrando LA. Carta Geológica del Uruguay. Montevideo: Geoeditores; 2001. 1:500.000; color.

22. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, DSF (UY). Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo: MGAP; 1976. 1:1.000.000; color.

23. Tucker ME. Field techniques. In: Tucker ME, editor. Sedimentary rocks in the field. Chichester: Wiley; 2003. p. 16-7.

24. Miall A. Lithofacies. In: Miall A, editor. The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology. London: Springer; 2006. p. 99-130.

25. Miall A. The facies and architecture of fluvial systems. In: Miall A, editor. Fluvial depositional systems. Cham: Springer; 2014. p. 9-68.

26. Miall A. Facies models. In: Miall A, editor. Stratigraphy: a modern synthesis. New York: Springer; 2016. p. 161-85.

27. Guía para la descripción de suelos. Roma: FAO; 2006. 99p.

28. McKay LD, Driese SG, Smith KH, Vepraskas MJ. Hydrogeology and pedology of saprolite formed from sedimentary rock, eastern Tennessee, USA. Geoderma. 2005;126:27-45.

29. Pedron FA, Azevedo CA, Simão R, Dalmolin RSD, Stürmer SLK, Menezes FP. Morfologia e classificação taxonômica de neossolos e saprolitos derivados de rochas vulcânicas da formação serra geral no rio grande no sul. Rev Bras de Ciênc Solo. 2009;33:119-28.

30. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, DGRN (UY). Manual de descripción, muestreo de suelos y análisis de laboratorio. Montevideo: MGAP; 2014. 102p.

31. Pedron FA, Fink JR, Dalmolin RSD, Azevedo CA. Morfologia dos contatos entre solo-saprolitorocha em neossolos derivados de arenitos da formação caturrita no rio grande do sul. Rev Bras de Ciênc Solo. 2010;34:1941-50.

32. Bouyoucos GJ. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agron J. 1962;54:464-5.

33. Walkley A, Black A. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 1934;37:29-38.

34. Isaac RA, Kerber JD. Atomic absorption and flame photometry: techinques and uses in soil, plant and wáter analysis. In: Instrumental methods for analysis of soils and plants tissues. Madison: Soil Science Society of America; 1971. p. 17-37.

35. Bray RH, Kurtz LT. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. Soil Sci. 1945;59:39-45.

36. Califra AI. Alternativa predictiva de la saturación en bases en suelos ácidos [master's thesis]. Montevideo (UY): Universidad de la República, Facultad de Agronomía; 2012. 93p.

37. García F, Kaplán A. Evaluación de un método para determinar densidad aparente, macroporosidad y microporosidad en el suelo [grade's thesis]. Montevideo (UY): Universidad de la República, Facultad de Agronomía; 1974. 49p.

38. McCormack ML, Dickie IA, Eissenstat DM, Fahey TJ, Fernandez CW, Guo D, Helmisaari HS, Hobbie EA, Iversen CM, Jackson RB, Leppälammi-Kujansuu J, Norby RJ, Phillips P, Pregitzer KS, Pritchard SG, Rewald B, Zadworny M. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. New Phytol. 2015;207:505-18.

39. Bossi J, Navarro R. Subgrupo Yaguari-Buena Vista. In: Geología del Uruguay. Vol. 2. Montevideo: Universidad de la República; 1991. p. 577-629.

40. de Santa Ana H, Goso C, Daners G. Cuenca Norte: estratigrafía del Carbonífero – Pérmico. In: Veroslavsky G, Ubilla M, Martínez S, editors. Cuencas sedimentarias de Uruguay: geologia, paleontología y recursos naturales Paleozoico. Montevideo: DIRAC; 2006. p. 147-208.

41. Ernesto M, Nuñez Demarco P, Xavier P, Sanchez L, Schultz C, Piñeiro G. Age constraints on the Paleozoic Yaguarí-Buena Vista succession from Uruguay: paleomagnetic and paleontologic information. J South Am Earth Sci. 2019;98:1-13.

42. Altamirano A. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: clasificación de suelos. Montevideo: MGAP; 1976. 96p.

43. Califra A, Durán A. Suelos de aptitud forestal: criterios para su selección, área de distribución, características morfológicas, físicas y químicas. In: Ferrando M, editor. Jornadas de Actualización Técnica: 10 años de investigación en producción forestal: productividad y preservación de los recursos suelo y agua. Montevideo: Universidad de la República; 2010. p. 1-5.

44. Grant JC, Doland Nichols J, Ling Yao R, Smith RGB, Brennan PD, Vanclay JK. Depth distribution of roots of Eucalyptus dunnii and Corymbia citriodora subsp. variegata in different soil conditions. For Ecol Manag. 2012;269:249-58.

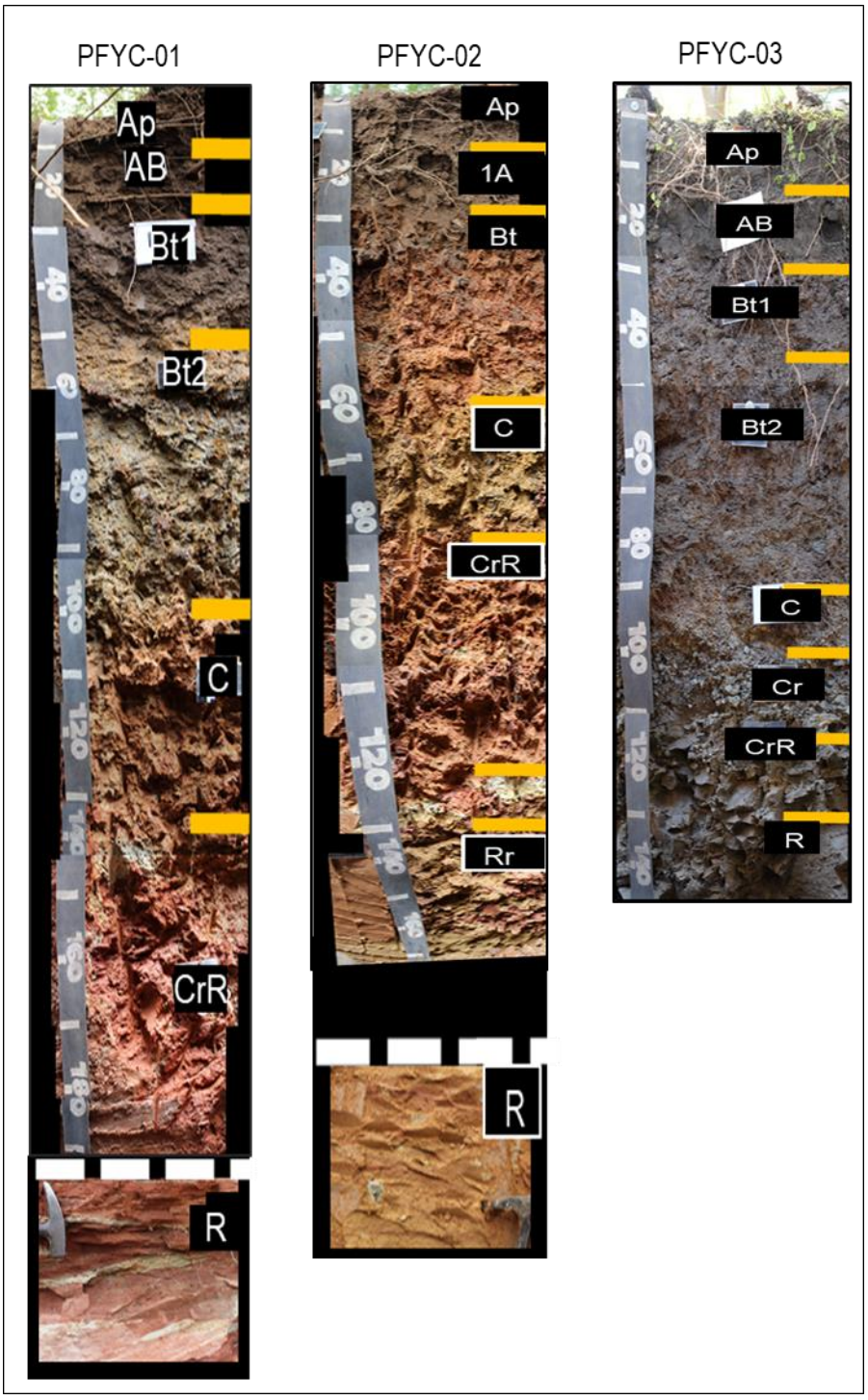
45. Sinnett D, Morgan G, Williams M, Hutchings TR. Soil penetration resistance and tree root development. Soil Use Manag. 2008;24(3):273-80.

## Material complementario

Figura 1. Litofacies definidas para este trabajo y su descripción resumida

| Código | Descripción |
|---|---|
| **cSGtn** | Arenisca gruesa a conglomerádica, estratificación cruzada en artesa y gradación normal |
| **Gi** | Conglomerado intraformacional |
| **Ge** | Conglomerado extraformacional |
| **Gtn** | Arenisca conglomerádica, estratificación cruzada en artesa incipiente y gradación normal |
| **cSGtie** | Arenisca gruesa a conglomerádica, estratificación cruzada en artesa, intraclastos y exoclastos |
| **mfSpp** | Arenisca media a fina, estratificación cruzada planar |
| **mfSh** | Arenisca media a fina, estratificación flaser |
| **mfSf** | Arenisca media a fina, estratificación flaser |
| **mfShc** | Arenisca media a fina, estratificación plano paralela interestratificadas y a veces concreciones carbonáticas |
| **Fm** | Pelita arenosa masiva |
| **fmSr** | Areniscas finas a medias, ondulitas |
| **fSt** | Areniscas finas, estratificación cruzada en artesa |
| **vfSp** | Areniscas muy finas, estratificación cruzada planar |
| **vfShf** | Areniscas muy finas, estratificación horizontal-laminada y flaser |
| **vfSga** | Areniscas muy finas y finas, estratificación cruzada *herringbone* y/o superficies de reactivación |
| **vfShf** | Areniscas muy finas, estratificación horizontal-laminación y a veces con estratificación flaser |
| **Fhf** | Pelita arenosa con estratificación horizontal, laminación y estratificación flaser |
| + | Asociación de facies |

Figura 2. Perfiles SSR de calicatas PFYC-01 a 03






View publication stats