

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

ANÁLISIS DE CÁRCAVAS MEDIANTE UN ENFOQUE QUE INTEGRA  
CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS, EDAFOLÓGICAS, DE USO Y MANEJO  
DE SUELOS EN SITIOS UBICADOS EN EL DEPARTAMENTO DE CERRO  
LARGO

por

Santiago RIVAS NAVONE

TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2023

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. Mag. Antonella Celio Cioli

Co director: -----

Ing. Agr. Mag. Carlos Clérico

Tribunal: \_\_\_\_\_

Ing. Agr. Mag. Antonella Celio Cioli

\_\_\_\_\_

Ing. Agr. Mag. Carlos Clérico

\_\_\_\_\_

Dra. Leticia Chiglino

Fecha: 31 de marzo de 2023

Autor: -----

Santiago Rivas Navone

## AGRADECIMIENTOS

A mis viejos, Andrea y Eduardo, mi hermano Gonzalo y a María Emilia que fueron el soporte y motivación para seguir.

En particular a Sebastián Mármol que fue quien me acercó a esta investigación y despertó mi interés. Sin su participación esto no sería posible.

A mis tutores, Antonella y Carlos, por prestarse para esta investigación y guiarme en el armado de la misma, además de conseguir los recursos necesarios para llevarla a cabo.

A los productores entrevistados, Yonatan Maza, Robert y Osvaldo Olivera, los cuales aportaron información de gran valor para esta investigación.

A Julián Terra por su enorme colaboración en la elaboración de mapas, figuras, y diseño gráfico de este trabajo.

A mis amigas y amigos, que siempre están.

A Tina, por tantas horas de estudio compartidas.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN .....	.II
AGRADECIMIENTOS .....	.III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES .....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	2
2.1 GÉNESIS DEL PROCESO EROSIVO .....	2
2.1.1 <u>Descripción morfológica de las cárcavas</u> .....	3
2.1.2 <u>Causas y factores desencadenantes</u> .....	6
2.1.3 <u>Métodos de control</u> .....	13
2.2. EL SISTEMA RADICULAR DE LOS ÁRBOLES .....	25
2.2.1 <u>Generalidades</u> .....	25
2.2.2 <u>Sistema radicular profundo</u> .....	26
2.2.3 <u>Las raíces y la estabilidad del suelo</u> .....	29
2.2.4 <u>Interacciones raíces - microorganismos</u> .....	31
2.2.5 <u>Nuevo enfoque, perfil de suelo - saprolito - roca</u> .....	33
2.3 SITIOS FORESTALES .....	35
2.3.1 <u>La importancia del subsuelo</u> .....	36
2.3.2 <u>Legislación ambiental</u> .....	37
2.4 GEOLOGÍA ..	37
2.4.1 <u>Formación Yaguarí</u> .....	39
2.4.2 <u>Formación Buena vista</u> .....	41
2.4.3 <u>Hidrogeología</u> .....	44

3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	45
3.1 UBICACIÓN .....	45
3.2 ANTECEDENTES .....	46
3.2.1 <u>Clima</u> .....	46
3.2.2 <u>Topografía e hidrografía</u> .....	46
3.2.3 <u>Geología</u> .....	48
3.2.4 <u>Suelos</u> .....	50
3.2.4.1 Unidades de suelos del Uruguay .....	50
3.2.4.2 Grupos de suelos CONEAT .....	51
3.3 ELECCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO.....	54
3.4 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA .....	55
3.5 CARACTERIZACIÓN EDAFOLÓGICA.....	55
4. <u>RESULTADOS</u> .....	57
4.1 SITIO A .....	57
4.1.1 <u>Relevamiento geológico</u> .....	58
4.1.2 <u>Relevamiento edafológico</u> .....	59
4.1.3 <u>Descripción de cárcavas</u> .....	63
4.2 SITIO B .....	64
4.2.1 <u>Relevamiento geológico</u> .....	65
4.2.2 <u>Perfil SSR (suelo/saprolito/roca)</u> .....	67
4.2.3 <u>Relevamiento edafológico</u> .....	71
4.2.4 <u>Descripción de cárcavas</u> .....	75

4.3 SITIO C .....	77
4.3.1 <u>Relevamiento geológico</u> .....	79
4.3.2 <u>Perfil SSR (suelo - saprolito - roca)</u> .....	81
4.3.3 <u>Relevamiento edafológico</u> .....	81
4.5.2 <u>Descripción de cárcavas</u> .....	85
4.4 CARACTERÍSTICAS DEL PAISAJE .....	87
4.5 DISCUSIÓN .....	89
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	91
5.1 CONCLUSIONES .....	91
5. 2 CONSIDERACIONES PRELIMINARES .....	92
6. <u>RESUMEN</u> .....	93
7. <u>SUMMARY</u> .....	94
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	95
9. <u>ANEXOS</u> .....	102

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Clasificación y relación según profundidad y cuenca .....	4
2. Modelo USLE/RUSLE.....	15
3. Descripción perfil modal sitio A .....	60
4. Resultados de bases totales y materia orgánica sitio A .....	62
5. Resultados texturales del sitio A .....	62
6. Descripción perfil geológico sitio B .....	66
7. Descripción perfil SSR .....	68
8. Descripción perfil modal sitio B .....	72
9. Resultados de bases totales y materia orgánica sitio B .....	74
10. Resultados texturales del sitio B .....	74
11. Descripción perfil geológico sitio C .....	80
12. Descripción perfil modal del sitio C .....	82
13. Resultados de bases totales y materia orgánica sitio C .....	84
14. Resultados texturales del sitio C .....	84
Figura No.	
1. Dimensiones de una cárcava .....	3
2. Descripción morfológica de una cárcava.....	5
3. Etapas del proceso erosivo .....	7
4. Mapa de Isoerodentas .....	9
5. Riesgo de degradación de los suelos .....	10
6. Tipos de erosión .....	11
7. Pendiente de la pared de una cárcava .....	18
8. Cercamiento de la cárcava con diferentes especies .....	23
9. Suelo y raíces como material compuesto .....	30
10. Porcentaje de supervivencia con y sin inoculación .....	32
11. Columna estratigráfica de la cuenca Norte .....	38
12. Ubicación de los sitios de estudio .....	45
13. Carta topográfica y sitios de estudio .....	47
14. Carta geológica y sitios de estudio .....	48
15. Carta de reconocimientos de suelos y sitios de estudio .....	51
16. Grupos de suelos CONEAT .....	52
17. Ubicación sitio A .....	57

18. Relieve general, y tapiz herbáceo del sitio A .....	58
19. Localización muestreo geológico del sitio A .....	59
20. Localización perfiles edafológicos del sitio A .....	59
21. Perfil modal sitio A .....	61
22. Tapiz herbáceo general en el contorno de la cárcava .....	63
23. Canalículos .....	63
24. Ubicación sitio B .....	64
25. Relieve general del sitio B .....	65
26. Localización muestreo geológico del sitio B .....	65
27. Perfil geológico sitio B .....	67
28. Pared donde se realizó el perfil SSR .....	68
29. Localización perfiles edafológicos del sitio B .....	71
30. Perfil modal sitio B .....	73
31. Cabeza de la cárcava .....	75
32. Pared Oeste .....	76
33. Pared Este .....	76
34. Huellas de ganado .....	77
35. Ubicación del sitio C .....	78
36. Relieve general de la zona del sitio C .....	78
37. Localización muestreo geológico del sitio C .....	79
38. Perfil geológico sitio C .....	81
39. Localización perfiles edafológicos del sitio C .....	82
40. Perfil modal sitio C .....	83
41. Cárcava sitio C .....	85
42. Cárcava sitio C .....	86
43. Cárcava sitio C .....	86

44. Características del paisaje general .....	87
45. Cercamiento de cárcava con vegetación leñosa .....	88
46. Presencia de árboles en el paisaje .....	88

## 1. INTRODUCCIÓN

Los suelos son un importante recurso natural con gran influencia sobre el medio ambiente, la economía local, regional y mundial. De ellos dependen, en gran medida, la supervivencia y el bienestar de la población actual y las generaciones futuras. Son la base de la seguridad alimentaria y las funciones ecosistémicas fundamentales e insustituibles; regulan la dinámica y calidad del agua, de los nutrientes y del aire, y hospedan el 25% de la biodiversidad del planeta.

Una de las principales amenazas para los suelos es la erosión. Este fenómeno significa, pérdida de las fracciones “más ricas” del suelo en una parte del paisaje, y deposición en otras. Es decir que no solo afecta al sitio en el cual se pierde el suelo, sino también al lugar en donde se depositan las partículas transportadas. Se necesitan aproximadamente cientos de miles de años para formar un centímetro de suelo según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2015), pudiéndose perder en pocos años.

Se distinguen tres tipos de erosión: hídrica, eólica, y por labranza. Este trabajo de tesis se enfoca en la erosión hídrica, y particularmente, en su estado más avanzado, que se denomina cárcavas.

Definir la génesis y las características de las cárcavas, es la base para gestionar adecuadamente las medidas de manejo y control. La mejor estrategia radica en la prevención, atacando el problema en sus etapas iniciales.

La zona donde se lleva a cabo la investigación se encuentra ubicada al Noreste del Departamento de Cerro Largo, donde los suelos carecen de una descripción que abarque la caracterización edafológica y geológica, considerando el perfil de meteorización, lo cual trae problemas a la hora de pensar en la sostenibilidad del recurso, y en el desarrollo de actividades productivas que afectan una mayor profundidad en el perfil de los mismos.

El objetivo general de la presente investigación es adicionar características geológicas a los tradicionales enfoques edafológicos, utilizando un enfoque integrador que contemple el suelo, el saprolito y la roca. Con el fin de comprender a través de descripciones más completas el comportamiento del suelo, y en función de las mismas recomendar medidas de manejo y control.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. GÉNESIS DEL PROCESO EROSIVO

Bravo Espinosa et al. (2010) citan la definición elaborada por La Sociedad de Conservación del Suelo y el Agua (SCSA) en 1982, *“Una cárcava es un canal natural o incisión causado por un flujo de agua concentrado, a través del cual fluye la escorrentía durante o inmediatamente después de un evento intenso de lluvia”*.

En un marco global FAO (2015) entiende que, las cárcavas son tales, cuando la profundidad y el ancho inhabilitan el normal acceso de la maquinaria agrícola.

Según Sganga (1999a) la cárcava es la expresión máxima de degradación de la tierra, resultante de la erosión hídrica. Hudson, citado por Sganga (1999a), las describe como *“un curso de agua incisivamente inscripto en la ladera, sujeto a avenidas intermitentes durante las tormentas (curso seco).”*

La pérdida masiva de suelo orgánico, determina en el paisaje un microrelieve de cárcavas. La erosión hídrica en las etapas iniciales es laminar, con la formación de canalículos, donde se concentran las aguas de escurrimiento. Según la definición nacional, la profundización de estos canalículos a más de 20 cm de profundidad y 1 m de ancho, da lugar a la etapa inicial de una cárcava (MGAP. DGRNR, 1999).

Valentin et al., citados por Bravo Espinosa et al. (2010) *“los procesos erosivos en cárcavas afectan negativamente su área cercana, reduciendo áreas agrícolas, de pastoreo y forestales, dañando la infraestructura ubicada aguas abajo; contaminan cuerpos de agua superficiales y abaten el nivel freático de las corrientes”*

Los sedimentos transportados durante un proceso erosivo son los principales contaminantes de aguas superficiales a escala global (FAO, 1997), de permanecer en suspensión y llegar por afluentes a cuerpos de agua mayores. Controlar la erosión es la mejor manera de proteger las aguas superficiales. En Uruguay la erosión del suelo aporta el 80% de la contaminación del Río Santa Lucía (García Préchac et al., 2013). Es evidente que el problema generado no afecta solo al lugar físico donde ocurre, sino que tiene implicancias en la contaminación de los cursos de agua.

El relieve generado por una cárcava, nunca puede ser disimulado. En el mejor de los casos, si es normalizado, permitirá el pasaje de las herramientas de cultivo. Esto significa que, a la pérdida de suelo, con su consiguiente deterioro de productividad, se agrega una disminución de la calidad del relieve, haciéndolo más dificultoso para el manejo agropecuario, sobre todo en lo que tiene que ver con las medidas de conservación de suelos: se pierde libertad en la elección de alternativas de uso de la tierra (Sganga, 1999a).

### 2.1.1. Descripción morfológica de las cárcavas

Autores internacionales consideran a las cárcavas como tales, con más de 50 cm de profundidad, concediendo el término de cárcavas efímeras, para los primeros estados (Bocco, citado por Sganga, 1999a).

También se acuña el término de cárcavas continuas y discontinuas (Leopold et al., Bocco, citados por Sganga, 1999a) y de "estadios", en relación a los horizontes del suelo que va afectando al profundizar y a los procesos de activación y fijación (Ireland, Bocco, citados por Sganga, 1999a).

Sganga (1999a) acota que, para la descripción y dimensionado de una cárcava se utilizan los elementos expresados en la figura 1, la longitud ( $l$ ), la altura o profundidad ( $h$ ), el ancho ( $a$ ) y también las características o formas seccionales  $w_i$  (talweg interior) y  $w_e$  (talweg exterior).



Figura 1. Dimensiones de una cárcava

Fuente: tomado de Sganga (1999a).

La sección, dada por el ancho y el declive de los taludes, tiende a la forma de “V” en los suelos diferenciados y de “U” en los indiferenciados (Suárez de Castro, citado por Sganga, 1999a).

En la carta nacional de la erosión antrópica (MGAP. DGRNR, 1999), se distinguen las cárcavas poco profundas o incipientes (0.2 - 0.5 m), algo profundas (0.5 - 1m) y profundas (mayores a 1 m).

Suárez de Castro, citado por Sganga (1999a) las caracteriza de acuerdo a la extensión de su vertiente y profundidad:

Cuadro 1. Clasificación y relación según profundidad y cuenca

<b>POR PROFUNDIDAD</b>	<b>POR VERTIENTE (CUENCA)</b>
<b>Profundas:</b> mayores a 5 m	<b>Grandes:</b> mayores a 20 há.
<b>Medianas:</b> 1 - 5 m	<b>Medianas:</b> 2 - 20 há.
<b>Pequeñas:</b> menores a 1 m	<b>Pequeñas:</b> menores a 2 há

Fuente: adaptado de Sganga (1999a).

Se entiende, que tiende a existir relación directa entre la profundidad y el tamaño de la cuenca. El avance de la cárcava está relacionado con el tamaño de la cuenca por algunos autores. Seginer, citado por Sganga (1999a), plantea la fórmula  $E \text{ (avance)} = C.Ah$ , donde A es el área de la cuenca y, C y h constantes. Por su parte Riley, citado por Sganga (1999a), estudia el fenómeno en Australia, determinando el umbral de aparición de la cárcava en el paisaje, relacionándolo a la pendiente y al tamaño de la cuenca.

La distribución horizontal sigue los patrones de drenaje, dependiendo del suelo, su uso, y de la naturaleza geológica del subsuelo (Bocco, citado por Sganga, 1999a). Según Sganga (1999a) en Uruguay los sustratos cristalinos alterados, generan formas dendríticas (ramificadas) y los sedimentos homogéneos, con tierras afectadas por erosión antrópica, tienden a formas paralelas o angulosas, siguiendo el padrón de laboreo.

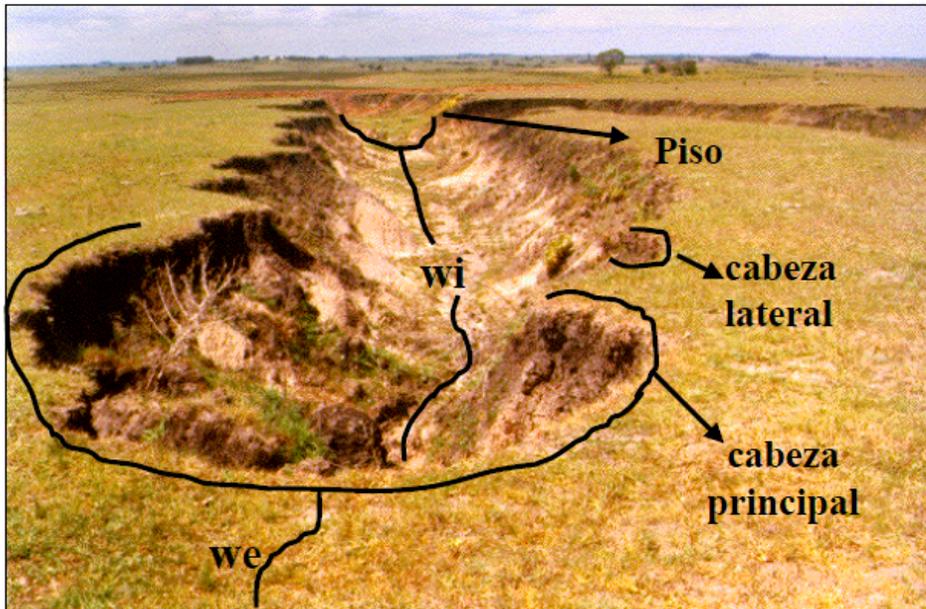


Figura 2. Descripción morfológica de una cárcava

Fuente: tomado de Sganga (1999a).

Sganga (1999a) define que las formas de drenaje se marcan en los talweg, línea donde confluyen las aguas de escurrimiento superficial (figura 2). Interesa distinguir entre el talweg interior (wi) que puede ser lineal y activo (erosivo) o consolidado por la vegetación (piso o fondo de cárcava) y el exterior (we), que marca el futuro avance de la cárcava.

Según Sganga (1999a) *“una cárcava está activa cuando la erosión hídrica es manifiesta, observándose un crecimiento en todas las dimensiones de la misma (largo, ancho y profundidad), e inactiva o fijada, cuando por efecto de la protección vegetal, estos incrementos tienden a ser nulos. La presencia de un piso, de una cabeza y de taludes de cárcava cubiertos de vegetación define esta condición de inactiva. La cabeza de la cárcava es el mejor indicador del estado de actividad. Por esta razón, interesa particularmente conocer sus características. El avance de ésta determina el crecimiento en longitud de la misma y consecuentemente el aumento en el resto de sus dimensiones”*.

El servicio de conservación de suelos de Estados Unidos recomendó la comparación del ancho superior contra la profundidad, como un método para predecir el ancho de una cárcava (Sganga, 1999a). A su vez, la profundidad también mostró una relación lineal con la longitud de la cárcava (Bravo Espinosa et al., 2010).

Stocking y Murnaghan, citados por Bravo Espinosa et al. (2010) mencionan que, el perfil de la longitud de la cárcava es un criterio para establecer la morfología de la misma y el estado de su desarrollo.

### 2.1.2. Causas y factores desencadenantes

Según Bocco y Strunk, citados por Bravo Espinosa et al. (2010) “*Las cárcavas se forman debido a las actividades antropogénicas y factores físicos como son el uso inapropiado del suelo y de la vegetación, sobrepastoreo, construcción de caminos, senderos creados por animales o vehículos, intensidad y cantidad de lluvia, topografía, tamaño y forma de la cuenca, longitud y gradiente de laderas, y características del suelo, entre otros*”.

El principal agente erosivo en Uruguay es el agua, siendo el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo lo que provoca la desagregación de las partículas que forman los agregados. El salpicado del material desagregado generado por el impacto de las gotas de lluvia, es el comienzo del proceso de transporte.<sup>1</sup>

Si la intensidad de la lluvia supera la velocidad de infiltración, se genera escurrimiento superficial, que es el mayor agente de transporte del material desagregado. En las partes bajas del paisaje, en los que el escurrimiento superficial pierde velocidad, se produce la sedimentación del material transportado, lo cual provoca la colmatación de cauces y cuerpos de agua, reduciendo su capacidad de regulación hidrológica y resultando en desbordes y crecientes más frecuentes.

La infiltración es la entrada de agua al suelo desde la superficie, la tasa de infiltración puede estar limitada por las características de la precipitación, o del suelo (Califra y Durán, 2010). La cantidad, duración, intensidad y el padrón de distribución de las lluvias, determinan las características del evento.<sup>1</sup>

Las propiedades del suelo que afectan la tasa de infiltración son: textura (relación macro/microporo), la conductividad hidráulica, la estructura, el contenido de agua antecedente (influencia de la época del año), características de la superficie, y la secuencia de horizontes.

---

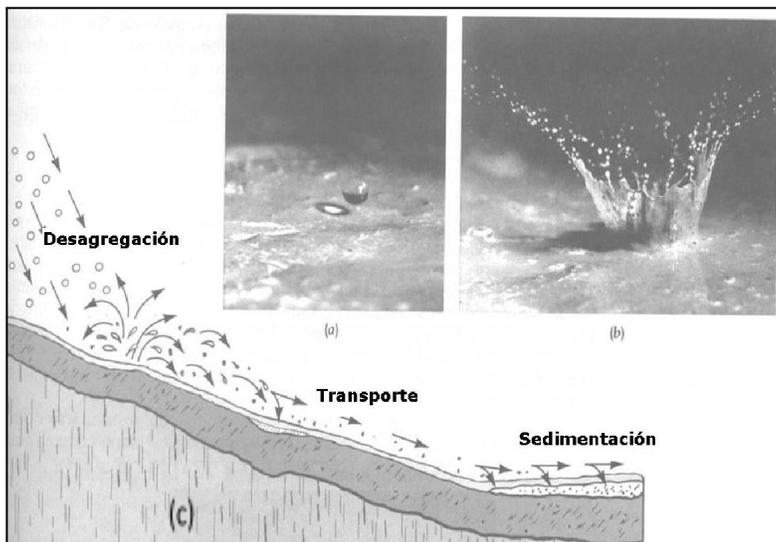
<sup>1</sup> García Préchac, F. 2019. Erosión y degradación de suelos. Montevideo. 100 p. (sin publicar).

El ser humano al hacer uso del suelo para la producción agrícola, influye en las características físicas y químicas de este, generando acciones que favorecen la infiltración de agua en el suelo, y otras que generan lo contrario.

Las prácticas de manejo que favorecen la infiltración son aquellas que promueven la buena estructura del suelo; aportando materia orgánica, favoreciendo el aireado en el perfil gracias a los canales generados por las raíces y la fauna del suelo, facilitando el buen drenaje debido a una correcta relación macro/micro poros.

Mientras que, las acciones que determinan una menor infiltración son aquellas que destruyen la estructura del suelo, es decir que se reduce la cantidad de macroporos. Las calles y los caminos, el laboreo frecuente, y el tránsito de maquinaria en condiciones de suelos con alta humedad, se traducen como suelos compactados.

Se puede dividir el proceso erosivo en tres etapas: desagregación, transporte y sedimentación (figura 3).



Representación esquemática de los procesos que conforman la erosión hídrica (c), y fotografías de una gota de lluvia a punto de impactar el suelo (a) y de las consecuencias de dicho impacto (b).

Figura 3. Etapas del proceso erosivo

Fuente: adaptado de Brady y Weil (2002).

El otro concepto a desarrollar para entender el proceso de la erosión es el del escurrimiento. Se puede definir como *“la cantidad de la precipitación que fluye sobre la superficie hacia cursos de agua, lagos y océanos luego que la interceptación, evapotranspiración, infiltración, almacenamiento superficial y retardo superficial son satisfechos. Puede incluir el flujo subsuperficial”*.<sup>2</sup>

Los factores que regulan este proceso son: la velocidad de infiltración, cuanto mayor sea esta menos agua escurre y menor erosión se generará. La permeabilidad, saturado el horizonte A la infiltración pasa a depender de la permeabilidad (cuanto más profundo es con menos frecuencia se saturará y menos veces la infiltración se verá limitada por la permeabilidad del horizonte Bt).

La topografía de la zona es muy importante, se debe tener en cuenta el largo y el grado de inclinación de las pendientes, longitudes e inclinaciones mayores, presentan mayores riesgos de erosión. La presencia de vegetación, la influencia de la misma dependerá de la especie, la densidad y el estado de crecimiento.

A lo largo de los años se han estudiado las consecuencias de la erosión, el desarrollo de la investigación se enfocó en predecir la misma. De esta forma nacen los modelos que estiman la pérdida de suelo. En Uruguay se ajustó y validó la ecuación universal de pérdida de suelo/ ecuación universal de pérdida de suelo revisada (USLE/RUSLE). Este modelo empírico se basa en que la erosión es función de la erosividad y de la erodabilidad.

La erosividad es el potencial de la lluvia de causar erosión, y depende de las características físicas de la lluvia. La lluvia y su escurrimiento asociado aportan la energía que estará disponible para realizar los trabajos involucrados en el proceso erosivo.

El índice o factor de erosividad de las lluvias en el modelo USLE/RUSLE, estima el poder erosivo promedio anual de las lluvias, y su distribución. El mismo crece de Sur a Noreste en el país (Durán y García Préchac, 2007).

En la figura 4 se observan los diferentes índices de erosividad que existen en el territorio. Los siguientes fueron elaborados con una serie de 30 años (1980-2010) en 29 localidades diferentes.

---

<sup>2</sup> Pérez Bidegain, M. 2019. Escurrimiento. Montevideo. 46 p. (sin publicar).

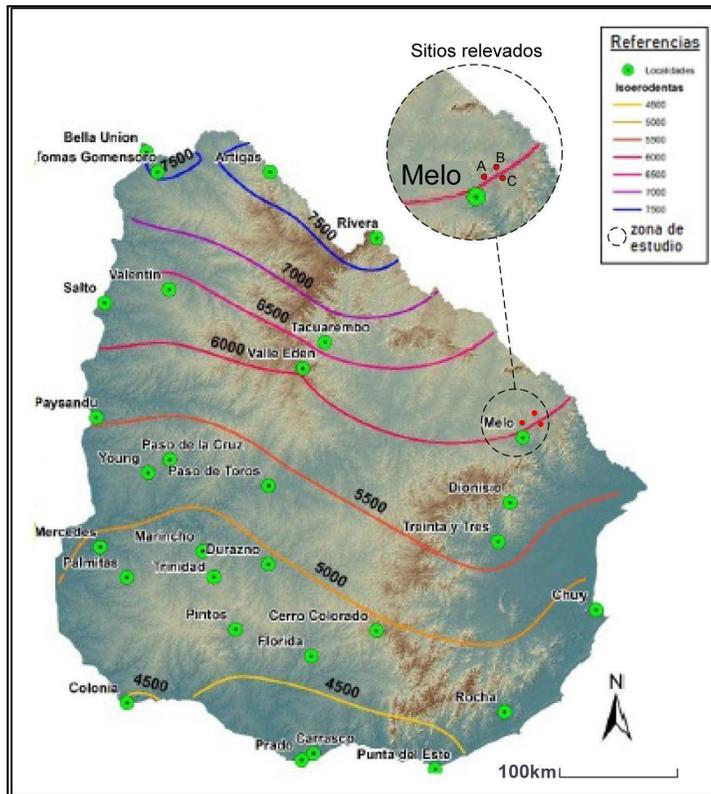


Figura 4. Mapa de Isoerodentas

Fuente: modificado de García Préchac et al. (2018).

Los sitios de estudio se encuentran en una zona en la cual las lluvias poseen un poder erosivo con valores intermedios (figura 4).

En promedio en el Sur llueve menos que en el Norte, por lo tanto, habrá mayor energía cinética hacia el Norte (mayor masa e intensidad, medidas en 30 minutos). La erosividad para una determinada localidad varía con la época del año, presentando valores máximos en otoño y primavera.

Por otra parte, se debe definir la erodabilidad. Es decir, la vulnerabilidad o susceptibilidad del suelo a sufrir erosión.

Las causas que influyen en la mayor o menor erodabilidad del suelo son las características físicas (textura, estructura y permeabilidad), contenido de agua en el suelo, topografía (longitud y pendiente), y el uso y manejo al que el suelo es sometido.

Como se observa en el mapa, los suelos en la zona de estudio presentan alto riesgo de degradación (figura 5). A pesar de sus profundos horizontes A, los mismos presentan estructuras pobres lo cual determina una mayor vulnerabilidad del suelo.

Se trata de un proceso que comienza cuando las gotas de lluvia golpean los agregados de tierra desarmándolos, las partículas resultantes comienzan un proceso de transporte (mediante el salpicado) hacia zonas donde el escurrimiento disminuye, y son depositadas.

Durante el proceso de transporte el fenómeno erosivo va mutando, dependiendo de las características físicas del suelo, de la geología y topografía del lugar, del uso y manejo previo que se le haya dado al sitio, y de las condiciones climáticas.

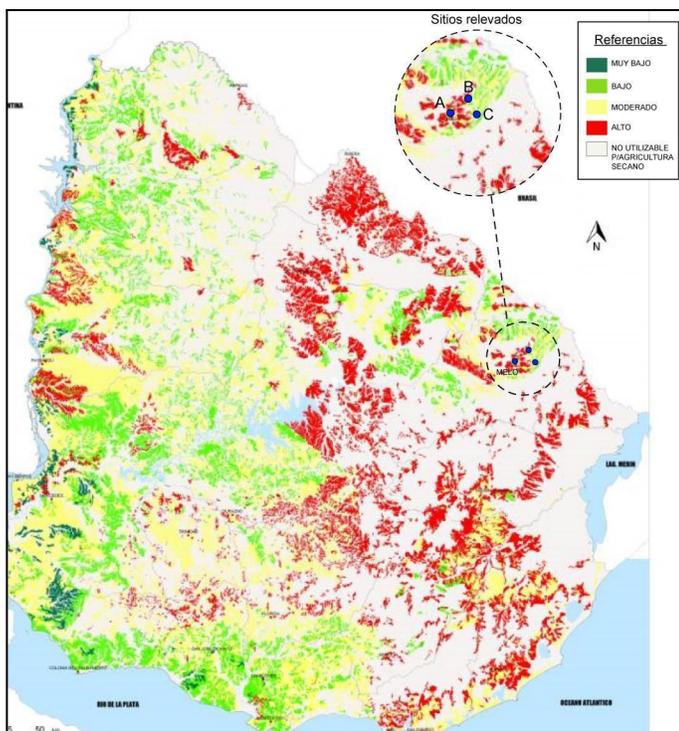


Figura 5. Riesgo de degradación de los suelos  
Fuente: modificado de MGAP. DGRNR (2008).

Se pueden diferenciar tres formas de erosión hídrica: laminar, encauzada, y zanjas o cárcavas (figura 6). Ésta última es la etapa más avanzada de la erosión hídrica. La combinación de los factores antes mencionados son el desencadenante de estas situaciones, lo cual lo hace un fenómeno altamente variable en el tiempo y el espacio.

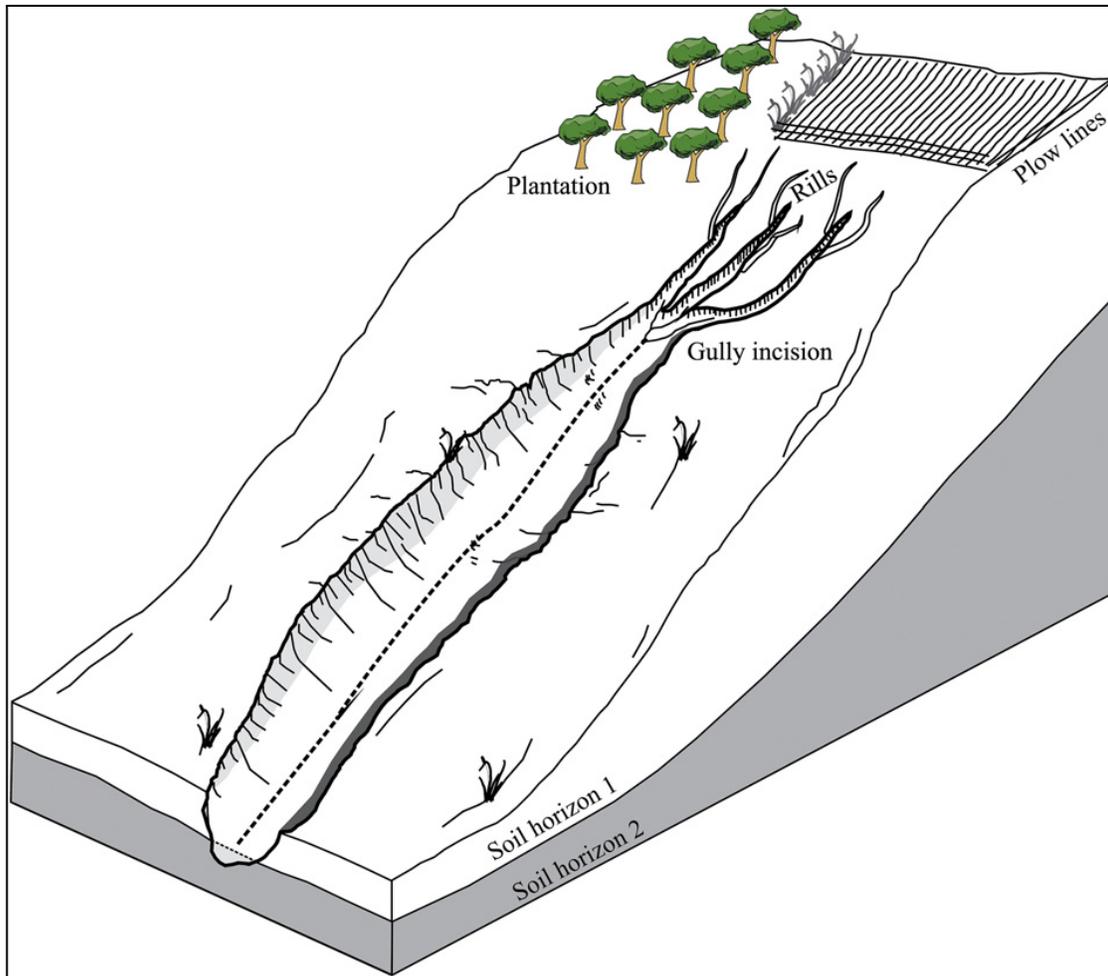


Figura 6. Tipos de erosión

Fuente: tomado de Shruthi et al. (2011).

Según diferentes autores las cárcavas se generan, y avanzan por distintos motivos.

El avance de la cabeza de una cárcava depende del drenaje del área, la precipitación y el tipo de suelo, según lo expresado por Thompson, citado por Sganga (1999a).

La estabilidad de las paredes de una cárcava, está afectada por la profundidad de las napas freáticas, la cohesión del suelo dependiente de los grados de sequedad - humedad y de la tasa de infiltración.

La estructura del suelo afecta las características del material colapsado de una cabecera y las pérdidas de suelo (avance de cárcava) resultan de una estrecha relación entre factores hídricos y características del suelo. El crecimiento de una cárcava inestable, depende directamente de la capacidad de carga de sedimentos del agua que escurre dentro de ella.

Crecimientos rápidos se pueden observar si el agua de escurrimiento tiene la energía suficiente para arrastrar los materiales caídos en la cabecera de la cárcava (Bradford, citado por Sganga, 1999a).

Burchard, citado por Sganga (1999a) indica que en el desarrollo se reconocen estados iniciales en que la cárcava es discontinua y estados de madurez, en que se hace continua y con equilibrio dinámico. El desarrollo de una cárcava no es sólo controlado por el flujo de agua; en los estados iniciales el crecimiento de la vegetación ejerce una mayor influencia.

Este debilitamiento se debe al socavamiento provocado por la turbulencia del agua. La alternancia de períodos secos, en que el suelo se resquebraja y posteriores avenidas de agua, van pautando ese fenómeno.

La humedad del suelo, reduciendo la cohesión y provocando fenómenos de expansión es un factor importante, aún más que la infiltración y el escurrimiento. Un aumento de la infiltración, cuando hay circulación subsuperficial, no representa claramente una disminución en el avance de una cárcava. El hombre ha incentivado el proceso de erosión en cárcavas al alterar los drenajes y acelerar localizadamente el escurrimiento (Piest, citado por Sganga, 1999a).

La estabilidad estructural del suelo y su conductividad hídrica, así como el caudal del flujo erosivo de agua, determinan avances diferentes.

El efecto "resquebrajante" del suelo cuando hay presencia de arcillas expansibles, favorece la inestabilidad de las paredes de la cárcava (Roloff, citado por Sganga, 1999a).

De acuerdo con observaciones realizadas por Bravo Espinosa et al. (2010), el ancho y longitud de las cárcavas parecen estar relacionados con el agrietamiento de los suelos, los cuales presentan alto contenido de arcilla (60%), parte de la cual es del tipo esmectita; mientras que la profundidad parece depender del esfuerzo cortante de los volúmenes de agua que se transportan por la cárcava, durante eventos atípicos de lluvia.

Ionita, citado por Bravo Espinosa et al. (2010), ha reconocido que la dinámica de crecimiento lateral o remontante de las cárcavas ocurre por pulsaciones accionadas por eventos de lluvias con alta intensidad o de larga duración, que ocurren durante la estación húmeda; por ello, el aporte de sedimento de una cárcava es muy fluctuante.

Sganga (1999a) menciona, que las cárcavas pueden iniciarse debido a dos tipos de causas fundamentales.

Unas naturales, que generan cárcavas con cierta facilidad, dadas las fragilidades puntuales que presentan los paisajes, y que tienen que ver con la superposición de características tales como: concentración de aguas de escurrimiento en pendientes significativas; alta erodabilidad del suelo, dada por baja infiltración, lenta conductividad hídrica y pobre estabilidad estructural; presencia de escurrimiento subsuperficial (frecuentemente horizonte álbico); cobertura vegetal insuficiente debida a causas edáficas, como la sodicidad, etc.

El otro tipo de causas son antrópicas, las cuales potencian los riesgos naturales, y tienen que ver con la eliminación del tapiz vegetal; el laboreo del suelo a favor de la pendiente; el sobrepastoreo y la senderización por pisoteo; y las inadecuadas redes viales o extracciones de materiales.

### 2.1.3. Métodos de control

Según Carrasco (2019) *“Toda práctica de manejo conservacionista de suelos obedece a tres principios fundamentales: reducir la velocidad de escurrimiento, favorecer la infiltración del agua, crear cobertura vegetal”*.

Se debe dejar claro que, la presencia de una cárcava significa un problema ya instalado, y un suelo que no se recuperará (en tiempos humanos).

Las intervenciones realizadas tienen como fin que la cárcava no siga avanzando en el terreno.

*“La energía de la lluvia es siempre varios órdenes de magnitud mayor a la del escurrimiento no encauzado, lo que indica a la cobertura del suelo como el elemento de control más importante de la erosión no encauzada. Cuando el escurrimiento se encauza, la gran masa de agua acumulada aumenta enormemente la energía y explica la formación de zanjas.”* (García Préchac y Clérici, 1994).

La llave para predecir las pérdidas de suelo en una cárcava está en el examen integral del suelo, morfológica e hidrológicamente (Piest, citado por Sganga, 1999a); la predicción en el tema es difícil, por ser un proceso complejo de naturaleza espasmódica en tiempo y espacio (Bocco, citado por Sganga, 1999a).

Hoy en día se cuenta con una herramienta sumamente útil para la predicción de pérdidas de suelo por erosión, el modelo denominado USLE (y su versión revisada RUSLE). Este modelo es una herramienta para estimar la erosión de los suelos. La posibilidad de evaluar cuantitativamente alternativas de uso y manejo (gerenciamiento) de suelos en términos de la erosión que generan, constituye una guía a la toma de decisiones (Clérici y García Préchac, 2001).

Clérici y García Préchac (2001) mencionan que *“la planificación con consideración de la conservación de los suelos tiene utilidad a escalas desde prediales hasta regionales o nacionales. A su vez, puede servir para evaluar el uso actual de los suelos y poner de manifiesto las combinaciones uso-suelo-topografía del lugar geográfico con niveles de erosión excesivos, para actuar sobre ellas”*.

Cuadro 2. Modelo USLE/RUSLE

USLE/RUSLE: $A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$		
Factores		Dimensiones
<b>A:</b> pérdida de suelo por unidad de superficie	Promedio anual.	Mg ha <sup>-1</sup>
<b>R:</b> erosividad de la lluvia.	Producto acumulado en un año con cierta probabilidad de ocurrencia (50% o promedio), de la energía cinética por la máxima intensidad en 30 minutos de las lluvias.	MJ.mm.ha <sup>-1</sup> .hr <sup>-1</sup> , por simplicidad J.ha <sup>-1</sup>
<b>K:</b> erodabilidad del suelo	Cantidad promedio de suelo perdido por unidad del factor R, cuando el suelo en cuestión es mantenido permanentemente desnudo, con laboreo secundario a favor de la pendiente (condiciones de máxima erosión posible).	Mg. J <sup>-1</sup>
Los demás factores son relaciones estándar y no tienen dimensiones		
<b>L:</b> longitud de la pendiente	Relación entre la erosión con una longitud de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 22,1 m de longitud, a igualdad de los demás factores.	
<b>S:</b> inclinación de la pendiente	Relación entre la erosión con una inclinación de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 9% de inclinación, a igualdad de los demás factores.	
<b>C:</b> uso y manejo	Relación entre la erosión de un suelo con un determinado sistema de uso y manejo y la que ocurre en el mismo suelo puesto en las condiciones estándar en que se definió el factor K, a igualdad de los demás factores.	
<b>P:</b> práctica mecánica de apoyo	Relación entre la erosión que ocurre con una determinada práctica mecánica de apoyo y la que ocurre con la condición estándar de laboreo a favor de la pendiente, a igualdad de los demás factores.	

Fuente: Clérico y García Préchac (2001).

El modelo sirve para predecir las pérdidas de suelo generadas por erosión de impacto, flujo pre canalizado y canalículos, pero no de cárcavas.

En Uruguay, históricamente se emplearon ciertas prácticas de manejo, con el fin de frenar el avance de las cárcavas. Para ello se deben eliminar las causas que determinan el fenómeno, y esto se hace efectivo con una adecuada combinación de procedimientos.

Ayres, citado por Sganga y Gesto (1999b), indica que existen una gran diversidad de máquinas y técnicas, y que el costo de estas obras depende de: la textura, condición del suelo y su cobertura, la pendiente y el grado de erosión (micro relieve), la disponibilidad de buenos desagües naturales, de la maquinaria empleada y la potencia de tracción, del largo de los terraplenes y de la destreza del operador.

La desviación del agua de escurrimiento utilizando canales (terrazas) de desviación, tiene como objetivo eliminar el factor escorrentía de agua, que, proviniendo de la parte alta de la cuenca, provoca el avance de la cárcava hacia niveles más altos de la misma.

Las terrazas son ondulaciones de diferente ancho, que cortan la ladera con un declive que las hace funcionar como una zanja superficial, que capta el agua antes que cause daño y la conduce fuera del área de riesgo. Las mismas deben ser cuidadosamente proyectadas, en base al área de la cuenca, la pendiente y la condición de la superficie que afecta el escurrimiento.

Otro aspecto fundamental a tener en cuenta, es que deben mantenerse empastados y limpios, vertiendo en una zona con buena protección, sin riesgos de generar una nueva cárcava. Deben reducir la cuenca de captación al mínimo, por lo que deben localizarse cercanos a la cabeza de la cárcava.

Cuando existe escurrimiento subsuperficial a poca profundidad (menos de 50 cm), es recomendable que la terraza profundice hasta el horizonte Bt (Sganga y Gesto, 1999b).

Marchesi y Suárez de Castro, citados por Sganga y Gesto (1999b), señalan la importancia de construir represas para minimizar las pérdidas de los materiales erosionados de los taludes y cabeza de la cárcava, además de enlentecer el lavado de materiales. Las mismas se pueden elaborar con materiales como piedra, malla de alambre, madera, ramas.

Estas represas que se construyen cada pocos metros y son de poca altura (30 – 50 cm), deben quedar enterradas para que el agua no pase por debajo, y con protección de piedras, etc. para evitar el efecto cascada del agua que las sobrepasa.

También resulta práctico utilizar como represa bolsas de plastillera llenas de arena o tierra, que incluso pueden contener fertilizante y semillas.

Si bien tiene un efecto enlentecedor, nunca debe considerarse como la solución para la recuperación de una cárcava, ya que esto significa que la erosión aguas arriba está activa y aporta materiales.

Hudson, citado por Sganga y Gesto (1999b), define *“estructuras temporales, que tienen como objetivo dar protección mientras se establece la vegetación, y estructuras permanentes, que deben tener esa característica dada la inestabilidad del suelo, la gran significación y/o riesgo espacial del deterioro y el haber resultado ineficaces otro tipo de medidas. Son recomendables para ayudar a desactivar cárcavas muy agresivas”*.

El destino como abrevadero resulta interesante y debe organizarse con un sistema de bebederos que eviten el pisoteo directo en la reserva de agua. Por lo general estas reservas tienen cuencas de recepción pequeñas, lo que dificulta los grandes acopios que justifiquen pensar en riegos de gran escala (más de 10 há).

La construcción de estos tajamares adiciona a los problemas normales, una especial precaución en la protección del vertedero y una atención particular al sustrato del fondo de cárcava, que puede presentar granulometrías permeables que podrían ocasionar pérdidas de agua. El tamaño de estas obras dependerá del volumen de la cárcava, la pendiente y de las características de la cuenca, por lo que su diseño debe ser preciso (Sganga y Gesto, 1999b).

Rebaje de bordes y nivelación, estos procedimientos de normalización de bordes y cabeceras de cárcava tienen como objetivo, reducir la pendiente natural de los mismos cercana a una relación b:h 1:1 (45°, pendiente 100%), a relaciones 3:1 o menores (figura 7), para facilitar la implantación vegetal (aumentando la recepción de humedad y las posibilidades de germinación).

Pocas especies cultivadas colonizan taludes muy empinados, el Lotus Rincón es una de ellas (Sganga y Gesto, 1999b). Debe tenerse muy en cuenta para esta normalización del terreno, que el talud debe quedar cubierto por una capa de horizonte humífero de por lo menos 1 cm, con afinado mínimo (Suárez de Castro, citado por Sganga y Gesto, 1999b).

Sganga y Gesto (1999b) indican que, estos trabajos de normalización de taludes, se pueden realizar con gran diversidad de herramientas, desde arados y motoniveladoras que trabajan en forma longitudinal, hasta azadas manuales, bulldozers y retroexcavadoras que lo hacen, más adecuadamente, en forma transversal, generando menos surcos en declive.

Un aspecto fundamental a considerar, tratar que el balance de romper situaciones estables en pos de mejorar situaciones críticas, sea positivo.



Ilustración geométrica de la relación entre la base (b) y la altura (h) del borde de una cárcava. En este caso la base es la mitad de la altura aproximadamente, para invertir dicha relación se realiza el rebaje del borde.

Figura 7. Pendiente de la pared de una cárcava

Fuente: adaptado de Sganga y Gesto (1999b).

Sganga y Gesto (1999b) mencionan que, los procedimientos mecánicos tendrán siempre un costo significativamente mayor, que aquellos procedimientos biológicos, los cuales no utilizan herramientas para modificar determinadas condiciones.

El cercamiento es una medida fundamental. Debe adecuarse a los alambrados existentes, al tipo de ganado, y cuidando particularmente aislar la vertiente de cabecera. Es imprescindible evitar el pastoreo ovino (utilizando alambrado de 7 hilos).

Suárez de Castro, citado por Sganga y Gesto (1999b), indica que la exclusión al pastoreo de las áreas de cárcava, que incluye las mismas y el espacio entre ellas, es una práctica efectiva.

Se puede aceptar una muy baja dotación bovina, la cual puede hacer sus aportes (se observaron crecimientos beneficiosos de Lotus Rincón en deyecciones de bovinos).

Según Sganga y Gesto (1999b) "*plantas consideradas malezas en otras condiciones pueden hacer aportes significativos en fijación de taludes, materia orgánica y protección a otras plantas, como por ejemplo el cardo de Castilla. Es fundamental proteger, sobre todo en áreas críticas como las cabezas de cárcavas, las plantas que tienen un gran efecto estabilizador y son de difícil implantación artificial, tal es el caso entre otras, de la paja mansa (Paspalum quadrifarium)*".

"*El crecimiento vegetal en las cárcavas se verá reducido por las pobres condiciones que presenta el suelo para la implantación. Por lo tanto, se debe enfocar la búsqueda en especies nativas (que sean constructoras del suelo) las cuales cuentan con la ventaja de encontrarse en el banco de semillas que existe en el suelo. Puede ser el caso de las leguminosas nativas Adesmia y Medicago. Otras veces será necesario introducir plantas, ya sea por siembras o mediante tepes fuertemente fertilizados*".

Según Suárez de Castro, citado por Sganga y Gesto (1999b), el "pasto azul" (*Dactylis glomerata*), el kikuyo (*Penisetum clandestinum*) y algunas leguminosas como el kudzu (*Pueraria*) y la lespedeza, serían adecuadas para colonizar la cárcava. Dicho autor preconiza la utilización de tepes sobre todo en la cabeza de las cárcavas.

Acosta y Crosara (1987) describen experiencias en el departamento de Maldonado en la recuperación de cárcavas con especies forestales. Los autores señalan "*una masa de árboles formando un espeso bosque de varios estratos que ocupa terrenos de apreciable extensión, constituye una de las mejores protecciones posibles contra la erosión*", resaltando la importancia de la vegetación en el control de la erosión.

Acosta y Crosara (1987) hacen consideraciones sobre algunas especies forestales (*Acacia melanoxylon*, *Ailanthus altissima*, *Bambú*, *Cupressus sempervirens*, *eucalyptus* spp, *Gleditsia triacanthos*, *pinus* spp, *populus* spp, *Robinia pseudoacacia*) usadas en la lucha contra la erosión.

Detallan características y desarrollo de las especies, concluyendo que es necesario el control de hormigas, alambrar el área a forestar y no permitir la entrada del ganado.

Así como también las raíces de los árboles favorecen la retención de agregados del suelo, mientras que las copas evitan la caída libre de las gotas (importante que exista un dosel con diferentes estratos).

Por otro lado, con las represas de ramas en la cabecera de la cárcava es posible disminuir la velocidad de escorrentía y retener partículas de suelo.

Respecto a las especies utilizadas señalan *“Populus alba, linn no prosperó por falta de humedad, pero si se lo aconseja plantar como especie complementaria por su buena brotación. Acacia melanoxylon y Robinia pseudoacacia por sus exigencias no son recomendables. Los eucaliptos colorados se han comportado bien y se aconseja su consideración para futuros proyectos de control de cárcavas. Los pinos (pinaster, pinea, halepensis) resultaron aptos al arraigo y desarrollo en suelos pobres aun con presencia cercana de subsuelo impermeable.”*

Siempre son deseables las plantas perennes o de larga duración, o las que aun siendo anuales o bianuales se propagan con facilidad. El éxito de la implantación dependerá en gran medida de las características edáficas del sitio en que se inscriben las cárcavas. Es decir, cárcavas en suelos con mejores características para el crecimiento de estas especies, presentaran mayor colonización (Sganga y Gesto, 1999b).

Bravo Espinosa et al. (2010), sugieren un esquema para estabilizar taludes y reducir la erosión en cárcavas en la microcuenca de Atécuaro (México).

Es importante considerar que las medidas de control con base en el uso de la vegetación, producen resultados mínimos, ya que las áreas con cárcavas son intensamente pastoreadas. Para aumentar la efectividad se sugiere el cercado de estas áreas y el establecimiento de pastos, porque cuando la biomasa aérea desaparece por efecto de incendio o pastoreo, las raíces de los pastos son las únicas que ofrecen resistencia a la erosión.

Según Bravo Espinosa et al. (2010), en áreas con cárcavas donde el agrietamiento y la erosión colapsan los taludes, las medidas de control del caudal que se apliquen en el fondo de la cárcava, deberán acompañarse con suavizado de taludes.

El control de la erosión en cárcavas es costoso, por ello, es necesario incrementar y fortalecer estrategias de desarrollo participativo que pugnen porque la conservación, y en general, el uso sostenible de los suelos, ocupe un lugar importante en la agenda económica y política del país.

Las características morfológicas de las cárcavas, parecen estar determinadas por: el agrietamiento en bordes de la cabecera y por efecto del flujo preferencial, los cuales inducen la erosión tubular y el colapso de taludes y cabecera. Los esfuerzos cortantes de caudales afectan la profundidad de la cárcava.

La erosión es la principal fuente de sedimentos y el mayor proceso de degradación del suelo, por lo que el principio de restauración debe basarse en el uso de la vegetación nativa e introducida, bajo el concepto de cuenca y con el involucramiento de usuarios e instituciones (Bravo Espinosa et al., 2010).

Liu et al. (2019), afirman que, en función de las condiciones y los recursos locales, así como del efecto duradero real de las prácticas de gestión, en las últimas décadas se han desarrollado medidas principales, que han evolucionado gradualmente hacia dos sistemas generales: los biológicos, y los de ingeniería.

El sistema biológico consiste en: a) ajustar la inclinación de la orilla del barranco por debajo de los 25°, b) construir estructuras continuas de caída de mimbre en forma de arco tanto en los cortes de cabeza como en el lecho del barranco, y c) plantar árboles o arbustos que ofrezcan una cubierta de dosel a lo largo de la orilla y/o hacia abajo en la pendiente de la orilla.

Este sistema asegura que el flujo que entra en la cárcava pase inicialmente por el mimbre, reduciendo la energía del flujo, y posteriormente fluya a través de una sección estabilizada del barranco. Esto permitiría la rehabilitación de la vegetación en la cárcava (Liu et al., 2019).

El sistema de ingeniería consiste en establecer estructuras de caída (dispositivo de salida colocado en la cabeza de la cárcava, para disipar la energía del agua). Proporciona estabilidad en la cabeza de la cárcava, y previene su avance. Establecer las represas en los lechos, con mampostería para impedir la socavación del flujo. Liu et al. (2019) afirman que las salidas de las estructuras de caída deben ser protegidas de la socavación aguas abajo.

Estos problemas pueden resolverse gradualmente con la mejora del diseño, mientras que la adopción de la labranza reducida y el acolchado de paja también podría complementar la eficacia.

Resaltan la importancia de realizar correctamente los desagües, es decir, dirigir el agua de escurrimiento hacia zonas de menor erodabilidad, donde no se formen nuevas cárcavas. A su vez, no se debe descuidar la presencia de restos vegetales sobre el suelo, y la correcta utilización del laboreo, cuando es indispensable (Liu et al., 2019).

Según Liu et al. (2019), "las técnicas de bioingeniería en el Noreste de China, como el mimbre vivo continuo, un recinto de plantas arbustivas y un recinto de plantas de árbol, son muy eficaces para controlar la erosión de los barrancos".

Liu et al. (2019) proponen un cerco de árboles, plantando árboles a lo largo de la orilla de la cárcava, y en el fondo de la misma. Si las condiciones lo permiten, los arbustos como el espino amarillo (*Hippophae rhamnoides*) y la lespedeza arbustiva se intercalan con los árboles en un espacio de 1 metro.

*"El mimbre se coloca desde la cabeza hasta el final de la cárcava de forma continua, o se dispone en secciones según las condiciones del suelo y la humedad. La estructura en forma de arco ancho asegura que toda el agua fluya a través del mimbre continuo. La superficie superior del mimbre debe estar sellada con pintura, para reducir la transpiración. Es importante trasplantar el mimbre dentro de los 3 días posteriores al corte, para asegurar un mayor éxito en la práctica".*

Marín y Osorio (2017), indican que el sistema radicular de los árboles funciona como una aguja que va cociendo las sucesivas capas del suelo, hasta llegar al regolito. Interesa traerlo a connotación ya que Liu et al. (2019) proponen plantar árboles en los bordes superiores de las cárcavas, buscando mayor estabilidad en el suelo.

Según Liu et al. (2019), los arbustos crecen más rápido y pueden cubrir el suelo rápidamente, lo que es beneficioso para la gestión inicial para la protección de las cañadas, y así, rehabilitar rápidamente la vegetación del barranco. Se propone plantar el sauce (*Salix babylonica* L.) y el olmo (*Ulmus pumila* L.) en el camino de la corriente, mientras que el álamo (*Populus tremula* L.), el pino (*Larix gmelinii*) y el eucalipto deberían ser plantados a ambos lados del muro del barranco (figura 8).

Según las condiciones topográficas del sitio, la forestación mediante el ensamblaje con arbustos puede rehabilitar el medio ambiente ecológico y al mismo tiempo controlar la erosión.

Aunque la vegetación tiene un excelente potencial para atrapar sedimentos, no puede detener la migración ascendente de la cabeza de la cabeza de la cárcava, pero probablemente controle la profundidad de la misma (Liu et al., 2019).

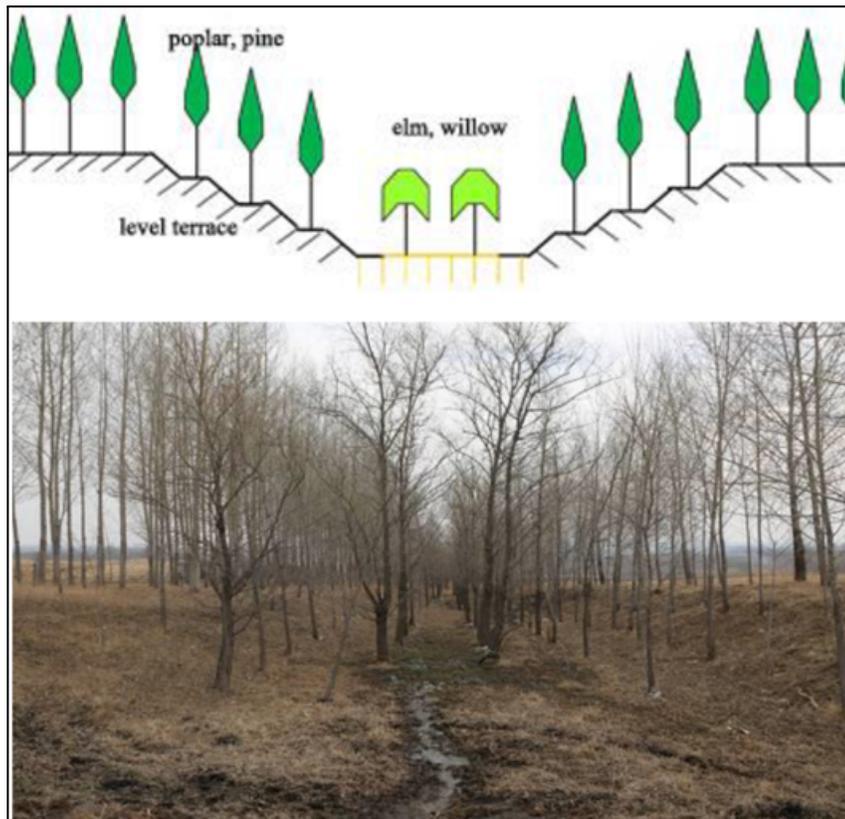


Figura 8. Cercamiento de la cárcava con diferentes especies

Fuente: tomado de Liu et al. (2019).

Liu et al. (2019), señalan que existe una mayor reducción en el avance de las cárcavas cuando se instalan diques de contención (represas), y vegetación.

Esto puede estar atribuido a los sedimentos depositados detrás de los diques, y la presencia de vegetación que determina reducción de la velocidad del escurrimiento, y al aumento de la infiltración. A su vez, apuntan, que las perturbaciones provocadas por los diques pueden ser negativas, si producen una notoria erosión en otro sitio del paisaje.

Un dique de contención está compuesto por el terraplén, el vertedero y la salida en general. No se debe descuidar el mantenimiento después de instalada la práctica de conservación. Por consiguiente, las prácticas deben ser inspeccionadas periódicamente, y reparadas si es necesario (Liu et al., 2019).

Liu et al. (2019), indican que *“lamentablemente, faltan investigaciones y estudios científicos sobre la eficacia a largo plazo de estas presas en la región. Además, es urgente evaluar los cambios en la resistencia de las prácticas disponibles a la dinámica de los cambios sociales y naturales”*.

*“Para acelerar la aplicación de las prácticas de control de la erosión, se deberían establecer políticas que alienten (por ejemplo, programa de incentivos) a adoptar dichas prácticas. La plena comprensión de los factores y mecanismos de los procesos de erosión en cárcavas ayudará a lograr una gestión sostenible de las cárcavas en el Noreste de China”*.

En un trabajo elaborado por Carrasco (2019) para INIA Chile, se establecen lineamientos para el control de las cárcavas, que en parte concuerdan con los trabajos anteriormente mencionados.

Para prevenir la erosión tanto en el exterior como en el interior de la cárcava, Carrasco (2019), propone: emparejar el interior y exterior de la cárcava antes del inicio de las obras, rellenar el interior de la cárcava con sedimentos captados de la erosión, repoblar con vegetación nativa de la zona (tanto fuera como en el interior de la cárcava), y el aislamiento de la zona.

Se debe reducir la velocidad del escurrimiento superficial del agua, tanto en el exterior como en el interior de la cárcava. En la parte superior de la cabecera de la cárcava proponen construir un surco de desviación de lluvias, a su vez, en la parte superior de la cabecera de la cárcava establecer algún tipo de cobertura vegetal herbácea.

Mientras que en el interior de las cárcavas hay que reducir la velocidad de escurrimiento mediante la construcción de estructuras que disipen la energía del agua. Estas estructuras también cumplirán la función de captar sedimentos de la propia erosión, para ir rellenando el interior de la cárcava.

Se considera como una tarea fundamental para tener éxito en el control, el “peinado” de las cárcavas. Es decir, aquella acción que elimina el suelo sin estructura del borde de la cárcava (Carrasco, 2019).

Según Carrasco (2019), las estructuras pueden construirse con diferentes materiales: fardos de paja, sacos rellenos de tierra y semillas (colocados en las curvas de nivel antes de cada borde de la cárcava), barreras de piedra en el interior de la cárcava (sostenidas con mallas de alambre, y postes de madera), gaviones flexibles (estructura formada por una red de polipropileno y rellena con piedras de distintos tamaños).

El espaciamiento entre barreras físicas en una cárcava se calcula con la siguiente fórmula:  $\text{espaciamiento entre muros (metros)} = \frac{\text{altura del muro (metros)}}{\text{pendiente de la cárcava}/100}$ .

Carrasco (2019), señala que para la repoblación vegetativa es necesario el aporte de materia orgánica, para mejorar la fertilidad del suelo, y que las plantas cuenten con una mejor oferta de nutrientes.

Se deben establecer especies vegetales en el borde de la cárcava, combinando especies herbáceas, arbustivas, y finalmente arbóreas en los bordes e interior de la cárcava. No se debe descuidar la descarga del agua desviada (desagües), considerando que se deben limpiar al final de cada temporada, y evitar el pastoreo. Sería positivo establecer una cobertura herbácea bajo ellos.

## 2.2. EL SISTEMA RADICULAR DE LOS ÁRBOLES

Los árboles son cultivos que utilizan el ambiente donde son plantados por un periodo prolongado, en relación a otros usos de la tierra, pueden provocar un impacto más intenso o de mayor duración sobre el ambiente, lo que exige una planificación más cuidadosa en esta producción.

La correcta selección del sitio donde se desarrolla la actividad forestal se vuelve más necesaria, particularmente con el objetivo de lograr una producción sostenible y ambientalmente correcta. La utilización inadecuada de los recursos naturales es comparativamente más grave que en otros rubros, dada la mayor ocupación en tiempo del espacio (Califra y Durán, 2010).

### 2.2.1. Generalidades

El conocimiento detallado de la arquitectura del sistema radicular es esencial, dado que juega un rol mayor en los ciclos biogeoquímicos globales (Pierrete et al., Radville et al., citados por Lambais et al., 2017), así como un importante rol en mejorar la estructura del suelo (Jama et al., citados por Bouillet et al., 2002), en el anclaje (Coutts, Ennos et al., Fitter, citados por Bouillet et al., 2002) y en la contribución de las raíces al ciclo del nitrógeno (Hendricks et al., Ruess et al., citados por Bouillet et al., 2002).

Las raíces de los árboles usualmente están concentradas en las capas superficiales del suelo (Jackson et al., Eamus et al., Brassard, Chen y Bergeron, citados por da Silva et al., 2008), encontrando gruesas raíces de anclaje y transporte, y finas raíces absorbentes y de transporte.

Pero, algunas especies de árboles pueden desarrollar sistemas radiculares a decenas de metros en profundidad (Canadell et al., Casper y Jackson, Feikema, Morris y Connell, citados por da Silva et al., 2011), siendo poco comprendidos los factores que controlan los crecimientos y mortalidades para estos sistemas radiculares profundos (Pierrete et al., Radville et al., citados por Lambais et al., 2017).

McCormack et al., citados por Mármol (2021), proponen dividir en categorías a las raíces finas, clasificándolas por su función. Las raíces finas absorbentes son principalmente responsables de la adquisición de los recursos, mientras que las raíces finas de transporte tienen una reducida capacidad de adquisición de recursos, participando principalmente como conductoras o de transporte de recursos hacia los tejidos superiores.

El gran potencial en absorción y la mayor colonización de micorrizas en las raíces más finas, las hacen las principales raíces absorbentes. En contraste, las raíces con mayor tejido secundario desarrollado y la mayor tasa de máxima conductancia de las raíces más gruesas las hacen las más importantes en el transporte (McCormack et al., citados por Mármol, 2021).

### 2.2.2. Sistema radicular profundo

El enraizado profundo es una cuestión funcional importante en ecosistemas terrestres, encontrándose que el desarrollo radicular profundo en los árboles es mayor que en arbustos y pasturas, y que el máximo desarrollo radicular profundo es mayor en regiones ecuatoriales que en regiones boreales (Jackson et al., Schenk y Jackson, citados por Laclau et al., 2013).

Aún existen pocos estudios que traten sobre el desarrollo de raíces a más de 5 metros de profundidad (Schenk y Jackson, Christina et al., citados Laclau et al., 2013).

Tal información se está volviendo especial en el contexto del cambio climático y la acelerada conversión de uso de la tierra entre bosque nativo, pasturas, cultivos y plantaciones forestales de rápido crecimiento, dado que, entre otras cuestiones, las plantas con raíces profundas pueden contribuir significativamente al ciclo hidrológico en biomas nativos (Olivera et al., Christina et al., citados por Mármol, 2021).

Estudios recientes muestran que hay movimientos pasivos de agua a través de las raíces de las plantas, entre capas profundas y superficiales de suelo, por medio de gradientes de potenciales de agua. Estos mecanismos pueden resultar en agua moviéndose hacia arriba o hacia abajo, dentro del perfil, dependiendo de las condiciones ambientales (McCulley et al., citados por Mármol, 2021).

Los árboles son poderosos actores geomorfológicos, pedogénicos y ecológicos (Hasenmueller et al., citados por Pawlik y Kasprzak, 2018). Por lo menos, desde el devónico, los árboles han tenido una influencia significativa en muchos componentes del medio ambiente, por ejemplo, la hidrología de las laderas, las propiedades y la estabilidad del suelo, el clima, el flujo de sedimentos, etc (Retallack et al., Algeo et al., citados por Pawlik y Kasprzak, 2018).

Hasenmueller et al. (2017) observaron la esperada reducción de la densidad radicular en profundidad, sin embargo, las raíces finas fueron encontradas en las fracturas de las rocas, incluso en las más profundas muestreadas (180 cm). Los autores sugieren que en general, el relleno con raíces en las fracturas de las lutitas laminadas a 180 cm de profundidad, son cualitativamente similares a lo encontrado en los horizontes superficiales, indicando esto que el relleno de las fracturas es probablemente resultado de procesos pedogenéticos más que por translocaciones.

Pawlik y Kasprzak (2018) definen cuatro campos de interés vinculados a la función geomorfológica y pedogénica de los árboles y sus raíces:

- La meteorización bio mecánica y bioquímica a través de plantas vasculares profundamente arraigadas (impulsaron el desarrollo inicial del suelo y el cambio climático, principalmente a través de la intensa meteorización mineral, principalmente silicatos).

- La bioprotección, que actualmente es considerada una de las funciones más importantes de los árboles. Es decir, la protección de los suelos contra la erosión y el lavado de la superficie, contribuyendo así a la estabilización de las superficies de las laderas.

- La complejidad espacial del suelo como un derivado de la retroalimentación de los árboles y el suelo. En varios estudios se mencionan las complejidades espaciales del suelo, en las que influye, la presencia de los árboles a través del flujo y el lavado de los tallos, y/o los procesos biomecánicos y bioquímicos asociados a sus funciones vitales, las perturbaciones, la mortalidad y la descomposición. Los árboles son capaces de modificar la estructura del suelo y el regolito desplazando el material con su crecimiento radicular. Se constataron cambios físicos y químicos, como resultado del desarraigo de los árboles.

- Circulación de materia y energía. Al fijar grandes cantidades de CO<sub>2</sub> atmosférico mediante la fotosíntesis y al liberar exudados de las raíces, enzimas y ácidos orgánicos bajo el suelo, los árboles modifican la circulación de la materia y la energía.

Según Pawlik y Kasprzak (2018), la meteorización biomecánica se considera como factor primario de cambio en el suelo, el proceso incluye: el crecimiento de las raíces en la roca y el regolito, en fisuras y aberturas en la roca (Phillips et al., citados por Pawlik y Kasprzak, 2018), y el material del suelo empujado por las raíces en crecimiento (Hoffman y Anderson, citados por Pawlik y Kasprzak, 2018).

Pueden mencionarse otros impactos de las raíces: el contenido de agua debido al flujo del tallo y la conductividad del agua a través de los canales radiculares; y el contenido de materia orgánica del suelo proveniente de la descomposición y renovación de raíces finas, micorrizas y microorganismos en la rizosfera (Phillips et al., citados por Pawlik y Kasprzak, 2018).

Pawlik y Kasprzak (2018) concluyen *“basándonos en los resultados de ERT (tomografía de resistividad eléctrica, es uno de los métodos geofísicos más populares aplicados a los estudios geológicos, geomórficos y pedogenicos) concluimos que las raíces de los árboles cambian las propiedades del suelo durante varias décadas, posiblemente incluso más de un siglo”*.

*“Los cambios más significativos se producen después del desarraigo de los árboles, lo que causa la llamada topografía de foso y montículo con las consiguientes fluctuaciones a largo plazo del contenido de humedad dentro de los montículos y fosos de los árboles”*.

Cabe destacar que, no se conoce exactamente cómo los árboles interactúan con la roca o el regolito, y cuál es la tasa de meteorización bioquímica o biofísica.

### 2.2.3. Las raíces y la estabilidad del suelo

Según Marín y Osorio (2017) *“las propiedades mecánicas de la vegetación tienen efectos beneficiosos y adversos en la estabilidad del terreno. Por un lado, la presencia de raíces fuertes permite que se refuerce el suelo al anclarse en estratos de suelo más estables; por su parte, raíces laterales atan el terreno al desarrollarse a través de posibles planos de falla”*.

*“Así mismo, los sistemas de raíces pueden proveer una membrana de refuerzo en el manto del suelo, lo que incrementa la resistencia cortante del mismo. Igualmente, las raíces y troncos de los árboles pueden proveer soporte a la capa de suelo de la parte superior de la ladera mediante apuntalamiento y arqueo”*.

Durante la falla de un talud, las raíces de los árboles permiten proporcionar un efecto de anclaje de la masa deslizante a la parte estable del suelo, logrando prevenir un movimiento adicional (Stokes, Abdi, citados por Marín y Osorio, 2017).

En taludes, la presencia de raíces laterales puede proporcionar un refuerzo al terreno en esta dirección (Stokes et al., Zhou et al., citados por Marín y Osorio, 2017). La unión lateral de capas inestables a través de los planos de debilidad es un caso especial de refuerzo de raíces laterales, las cuales atan a través de los flancos de la masa deslizante en potencia (Sidle y Ochiai, citados por Marín y Osorio, 2017). La presencia de raíces a lo largo de la zona de corte, donde se concentran los esfuerzos, tiende a coser los elementos que son separados con el desplazamiento sobre la superficie de falla (Marín y Osorio, 2017).

En una investigación realizada en las cordilleras de Oregón, Schmidt et al. concluyeron que la cohesión lateral de las raíces representaba el mecanismo dominante de refuerzo en los suelos superficiales de esta zona (Marín y Osorio, 2017).

La rigidez y la deformación de las fibras de las raíces de los árboles pueden reforzar significativamente la resistencia al corte del suelo (O’Loughlin et al., Gray y Ohashi, Sidle y Ochiai, citados por Marín y Osorio, 2017).

El suelo con presencia de raíces de árboles actúa como un material compuesto, en el cual las raíces se incrustan en la matriz del suelo y contribuyen al aumento de la resistencia cortante debido a la alta resistencia a la tracción que desarrollan las raíces (figura 9).

En cambio, la matriz del suelo es altamente resistente a la compresión, pero es débil a la tracción. Por lo tanto, el efecto combinado de suelo y raíces da como resultado un suelo reforzado (Cazzuffi et al., citados por Marín y Osorio, 2017).

Mecánicamente, en condiciones de carga cortante, uno de los efectos de este material compuesto es la transferencia de los esfuerzos cortantes desarrollados en la matriz de suelo, los cuales se transfieren a las fibras de las raíces a través de la resistencia a la tracción movilizada, generando un aumento de la resistencia del suelo enraizado (Waldron, Cazzuffi et al., citados por Marín y Osorio, 2017).

Este mecanismo representa uno de los aspectos geomecánicos más significativos asociados al efecto del sistema de raíces en el suelo (Marín y Osorio, 2017).

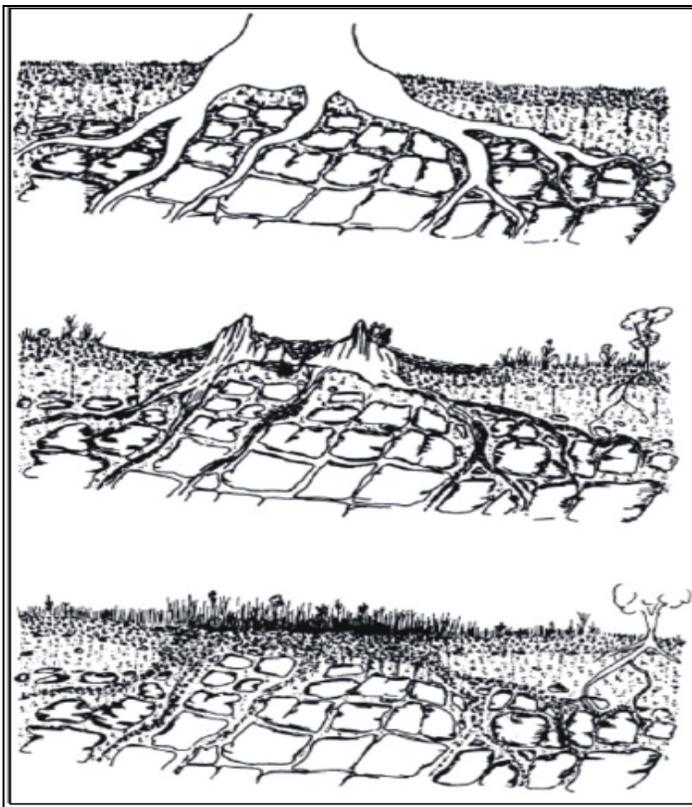


Figura 9. Suelo y raíces como material compuesto

Fuente: adaptado Pawlik y Kasprzak (2018).

Según Stokes et al., citados por Marín y Osorio (2017), *“el apuntalamiento se puede describir como un fenómeno en el que la presencia del sistema de raíces y el tronco de los árboles, bloquean el movimiento del suelo. La acción de estos elementos de la cobertura vegetal, en aporte a la estabilidad del terreno mediante apuntalamiento, es más significativa cuando tanto los tallos como las raíces presentan suficiente diámetro para que actúen de manera rígida en su anclaje”*.

La magnitud de la contribución del apuntalamiento a la estabilidad de la masa del suelo depende tanto de la profundidad del manto del suelo y el nivel freático como del grado de penetración que desarrollan las raíces en el manto rocoso (Tsukamoto y Kusakabe, Morgan y Rickson, citados por Marín y Osorio, 2017).

Se define como arqueo a un fenómeno similar que se desarrolla debido a la presencia de múltiples árboles y/o elementos de la vegetación. Cuando hay dos árboles ubicados a corta distancia en el sentido horizontal del talud (en una misma cota, separados lateralmente) y generan el fenómeno de apuntalamiento en el terreno, se puede lograr determinada estabilidad en el suelo que se encuentra entre ambos contrafuertes, el cual no está apuntalado, pero puede ganar resistencia al deformarse en forma de arco (Morgan y Rickson, citados por Marín y Osorio, 2017).

Cuando una zona de una ladera experimenta una condición de arqueo, se puede afirmar que los árboles en crecimiento actúan como pilas ancladas en un estrato firme del subsuelo (Stokes et al., Gray y Megahan, citados por Marín y Osorio, 2017).

Generalmente, la sobrecarga arbórea no se considera como una carga importante en el análisis de la estabilidad de taludes, representando un componente mecánico de inestabilidad no muy significativo (Sidle y Ochiai, Suárez, citados por Marín y Osorio, 2017).

#### 2.2.4 Interacciones raíces - microorganismos

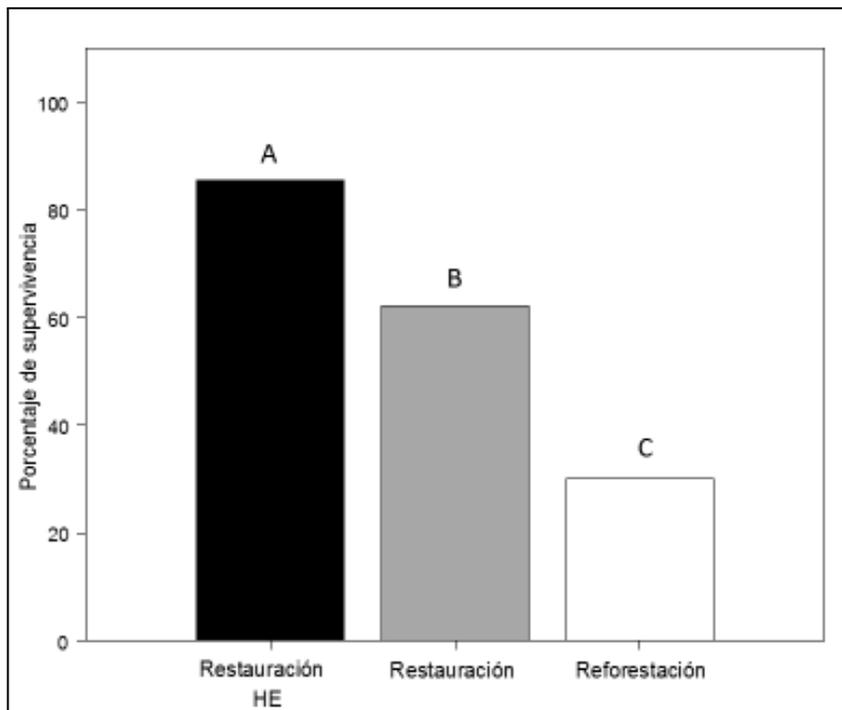
Las raíces son capaces de asociarse con microorganismos, generando efectos beneficiosos sobre la estabilidad del suelo. Un estudio elaborado sobre *Pinus pseudostrobus* en la ciudad de Morelia (Méjico) confirma que, *“en las estrategias de restauración de suelos degradados, es determinante el uso del microbiota (en especial de hongos formadores de micorrizas) del suelo ya que previenen la erosión del suelo al ser un factor en la formación de agregados y en la acumulación de materia orgánica*.

De esta manera, le dan estructura al suelo y reducen o evitan el efecto de la erosión tanto hídrica como eólica, así como la consecuente pérdida de nutrientes” (Haselwandter, Requena et al., Álvarez, citados por Gómez Romero et al., 2013).

Según Gómez Romero et al. (2013), la inoculación con el hongo ectomicorrícico *Pisolithus tinctorius* incrementa la supervivencia de *Pinus pseudostrobus* en sitios desprovistos de vegetación, con numerosas cárcavas y graves problemas de erosión.

En la figura 10 se observan los resultados de supervivencia de *Pinus pseudostrobus* en condiciones de restauración ecológica con inoculación de hongo ectomicorrícico *Pisolithus tinctorius* (HE), restauración sin inoculación y reforestación convencional.

Son de vital importancia el conjunto de condiciones a las que son sometidas las plantas durante la germinación, propagación y trasplante, para asegurar un exitoso establecimiento, supervivencia y crecimiento.



Letras diferentes indican diferencias significativas con  $p < 0,05$ .

Figura 10. Porcentaje de supervivencia con y sin inoculación

Fuente: tomado de Gómez Romero et al. (2013).

### 2.2.5 Nuevo enfoque del perfil de suelo-saprolito- roca

Un estudio realizado en el Sur de Sierra Nevada (California) durante el 2003, evaluó las fuentes de agua para *Pinus jeffreyi* y para *Arctostaphylos patula*. En esta locación, los suelos promedian 75 cm de espesor, pero sobreyacen a una base de granito meteorizado.

Los resultados demostraron que el uso predominante del agua, fue inicialmente de la superficie del suelo. Progresivamente, fuentes de agua más profundas, incluyendo la roca meteorizada a una profundidad de varios metros, fueron explotadas a medida que la temporada progresaba y el suelo suprayacente bajaba su humedad. El agua contenida dentro de las rocas fue esencial para mantener los requerimientos de transpiración durante la sequía de verano (Rose et al., 2003).

Estas dos especies de hojas perennes y tolerantes a la sequía, poseen un patrón de enraizamiento dimórfico, con raíces superficiales que contemplan la mayor masa (Hanes, Strong y La Roi, citados por Rose et al., 2003), pero con algunas raíces que se extienden a varios metros en profundidad (Hellmers et al., Hanes, Stone y Kalisz, Hubbert et al., citados por Rose et al., 2003).

Este estudio brinda evidencias de que hay similitudes hidrológicas entre el suelo y la roca meteorizada. Investigaciones sobre balances hídricos que no consideren la capacidad de almacenar agua por parte de capas profundas de roca meteorizada, podrían sobreestimar la naturaleza xérica del sistema suelo/roca, en el cual raíces profundas pueden acceder al agua almacenada dentro de la roca y, por lo tanto, disminuir los efectos del estrés hídrico.

Existe la necesidad de redefinir el concepto de suelo, para poder incluir la zona de roca meteorizada que soporta crecimiento radicular, la cual subyace en muchas áreas forestales (Rose et al., 2003).

Witty et al. (2003) estudiaron capas de granitos meteorizados en Sierra Nevada, indican que estas capas tienen capacidades de agua disponible (0,12 cm agua/cm roca) que se aproximan a la de los suelos (0,2 cm agua/cm suelo).

La capa de roca meteorizada todavía conserva la estructura de la roca y conserva minerales primarios no completamente alterados a arcilla (no se considera saprolito), y es penetrada por las raíces de *Pinus ponderosa* dentro de los 2 primeros años en muchos sitios.

El acceso de las raíces está restringido a las fracturas, el agua se extrae de la matriz de la roca a través del flujo insaturado hacia la mata de las raíces y por hifas micorríticas de hongos que penetran en la matriz de roca.

En dicho estudio la capa meteorizada de roca suministra al menos el 70% del agua utilizada por los árboles durante la temporada de crecimiento.

La roca meteorizada contiene agua disponible para las plantas, hospeda raíces de las plantas, y puede jugar un rol crítico en mantener coníferas en ambientes con veranos secos. Se sugiere que, para ser realistas, los substratos de los bosques en ambientes de veranos secos deben ser considerados a una extensión mucho más profunda, y a la roca meteorizada, más que estar limitados al suelo o a un límite artificial de 2 m.

La roca meteorizada mejora la productividad del sitio y es esencial para la sobrevivencia de comunidades de bosques (Witty et al., 2003).

El saprolito es el material formado por una extensiva meteorización in situ de una roca madre existente, y que todavía retiene características de la roca madre (Bates y Jackson, McKay et al., citados por Mármol, 2021). En la práctica, materiales que contienen incluso un moderado grado de características de la roca madre es considerado como saprolito.

Aunque el saprolito es ampliamente distribuido en climas húmedos, las características químicas y físicas derivadas de rocas sedimentarias no han sido extensamente estudiadas (Stolt y Baker, Driese et al., McKay et al., citados por Mármol, 2021). Como consecuencia, la hidrología de este tipo de subsuelo es pobremente comprendida, haciendo que las predicciones de infiltración, retención de agua, escorrentía en superficie, recarga de acuíferos y transporte de contaminantes sean inciertas (McKay et al., citados por Mármol, 2021).

El flujo del agua subterránea en saprolitos de rocas sedimentarias, y en suelos derivados de este material, es fuertemente influenciado por la estratificación sedimentaria y las fracturas heredadas de la roca madre. Variaciones en la conductividad hidráulica no siempre se corresponde a cambios en la litología, sugiriendo que la conductividad hidráulica es resultado de una compleja interacción de muchos factores, incluyendo la roca madre y el grado de relleno de los macro poros.

El relleno de los macro poros juega un rol importante en el control hidráulico y el flujo de agua subterránea para una variedad de diferentes tipos de rocas madre (McKay et al., citados por Mármol, 2021).

### 2.3. SITIOS FORESTALES

Sganga, citado por Durán y García Préchac (2007), por medio del MGAP. DSF, propuso una contribución importante en la definición de aptitud forestal de los suelos del país, en la cual se plantea que el crecimiento de un árbol es el resultado de la interacción del suelo, clima y factores bióticos, integrándose como “el sitio forestal”.

La calidad del sitio se basa en el crecimiento de los árboles, su productividad resultante y que estos sitios tengan poca aptitud para otros usos. Además, se propone que el árbol cumpla funciones sobre el medio, como estabilización del paisaje, regulación del escurrimiento, aceleración de la edafogénesis, y facilitación de la penetración del agua en el suelo hacia estratos profundos.

La expresión de la producción forestal en determinado sitio se realiza habitualmente como índice de sitio, o como alguna otra medida del volumen de madera producida anualmente. El índice de sitio es, por lo tanto, la altura promedio de árboles dominantes y codominantes de una especie, a una edad determinada. La medición del índice de sitio para un suelo determinado se extrapola en otros suelos similares para los cuales no se dispone de datos (Durán y García Préchac, 2007).

Herbert, citado por Durán y García Préchac (2007) realizó estudios específicos de índices de sitio para la zona litoral Oeste del país, tomando en consideración todos los factores ambientales de importancia para definir la aptitud forestal de la tierra, siendo las exigencias de los árboles en materia de sitio: temperatura (actividad fisiológica, fotosíntesis y daños por heladas), nutrición (desarrollo vegetal, generalmente no es crítica en Uruguay), agua (evaporación; desarrollo del área foliar; demanda vs. suministro), y estabilidad mecánica (profundidad de arraigamiento, anclaje)

Las exigencias o requisitos importantes de los árboles en Uruguay se relacionan con la disponibilidad de agua y adecuado arraigamiento (Herbert, citado por Durán y García Préchac, 2007). Según Durán y García Préchac (2007) los principales parámetros que inciden en la calidad del sitio son los que afectan más a dichos requisitos: profundidad efectiva de arraigamiento, textura del suelo (capacidad de retención de agua del material), naturaleza del saprolito (capacidad de retención de agua del suelo; friabilidad o consistencia), clase de drenaje natural (disponibilidad de oxígeno para el crecimiento radicular), contenido de carbono orgánico (N, P, consistencia, estabilidad de los agregados).

### 2.3.1. La importancia del subsuelo

La litología del sustrato es importante para evaluar la calidad de sitio, siendo las propiedades que influyen decisivamente sobre el potencial de enraizamiento (que determina el anclaje y la exploración por el agua), el espesor de los sedimentos, la profundidad de meteorización, el drenaje interno, la dureza, cementación y el tipo de arcilla (Durán y García Préchac, 2007).

Herbert, citado por Durán y García Préchac (2007) señala que, considerando la posibilidad mayor o menor de penetrabilidad de las raíces, se evaluó la calidad de las litologías de su estudio, clasificándolas en tres clases (buena, moderada y pobre), siendo la “buena” caracterizada como profunda, blanda, grano fino, porosa, y la “pobre” como superficial, dura, grosera, masiva.

El subsuelo posee una influencia decisiva sobre la penetración de las raíces en búsqueda de agua, pero la condición física del horizonte B determina la primera barrera, donde si el horizonte B es argilúvico de textura fina y estructura gruesa y compacta, puede presentar una penetrabilidad muy restringida y el horizonte C situado por debajo no será fácilmente accesible a las raíces (Durán y García Préchac, 2007).

La precipitación también influye de manera decisiva, por lo que cuando el suelo posee una buena profundidad efectiva de arraigamiento se logra mayor almacenamiento de agua en la zona explorable por las raíces, lo que contribuye a compensar deficiencias hídricas durante los periodos secos (Herbert, citado por Durán y García Préchac, 2007).

Por lo tanto, las propiedades del horizonte B y del Horizonte C juegan un rol clave en la elección de un sitio de buena aptitud, dado que condicionan en gran medida la facilidad de la penetración de las raíces y del agua de lluvia y su almacenamiento (Durán y García Préchac, 2007).

Los resultados de Herbert indican que los mayores crecimientos se obtienen en los suelos profundos, sin horizontes limitantes para el desarrollo de las raíces, horizonte C meteorizado y fácilmente penetrables por las raíces para obtener agua disponible en los estratos profundos.

En el extremo contrario, los peores crecimientos se obtienen en los suelos con contacto lítico a escasa profundidad y/o con pedregosidad o rocosidad asociadas que limitan severamente la implantación y el crecimiento de los árboles (Herbert, citado por Durán y García Préchac, 2007).

### 2.3.2. Legislación ambiental

*“La gestión del suelo es sostenible si el apoyo, aprovisionamiento, regulación y los servicios culturales proporcionados por el suelo son mantenidos o ampliados sin perjudicar de manera significativa, ya sea las funciones del suelo que permiten a dichos servicios o la biodiversidad” (FAO, 2015).*

Las estrategias políticas que toman los gobiernos de cada país, definirán en gran medida la sustentabilidad del medio que habitan. En Uruguay la legislación procura la conservación del suelo, promoviendo el ejercicio sustentable y responsable de la actividad agraria, en un marco de amplio y pleno respeto al ambiente. Dentro de la normativa que regula el uso del suelo y el agua, resalta la Ley No. 15.239 la cual declara de interés nacional, promover y regular el uso y la conservación de los suelos y de las aguas superficiales.

En el decreto No. 405 del 2008, se insta a los productores a planificar la producción mediante los planes de uso y manejo para no incurrir en prácticas inadecuadas que aceleren los procesos erosivos, y en caso de erosión severa, como indica el artículo 2, se procura la recuperación del área afectada, mediante medidas como ser el control del escurrimiento superficial de las aguas, y realizar una adecuada normalización de la superficie del terreno, entre otros.

Por su parte, se busca la solidaridad y compromiso de la mayor cantidad de actores posibles mediante la Ley No. 18.564 /2009, la cual establece que los tenedores de tierras (cualquiera sea el título) quedan obligados a aplicar las normas técnicas que establece el MGAP, siendo en todos los casos responsable el titular de la tierra.

## 2.4. GEOLOGÍA

Según De Santa Ana et al. (2006b) desde el punto de vista geoestructural, se puede dividir el país en dos grandes áreas de subsidencia. La primera, comprende una extensa depresión intracratónica que abarca las zonas: Norte, Noreste, Noroeste y Oeste del país; en tanto que la segunda se trata de dos cuencas pericratónicas ubicadas en el Sur y Este del país.

La depresión intracratónica, conforma a nivel regional, el apéndice Suroriental de la cuenca del Paraná (figura 14). En Uruguay está rellena con más de 2.000 metros de sedimentos paleozoicos, mesozoicos, lavas basálticas y parcialmente por depósitos cenozoicos (figura 15).

Dentro de esta área de sedimentación, en la zona Norte emergen: el zócalo cristalino de Cuñapirú-Vichadero y el zócalo de Aceguá, ambos con dirección aproximada E-W (De Santa Ana et al., 2006b).

En superficie, estos sedimentos actualmente ocupan la mayor parte del Noreste del país en los departamentos de Cerro Largo, Rivera, centro-Este de Tacuarembó y la zona Nororiental del Departamento de Durazno (Preciozzi et al., 1985).

Según De Santa Ana et al. (2006b) los registros sedimentarios de la cuenca revelan una sedimentación de tipo intracratónica y de naturaleza policíclica. La evolución de las rocas sedimentarias permo-carboníferas en la cuenca evidencian una evidente y paulatina continentalización del amplio mar abierto hacia el Oeste.

En ese contexto, la evolución tectónica y sedimentaria de la cuenca Norte está relacionada a distintas situaciones paleogeográficas y contextos geológicos que se sucedieron desde el carbonífero hasta finales del Pérmico.

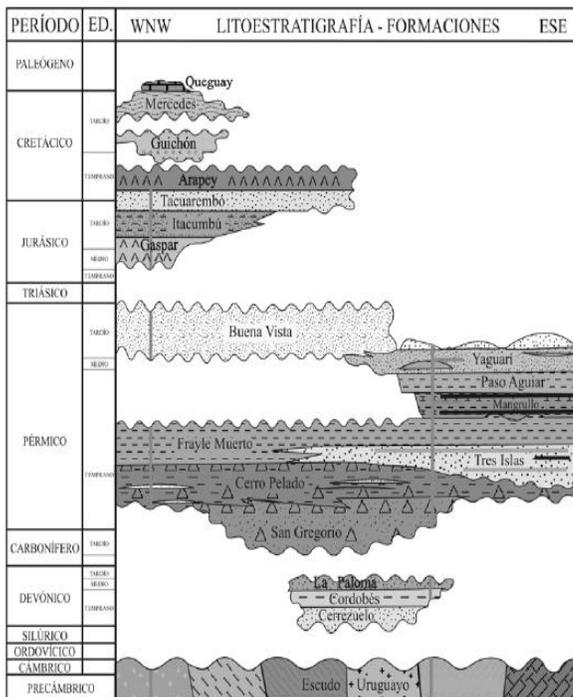


Figura 11. Columna estratigráfica de la cuenca Norte

Fuente: tomado de De Santa Ana et al. (2006b).

#### 2.4.1. Formación Yaguarí

Bossi y Navarro (1988), proponen la denominación litoestratigráfica de Subgrupo Yaguarí-Buena Vista, en el cual se incluye al conjunto de rocas sedimentarias con abundancia o predominio de colores de oxidación de origen sinsedimentario, que se encuentran sobre los “sedimentos pelíticos grises” y cubiertas por el grupo Batoví dorado.

El carácter de subgrupo lo aplican dado que ambas formaciones tienen como característica en común y sobresaliente (en todo el supergrupo Gondwana) ser las únicas que poseen colores de oxidación sinsedimentarios.

Para denominar a la Fm. Yaguarí, adoptan el criterio de Ferrando y Andreis, por considerarlo el enfoque más elaborado y sustentado por relevamiento geológico a escala 1/100.000 de extensas áreas de los departamentos de Cerro Largo, Rivera y Tacuarembó, pero, modifican este criterio al proponer darle nombre a dos miembros dentro de la formación: miembro San Diego (basal) y miembro Villa Viñoles (superior).

Ferrando y Andreis, citados por Bossi y Navarro (1988), indican que la Fm. Yaguarí sigue en concordancia con la Fm. Melo con contacto gradacional, mientras que en los alrededores de las islas cristalinas cuñapirú-vichadero y Aceguá se apoya directamente sobre las rocas predevonianas, y en otras áreas de la cuenca se apoya directamente sobre la Fm San Gregorio. Falconer et al., citados por Bossi y Navarro (1988) mencionan que con la aparición de tonos oxidantes en el paquete sedimentario (respecto a la infrayacente Fm Melo) inicia la base de la formación Yaguarí.

A las tonalidades reductoras de la Fm. Melo, se le van agregando tonos rojizos (10R6/6, R4/6), violáceos (5R5/4) y borravino (10R4/2); estos tonos se hacen más frecuentes hacia el tope de la unidad, donde constituyen los colores dominantes.

Se plantea que en la parte inferior de la unidad los diversos litosomas se presentan como estratos tabulares con contactos planos definidos o transicionales, y con estructuras internas macizas, laminadas, y estructuras flaser. En la parte superior, disminuyen los calcáreos y aumenta la participación de las litologías arenosas, asociadas con una mayor lenticularidad de las mismas, relacionadas con la aparición de estructuras en artesas de porte medio (Ferrando y Andreis, citados por Bossi y Navarro, 1988).

El miembro San Diego está integrado por más de 60% de limolitas, 35% de areniscas muy finas y 3% de lutitas. Las limolitas son micáceas, de cemento arcilloso que presentan en más del 90% de los casos estratificación paralela. Los colores abigarrados y oxidantes representan el 38%, los castaños y violáceos el 30%, el rojo un 19%, y el gris, verde y tonos de reducción un 13%.

La biotita es la mica más frecuente, dominando sobre la muscovita y vermiculita. Las areniscas son finas y muy finas, feldespáticas, micáceas de cemento arcilloso o calcáreo, la estratificación es ondulada o microcruzada. Los colores son todos de oxidación: castaños, violáceos, rojos y rosados. Esta aparición de colores exclusivamente de oxidación en las areniscas finas es uno de los caracteres definitorios de la formación.

En cuanto a su estructura y potencia, se plantea que las areniscas aparecen siempre interestratificadas con limolitas, siendo estas últimas las rocas dominantes. Las areniscas pueden aparecer en niveles de hasta un metro de potencia, siendo lo normal que no sobrepasen 50 cm. La asociación de limolitas y areniscas determinan una estratificación paralela característica de este miembro, no ocurriendo afloramiento que no contengan limolitas, y en la enorme mayoría de los casos, con niveles de 5 a 80 cm de areniscas muy finas de colores de oxidación (Bossi y Navarro, 1988).

Bossi y Navarro (1988) no proponen una sección tipo, toman provisoriamente como tipo la localidad de San Diego, dado que los mejores afloramientos no se encuentran en ningún lugar geográfico notorio. A su vez, proponen tentativamente como afloramientos tipo los que se encuentran a 7 km al Este de Isidoro Noblia y el que se encuentra a unos 3 km al Norte de Mangrullo.

El miembro Villa Viñoles, definido por Bossi y Navarro (1988), comprende la alternancia de limolitas y areniscas en espesores individuales siempre superiores a un metro. Las areniscas dominan (65%), son predominantemente finas y muy finas, bien seleccionadas, subredondeadas, feldespáticas y micáceas, con cemento arcilloso en el 60% de los casos y calcáreo en el resto. La estructura dominante es la estratificación paralela o cruzada, siendo raras las de estructuras masivas.

Los colores son netamente oxidantes, siendo los más comunes el rojo, violeta, marrón, amarillo, rosado los mayoritarios (60%), siguiendo los abigarrados con blanco o verde (22%), ocurriendo en menor medida colores reductores como verde y gris (10%) y raras areniscas blancas (6%).

Las limolitas (35%) son micáceas y arcillosas, con dominante estratificación paralela, el color más frecuente es el rojo, siendo menos frecuentes los tonos violáceos o castaños, pero no son raras las limolitas de colores abigarrados.

El cemento, tanto para las areniscas como para las limolitas, está constituido por montmorillonita cálcica.

Otras litologías secundarias, pero de importancia económica son los nódulos, y lentes calcáreos, como también los lentes de montmorillonita cálcica de altísima pureza. Elizalde, citado por Bossi y Navarro (1988), menciona que la mineralogía de las arcillas muestra una mayor frecuencia de esmectitas que pueden llegar a formar niveles prácticamente puros. La illita y la clorita aparecen en bajo porcentaje, y desaparece la caolinita.

La sección tipo propuesta por Bossi y Navarro (1988) es un perfil descrito por Elizalde, ubicado a 600 metros al Sur de la localidad de Villa Viñoles, departamento de Cerro Largo. Bossi y Navarro (1988) indican que esta localidad se encuentra apoyada sobre rocas pertenecientes al miembro San Diego, pero inmediatamente al Sur de la citada localidad pasa una importante falla que hace que a solo 600 metros de la orilla del poblado aparezca una excelente exposición de las rocas del miembro Villa Viñoles.

Por este motivo consideran provisoriamente la denominación de dicho miembro y tomar como sección tipo el citado afloramiento.

#### 2.4.2. Formación Buena Vista

La Fm. Buena Vista definida por Ferrando y Andreis, citados por Bossi y Navarro (1988) es caracterizada por la predominancia de areniscas finas (existiendo muy finas y medias frecuentes) bien seleccionadas, subangulosas o subredondeadas, micáceas en su mayoría, predominantemente arcósicas, de cemento arcilloso y en la mayoría de los casos son de estratificación paralela llegando a ser en algunos casos lajosas.

El color es muy característico, siendo ampliamente el color rojo el que domina. Los abigarramientos son escasos, se expresan como intercalaciones de niveles de color gris verdoso muy claro de manera discordante como concordante con la estructura.

Las limolitas se desarrollan interestratificadas con las areniscas, son bien seleccionadas, micáceas, de cemento arcilloso y estratificación paralela. El color en este caso también es predominantemente rojo. Es muy característico la ocurrencia de diastemas en los que han ocurrido eventos de erosión que han desintegrado a los estratos de limolitas y redistribuido sus trozos fracturados y redondeados para formar conglomerados intraformacionales.

La formación Buena Vista está integrada por areniscas finas, medias, gruesas y conglomerádicas, siempre de color rojo y feldespáticas con estratificación cruzada evidente y dominante, siendo las de grano grueso más frecuentes que las finas. Con las areniscas se interestratifican lentes calcáreas y niveles de conglomerados. Las lutitas y las rocas limosas resultan inexistentes o escasas. Los conglomerados (de extraclastos) forman lentes de hasta 1 m de potencia, compuestos por 60 a 80% de clastos bien rodados en una matriz arenosa.

Ferrando y Andreis, citados por Bossi y Navarro (1988), proponen que esta formación está integrada por areniscas finas, hasta muy gruesas y menores cantidades de pelitas, conglomerados finos clasto sostén y conglomerados intraformacionales.

El conjunto de litologías exhibe una llamativa homogeneidad cromática en tonos rojizos (10R4/6), con ocasionales estratos delgados color blanco amarillento (5Y8/2) probablemente productos de la decoloración.

La estratificación es definida, con neto predominio de estratos lenticulares de base irregular erosiva con frecuentes intraclastos pelíticos, exhibiendo abundantes estructuras entrecruzadas en artesa agrupadas de porte medio. La estratificación tabular es menos frecuente, siendo de porte pequeño a medio y pudiendo ser macizas o de lineación por partición. Los estratos pelíticos son lenticulares y macizos.

De Santa Ana et al. (2006b) proponen que la formación Buena Vista está constituida por areniscas finas medias, localmente gruesas a muy gruesas, con niveles de ortopsefitas y areniscas conglomerádicas de variada característica y composición. Las areniscas son de poca matriz pelítica y abundante cemento carbonático. Los granos de la fracción arenosa son de texturas que marcan diferentes grados de madurez.

Las tonalidades primarias son rojizas, ocurriendo rosados y blanquecinos muchas veces vinculados a procesos de decoloración. Asociados a las areniscas se desarrollan potentes paquetes pelíticos rojos masivos débilmente laminados con estructuras de deformación.

Los términos gruesos están representados por niveles centimétricos a decimétricos de conglomerados con clastos de hasta 10 cm de diámetro.

La formación Buena Vista se divide en dos miembros: colonia Orozco y cerro Conventos. El miembro colonia Orozco ocurre en el centro-Sur y Sureste de la cuenca, con las mejores exposiciones en la región homónima al Norte y Noreste de la ciudad de Melo, y a lo largo de la Cuchilla Grande. Colonia Orozco está integrado por una sucesión de areniscas finas a medias, localmente gruesas, con poca matriz pelítica, con estratificación cruzada en aristas y con laminación paralela a ondulada. Los colores dominantes son rojos.

Las estructuras sedimentarias predominantes de este miembro son estratificación cruzada planar, tangencial y en aristas, con estratos de pequeño a mediano porte y con ángulos bajos.

Las arcillitas y pelitas arenosas rojas son masivas o con laminación plano paralela, a veces mal definida, con figuras de deformación de tipo calcos de carga. Asociadas, se localizan concreciones carbonáticas de forma elipsoidal y septarias de varios tamaños, alcanzando los 20 cm de diámetro.

En la base del miembro Colonia Orozco, los paquetes arenosos presentan en el tope ripples simétricos, con laminación ondulada interna que permite relacionarlos con el retrabajo por la acción de olas. Asociados también se encuentran 3 a 4 niveles de intraconglomerados con intraclastos pelíticos rojos muy redondeados y bioclastos compuestos predominantemente de huesos de reptiles y anfibios (De Santa Ana et al., 2006b).

El miembro Cerro Conventos tiene como sección tipo el cerro homónimo, ubicado al Noreste de la ciudad de Melo. En este cerro ocurre una potente sucesión de areniscas (más de 40 m) predominantemente cuarzosas, de muy buena selección, con estratificaciones horizontales y cruzadas de alto ángulo y gran porte, interpretados como depósitos eólicos duneiformes y de sabana de arena, que integran el tope de la formación Buena Vista.

En los alrededores del Cerro Conventos se observan las relaciones de contacto concordantes con interdigitaciones de esta sucesión eólica con las areniscas y pelitas rojas y rojizas que integran a la Fm Buena vista.

Las relaciones de contacto del miembro Colonia Orozco son graduales limitando con las limolitas y areniscas varicolores del tope de la Fm Yaguarí en el sector oriental de la cuenca (De Santa Ana et al., 2006b).

### 2.4.3. Hidrogeología

Las aguas subterráneas juegan un papel fundamental y creciente para el consumo público y privado en el mundo, como fuente de abastecimiento urbano, rural, agrícola e industrial.

En las últimas décadas se ha constatado un importante incremento de su demanda frente a la de aguas superficiales. En comparación con éstas, son varias las ventajas que poseen las aguas del subsuelo, entre otras cabe destacar: frecuente disponibilidad en o cerca del lugar de demanda; puesta a disposición relativamente económica; calidad natural; gran potencial de almacenamiento; y reducido riesgo de contaminación.

En Uruguay, por la conformación geológica de su subsuelo, hay varias regiones que ofrecen la posibilidad de explotar este tipo de recurso hídrico; en particular, en aquellas cuencas sedimentarias las cuales poseen unidades subsuperficiales con buena porosidad y permeabilidad, permitiendo que el recurso agua se aloje en los poros, conformando acuíferos porosos (Montaño, 2004).

El miembro inferior de la Fm. Yaguarí y la Fm. Buena Vista se comporta como acuíferos de baja productividad. El acuífero Yaguarí se comporta como acuífero libre, al Norte de la Ciudad de Melo se encuentra de forma confinada por los sedimentos de la formación Buena Vista.

En el área de afloramiento Carbonífera-Pérmica de la Cuenca Norte, esta formación ocupa el 55% del área y es el acuífero que consta con más pozos. Este acuífero está conformado por areniscas (65%) y limolitas (35%) siendo los niveles más permeables pertenecientes al miembro superior, el cual está formado por alternancia de areniscas finas y muy finas rojas y limolitas rojas.

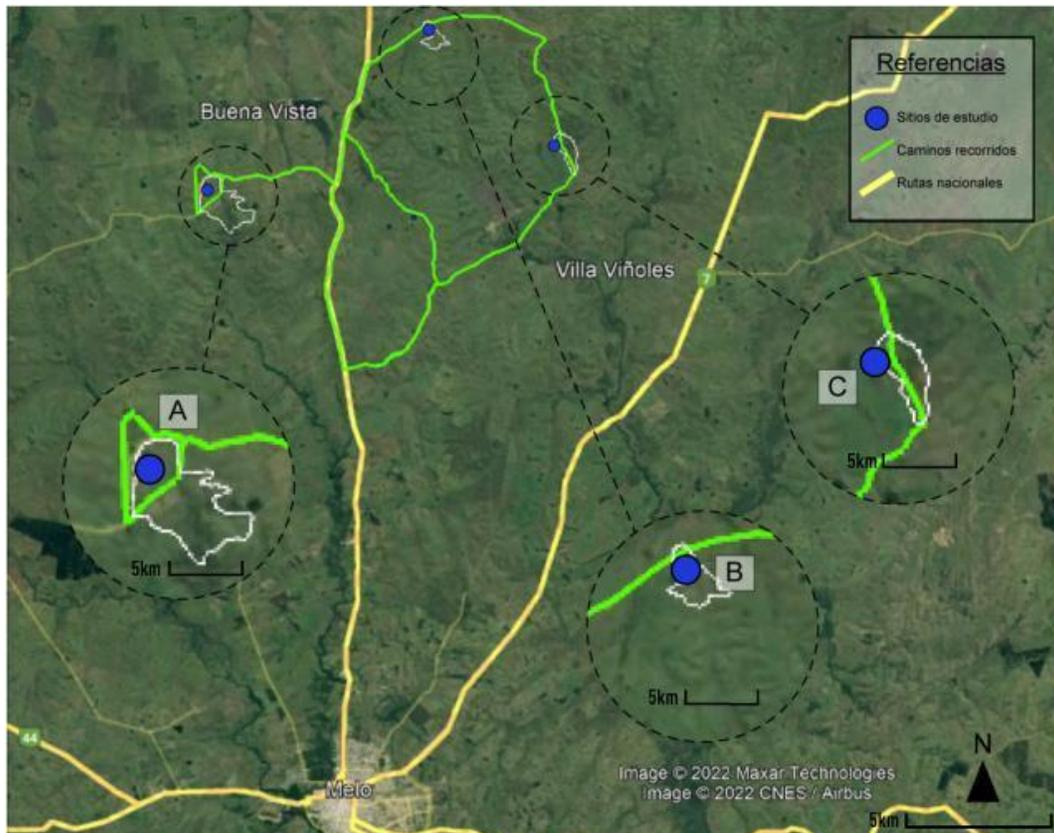
El miembro inferior está compuesto por limolitas micáceas y arcillosas de baja permeabilidad, y en menor proporción, areniscas finas a muy finas de buena selección conformando un acuitardo.

Las perforaciones que sustraen agua de este acuífero son en su mayoría someras, presentándose entre profundidades variables de entre 10 a 40 metros con una media de 4 metros. Los caudales son bajos, la mayoría de entre los 0 y 2 m<sup>3</sup>/h, con una media de 2,5 m<sup>3</sup>/h y una máxima de 20 m<sup>3</sup>/h. Se encuentra una relación entre pozos de mayores caudales (entre 10 y 20 m<sup>3</sup>/h) y la presencia de areniscas más gruesas (Capeci, citado por Mármol, 2021).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 UBICACIÓN

La zona de estudio comprende tres sitios distintos (A, B, C), ubicados al NW del departamento de Cerro Largo, a 25 km aprox. de la ciudad de Melo. A la misma se llega mediante las rutas No. 8 y No. 7 (como se observa en la figura 13). Por la ruta 8 rumbo a la localidad Buena Vista, se encuentra el sitio "A" (hacia el W de la ruta), siguiendo por la ruta 8 hacia el N, y tomando el camino hacia Mangrullo (hacia el E de la ruta) se llega al sitio de estudio B. Por la ruta 7 hacia Villa Viñoles, se llega al sitio de estudio "C".



En verde se indican los caminos recorridos, y en azul se indican los sitios de estudio.

Figura 12. Ubicación de los sitios de estudio

Fuente: adaptado de Google earth.

## 3.2 ANTECEDENTES

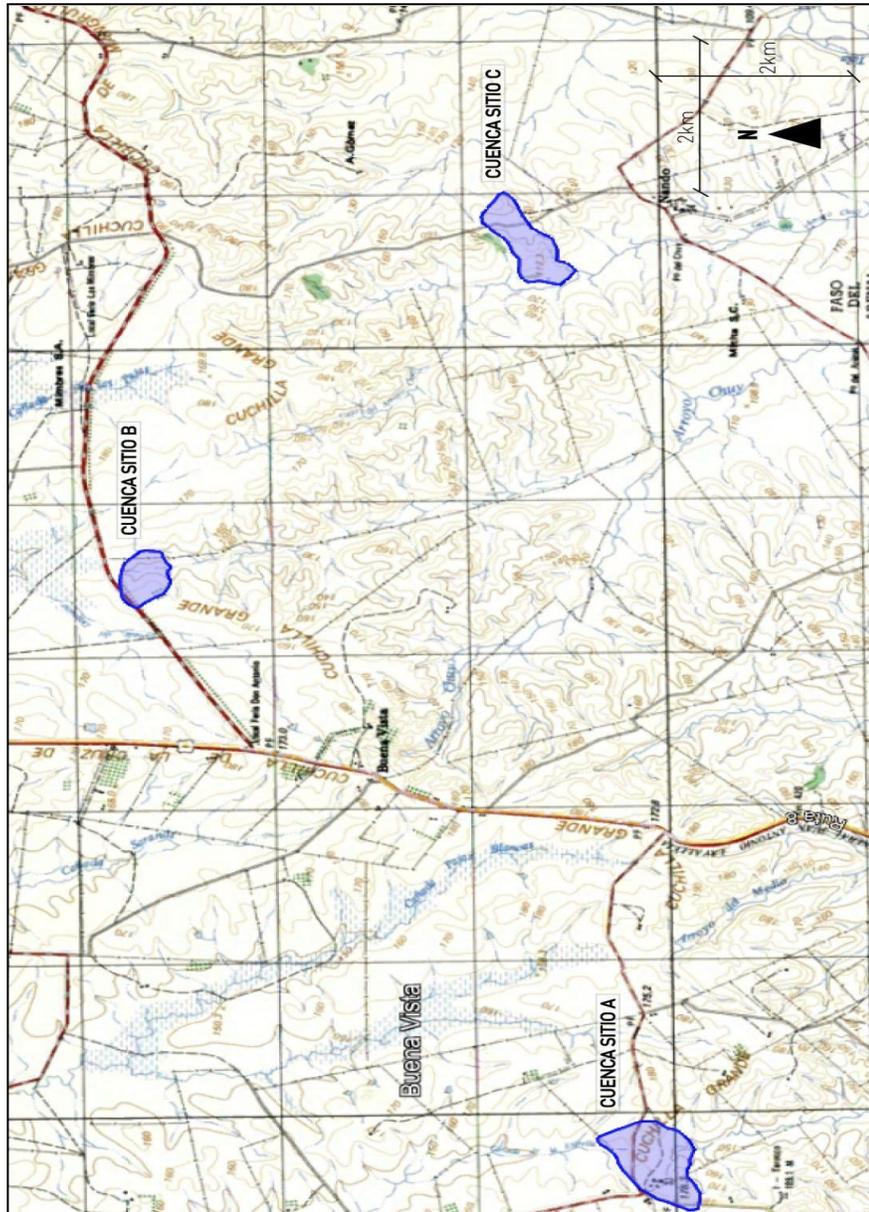
### 3.2.1 Clima

Según información publicada por INUMET de las estadísticas climáticas del periodo 1961-1990, la estación meteorológica de Melo, ubicada en las coordenadas 32.3669 (latitud) y 54.193(longitud), registra una temperatura media anual de 17°C, una máxima media de 23,4°C y una mínima media de 11,8°C. La precipitación acumulada media anual es de 1238 mm. Las precipitaciones se caracterizan por su extremada irregularidad y variabilidad. Según el programa de Erosión versión 6.2, el factor R para la localidad más cercana (Melo) es de 555 J/Ha.

### 3.2.2 Topografía e hidrografía

El sitio de estudio se encuentra en la carta topográfica “D-14: Buena vista” (figura 18). La zona presenta curvas de nivel que se desarrollan desde la altura de 120 metros hasta los 190 metros. El relieve está definido por la cuchilla grande que atraviesa la zona en dirección SW-NE, y por la cuchilla de la cruz de piedra que cruza en dirección S-N sobre la ruta No. 8.

La hidrografía presente en el lugar consta del arroyo “Chuy” (y sus afluentes) el cual corre en dirección W-E, como principal cuerpo de agua. Se encuentran diferentes cañadas con un rol secundario sobre la influencia en las zonas de estudio, estas son: cañada de Las Pajas, cañada del Depósito y cañada Pajas Blancas.



En azul se señalan las cuencas hidrográficas donde se encuentran los sitios de estudio. Escala original.

Figura 13. Carta topográfica y sitios de estudio

Fuente: adaptado de MDN. SGM (1985).

### 3.2.3 Geología

La zona de estudio se encuentra dentro de la cuenca Norte, y sobre las formaciones Buena Vista y Yaguari según la carta geológica 1/500.000 (escala original) como se observa en la siguiente imagen.

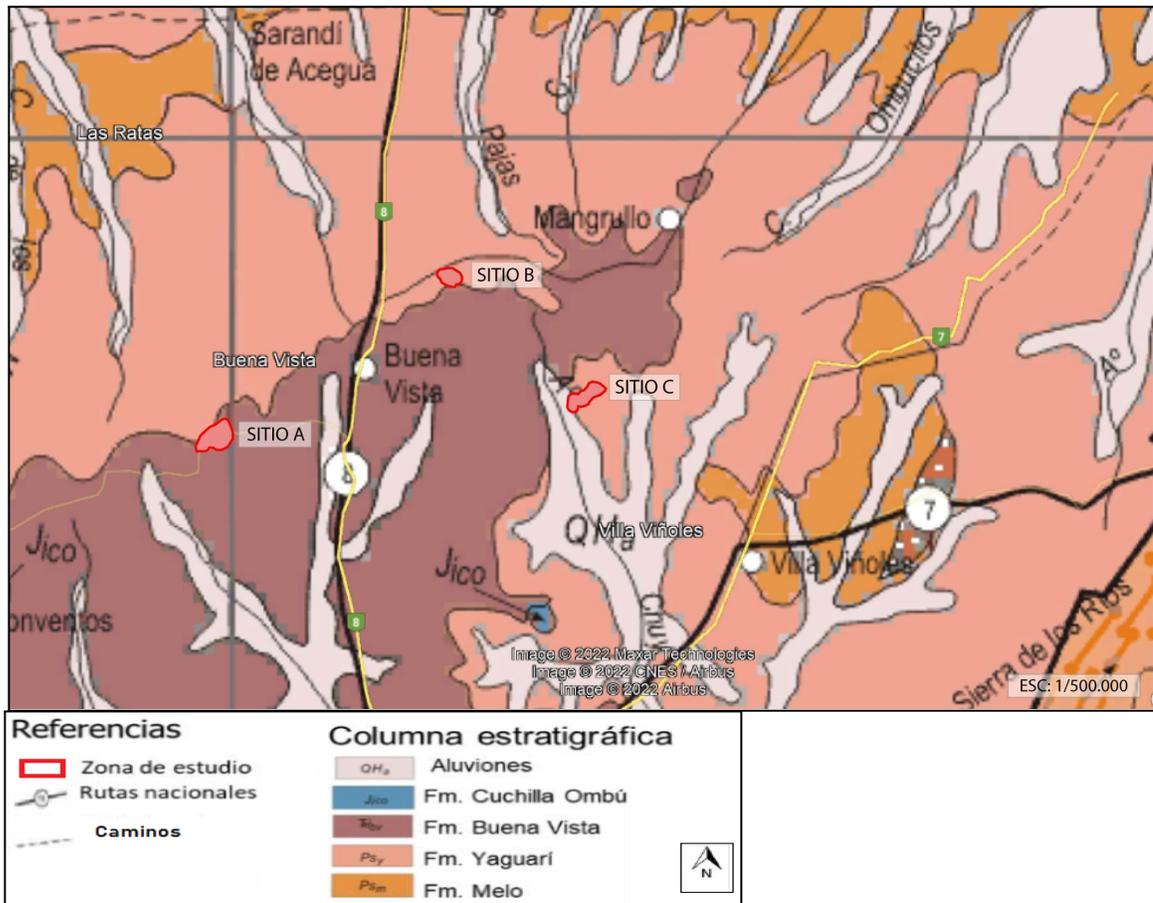


Figura 14. Carta geológica y sitios de estudio

Fuente: modificado de Bossi y Navarro (2001).

Según Bossi y Navarro (1988), la Fm. Yaguari comprende, en términos generales, pelitas, areniscas finas y escasos calcáreos lenticulares o concrecionales. Los autores diferencian dos miembros, el miembro San Diego (basal) y el miembro Villa Viñoles (superior).

El miembro San Diego está compuesto por limolitas micáceas de cemento arcilloso y estratificación paralela, areniscas muy finas y escasas lutitas, ambas de estratificación ondulada o microcruzada.

Los colores más frecuentes son abigarrados, oxidantes, castaños y violáceos, mientras que los menos frecuentes son el gris, verde, y tonos de reducción. Las areniscas, siempre de color oxidantes, aparecen interestratificadas en alternancias decimétricas a métricas de forma paralela con las limolitas (Bossi y Navarro, 1988).

Según Bossi y Navarro (1988) *“El miembro Villa Viñoles consta de areniscas dominantes, finas y muy finas, bien seleccionadas, redondeadas, feldespáticas, micáceas de cemento arcillosos y de estratificación paralela o cruzada. Los colores de las areniscas son netamente oxidantes, siendo los más comunes el rojo, violeta, marrón, amarillo y rosado, siguiendo los abigarrados con blanco o verde, y en menor medida colores reductores como verde o gris. Las areniscas se alternan con limolitas micáceas y arcillosas, de estratificación paralela, siendo el rojo el color más frecuente. El cemento, tanto para las areniscas como para las limolitas, está constituido por montmorillonita cálcica. Otras litologías secundarias son nódulos y lentes calcáreos, y lentes de montmorillonita cálcica”*.

La formación Buena Vista, está integrada por areniscas finas, medias, gruesas y conglomerádicas, siempre de color rojo y feldespáticas, con estratificación cruzada evidente y dominante, siendo las de grano grueso más frecuentes que las finas. Con las areniscas se interestratifican lentes calcáreos y niveles de conglomerados. Las lutitas y las rocas limosas resultan inexistentes o escasas. Los conglomerados forman lentes de hasta 1 m de potencia, compuestos por 60 a 80% de clastos bien rodados en una matriz arenosa (Bossi y Navarro, 1988).

Ferrando y Andreis, citados por Bossi y Navarro (1988) proponen que esta unidad está integrada por areniscas finas, hasta muy gruesas, con menores cantidades de pelitas, conglomerados finos y conglomerados intraformacionales.

El conjunto de litologías exhibe una llamativa homogeneidad cromática en tonos rojizos (10R4/6), con ocasionales estratos delgados color blanco amarillento (5Y8/2) probablemente productos de la decoloración. De Santa Ana et al. (2006b), aportan que la formación Buena Vista está compuesta por una potente sucesión de areniscas finas a medias, rojas a blanquecinas, que se intercala con niveles pelíticos rojos y conglomerádicos.

De Santa Ana et al. (2006b) proponen la subdivisión de Buena Vista en dos miembros: Colonia Orozco y Cerro Conventos. El miembro Colonia Orozco está integrado por una sucesión de areniscas finas a medias, con poca matriz pelítica, de estratificación cruzada en artesas y con laminación paralela a ondulada. Los colores dominantes son rojos. Se encuentran niveles de intraconglomerados fosilíferos que poseen clastos de arcilla roja, pelitas y limo arcillitas masivas o con laminación mal definida. Asociados a estos niveles finos, se intercalan cuerpos arenosos blanquecinos con estratificación cruzada y laminación tipo ripple.

Las estructuras sedimentarias predominantes de este miembro son: estratificación cruzada planar, tangencial y en artesas, con estratos de pequeño a mediano porte y con ángulos bajos. Las arcillitas y pelitas arenosas rojas son masivas o con laminación plano paralela, a veces mal definida, con figuras de deformación de tipo calcos de carga. En la base del miembro Colonia Orozco, los paquetes arenosos presentan en el tope ripples simétricos, con laminación ondulada interna que permite relacionarlos con el trabajo por la acción de olas. Este miembro también presenta niveles de ortoconglomerados, clasto sostén, de composición oligomítica, que pueden observarse en las proximidades del Arroyo Zapallar en la Ruta 26, próximos a Bañado de Medina y en las proximidades de Molles.

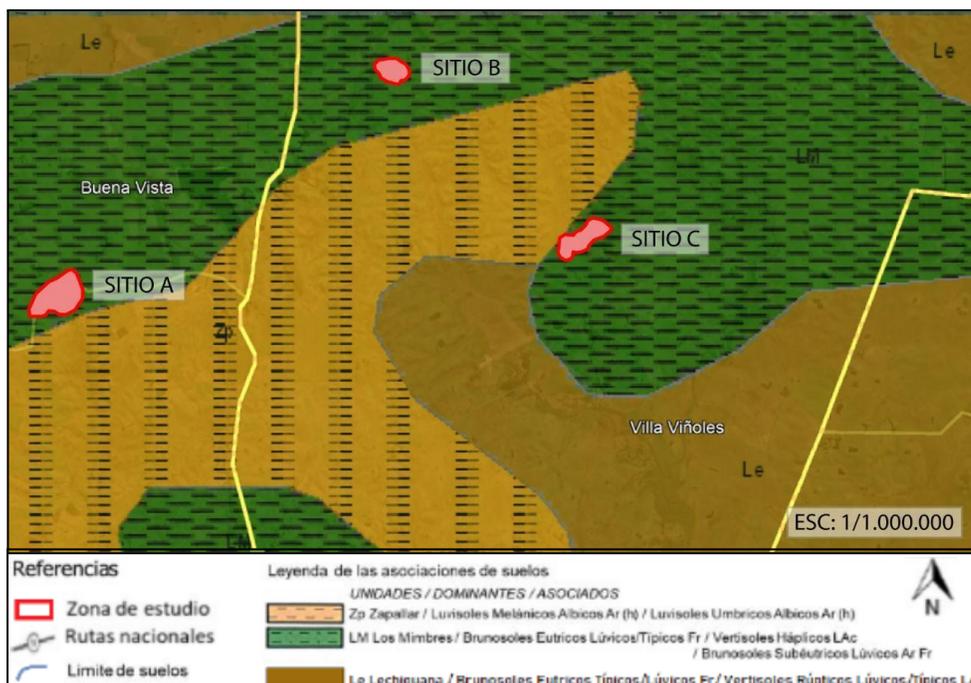
### 3.2.4 Suelos

#### 3.2.4.1 Unidades de suelos del Uruguay

De acuerdo a la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (MAP. DSF, 1976), que se observa en la figura 15, las zonas de estudio se encuentran sobre la unidad de suelos Los Mimbres casi en su totalidad, ocupando un pequeño porcentaje del área la unidad Zapallar. La primera unidad consta de Brunosoles eútricos lúvicos / típicos francos como suelos dominantes, y como accesorios presenta Vertisoles háplicos limo arcillosos y Brunosoles subéuticos lúvicos arenosos y francos.

Mientras que, la unidad de suelos Zapallar consta de Luvisoles melánicos albicos arenosos como suelos dominantes, y de Luvisoles umbricos álbicos arenosos como suelos accesorios.

A los alrededores de estas unidades, se encuentra la unidad Lechiguana la cual consta de Brunosoles eútricos típicos/ lúvicos francos, y Vertisoles rúpticos típicos / lúvicos limo arcillosos, como suelos dominantes.



Escala original

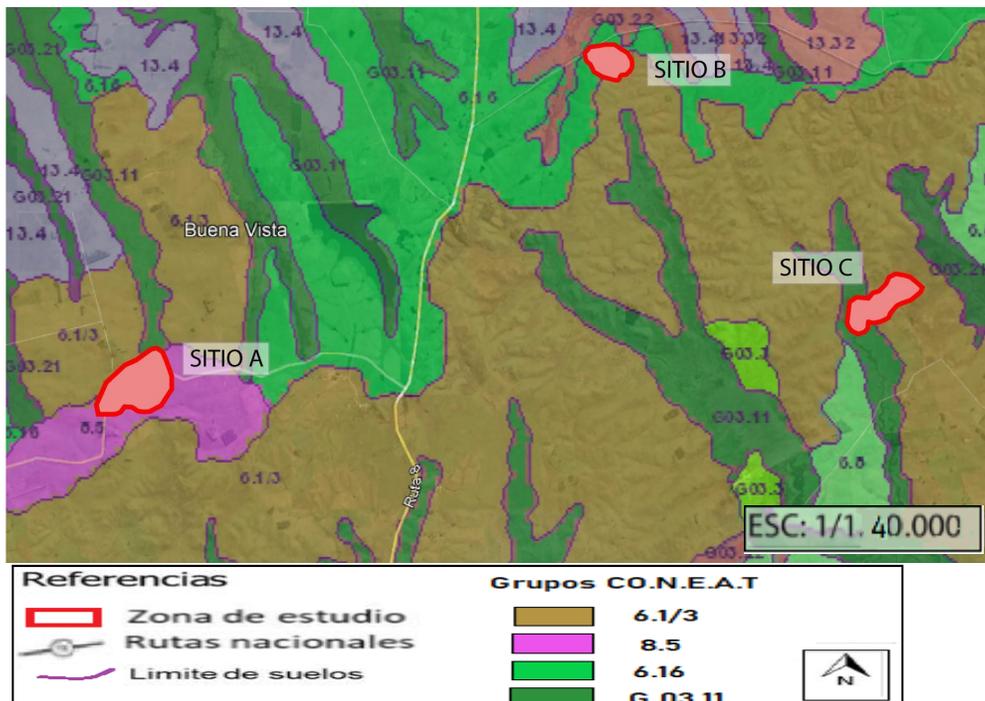
Figura 15. Carta de reconocimientos de suelos y sitios de estudio

Fuente: modificado de MAP. DSF (1976).

### 3.2.4.2 Grupos de suelos CONEAT

Los grupos CONEAT son agrupaciones de suelos homogéneas en cuanto a un índice de productividad que se basa en la producción de carne bovina, ovina y lana en pie.

Estos grupos son caracterizados mediante fotointerpretación a escala 1:40.000, verificaciones de campo y análisis físico-químicos de los suelos (MGAP. DGRNR, 2020). Los grupos de suelos CONEAT presentes en el área se muestran en la figura 16, no resultando ninguno de ellos de prioridad forestal.



Escala original.

Figura 16. Grupos de suelos CONEAT

Fuente: modificado de MGAP. DGRNR (2020).

El grupo 6.1/3 se localiza en los alrededores del pueblo Nando, en el Depto. de Cerro Largo. El relieve está conformado por colinas sedimentarias no rocosas con pendientes entre 10 y 14%. Los suelos dominantes son Litosoles Subéutricos Melánicos, de textura franco limosa, color pardo muy oscuro, muy bien drenados y fertilidad media.

Asociados aparecen Brunosoles Éutricos Lúvicos, Típicos (Praderas Negras) moderadamente profundos, de color pardo muy oscuro, textura franca arcillo arenosa, bien drenados y fertilidad alta. Ocupan las partes bajas de las laderas.

La vegetación es de pradera estival. El uso es pastoril, principalmente estival. Admite agricultura sólo donde hay Brunosoles Éutricos y con medidas intensivas de conservación. Este grupo integra la unidad Los Mimbres de la carta a escala 1:1.000.000 (MGAP. DGRNR, 2020).

El grupo 8.5 está integrado por dos asociaciones de suelos. La primera ocupa zonas grandes entre los arroyos Corrales y Mangueras, siendo el relieve de colinas sedimentarias no rocosas y lomadas fuertes, con pendientes entre 5 y 8%. El material geológico está formado por areniscas de color rojo. Los suelos dominantes son Acrisoles Ócricos Albicos, profundos, de color pardo oscuro, textura franco arenosa, imperfectamente drenados y fertilidad extremadamente baja, y Argisoles Dútricos Melánicos Abrúpticos. La segunda asociación, que sí está comprendida en este estudio, se localiza entre los arroyos Zapallar y Sarandí, en el Dpto. de Cerro Largo.

El material geológico lo constituyen areniscas rojas de la formación Yaguarí o areniscas re depositadas sobre esta. El relieve es de colinas sedimentarias no rocosas y lomadas fuertes con pendientes de 5 a 10%. Los suelos dominantes son Luvisoles Melánicos Albicos moderadamente profundos, de color pardo oscuro, textura franco arenosa, imperfectamente drenados y fertilidad muy baja. Asociados se encuentran Luvisoles Úmbricos Albicos muy profundos, de color pardo oscuro, textura franco arenosa, imperfectamente drenados y fertilidad extremadamente baja.

La vegetación es de pradera estival, pero mejor que la de los otros grupos de la zona 8, lo que permite realizar ciclo completo e invernada. Se puede hacer agricultura con medidas intensas de conservación. Se corresponde con la unidad Zapallar de la carta (MGAP. DGRNR, 2020).

El grupo 6.16 ocupa importantes zonas en el Dpto. de Cerro Largo. El relieve está constituido por lomadas fuertes y colinas sedimentarias no rocosas, con pendientes de 3 y 6%. Los suelos dominantes son Brunosoles Étricos Lúvicos/Típicos moderadamente profundos, de color pardo muy oscuro, textura franca arcillo arenosa, bien drenados y fertilidad alta. Asociados aparecen Vertisoles Rúpticos Lúvicos/Típicos profundos de color negro, textura arcillosa, fertilidad muy alta y drenaje bueno.

La vegetación es de pradera estival, aunque de buena producción invernal, con especies finas, por lo que son muy buenos campos de invernada. Se puede hacer agricultura con medidas intensivas de conservación. Se corresponde con la unidad Los Mimbres de la carta (MGAP. DGRNR, 2020).

El grupo G03.11 comprende llanuras bajas, adyacentes a vías de drenaje. Las pendientes son prácticamente de 0%, aunque puede haber mesorelieve. Los suelos son principalmente Gleysoles Lúvicos Melánicos de texturas variables, aunque generalmente finas, muy profundos y Fluvisoles Heterotexturales Melánicos con texturas variables, muy profundos. Pueden ocurrir inundaciones por períodos de tiempo variable.

La vegetación es normalmente de selva fluvial y parque cerca de las vías de drenaje e hidrófila, herbazal limpio, en los lugares más alejados. En depresiones donde el drenaje es más pobre pueden aparecer pajonales. El uso de este grupo está limitado por el riesgo de inundación a pastoril de verano. Los grupos de la subzona G03 corresponden a la unidad Río Tacuarembó de la carta (MGAP. DGRNR, 2020).

En la zona de estudio no existe cartografía de suelos más detallada que la informada.

### 3.3 ELECCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

Tomando los antecedentes de la zona y los resultados del proyecto de Investigación + Desarrollo 2016: “Caracterización de la formación Yaguarí, una unidad de gran extensión al Noreste de Uruguay”, financiado por la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC), se definieron los sitios de estudio. La elección de la cárcava para su estudio estuvo basada en la serie histórica de las imágenes satelitales de Google Earth, optando por aquella que muestra signos de evolución con el correr de los años, y que hoy en día se presenta activa.

También se tuvo en cuenta los antecedentes de uso y manejo, para diferenciar su impacto en el proceso erosivo (origen antrópico o natural), para ello se entrevistó a productores vinculados al sitio y se analizaron las fotos aéreas de 1966 del Servicio Geográfico Militar a través de estereoscopia.

El análisis de los perfiles suelo-saprolito-roca, se realizó donde naturalmente se pudieron apreciar. En la descripción se propuso describir el perfil completo, lo que implica definir hasta donde llegan y cuáles son los contactos entre el suelo, el saprolito y la roca. Rose et al. (2003) indican que existe la necesidad de redefinir el concepto de suelo para poder incluir la zona de roca meteorizada que soporta crecimiento radicular.

El saprolito se describió mediante criterios edafológicos y geológicos, dada la naturaleza de transición del material.

Los criterios iniciales de selección de los sitios para realizar los perfiles edafológicos fueron la variación de litologías y suelos. Mediante la etapa de gabinete, se definieron distintos puntos de cateo y muestreo, a lo largo de transectas que contemplan distintas posiciones topográficas, desde el alto de la ladera, pasando por la zona media y llegando a la parte baja.

### 3.4 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

Se consideraron los antecedentes para las unidades presentes en cada sitio, realizándose la foto lectura de los sitios seleccionados.

Las observaciones realizadas en cada sitio toman los criterios expuestos por Mármol (2021) considerando las unidades presentes en la zona de estudio.

Los colores fueron comparados con la tabla Munsell.

### 3.5 CARACTERIZACIÓN EDAFOLÓGICA

Los perfiles realizados con taladro holandés extensible se hicieron hasta la profundidad donde se identificó a la roca fresca o meteorizada, que por lo general dificulta el continuar dada la dureza del material.

Las descripciones constan de designación de los horizontes, por medio de su espesor (cm), textura, estructura, transición, moteados, concreciones y reacción al ácido clorhídrico.

Además, se describieron las propiedades asociadas: relieve general, relieve local, pendiente, rocosidad, pedregosidad, erosión actual, inundación y drenaje externo. Se tomaron fotos de cada horizonte y del perfil en conjunto, se etiquetaron y guardaron las muestras para ser analizadas en laboratorio.

La descripción de cada horizonte se realizó tomando como base el manual de descripción de suelos considerando: textura, presencia/ausencia de revestimientos, moteados, y/o concreciones, reacción al ácido (HCl), la presencia o no de raíces, y el color a través de la tabla de Munsell.

Descritas las mismas, se definieron perfiles modales, y horizontes representativos (de los cuales se prepararon muestras de 100 gr) para enviar a laboratorio y realizar análisis químicos y físicos: bases (Ca, Mg y K), carbono orgánico, y textura, para con estos datos caracterizar la zona.

Los análisis fueron realizados en el Laboratorio del Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía.

Las muestras de los perfiles seleccionados fueron secadas a estufa por 48 horas a 40°C y molidas a un tamaño menor a 2 mm.

Los análisis para determinar la textura fueron: arcilla por el método del hidrómetro (Forsythe) previa eliminación del carbono orgánico (C.O.) con perhidrol. El contenido de arena se determinó por tamizado y posterior pesado, y el de limo por diferencia.

Los análisis de carbono orgánico se realizaron mediante el método Walkley-Black). La materia orgánica fue estimada a partir del C.O. utilizando un factor empírico (1.724) que supone un 58% de C.O. en la M.O. Los resultados de bases totales fueron obtenidos mediante extracción con acetato de amonio 1 M bufferado a pH 7 y determinados por absorción atómica, Ca y Mg, y por emisión el K.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Ferrando, M. 2022. Com. personal

## 4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las salidas a campo en cada sitio de estudio, y los datos de análisis en el laboratorio.

### 4.1 SITIO A

En la figura 17 se compara la foto aérea de 1966 y la imagen satelital del 2022. De este modo se busca relacionar el uso y manejo antecedente en el sitio, y la situación actual del mismo, para discernir desde el presente la evolución del caso.

En color gris, se delimita el sitio A en 1966, mientras que en color verde se señala el sitio A en la actualidad. En azul se indica la cuenca hidrográfica que aporta al sitio.

Según el responsable de las tierras, durante los años 2000 se realizaron cultivos de trigo, campo natural mejorado, y verdeo en rotación con maíz, laboreando superficialmente la tierra.

Hoy en día se realiza ganadería mixta bovina (producción de terneros) y ovino.



Figura 17. Ubicación sitio A

Con la figura 18 se puede observar el paisaje de lomadas fuertes, con pendientes del 2%. El manejo actual es de pradera mejorada, y natural



Figura 18. Relieve general, y tapiz herbáceo del sitio A

#### 4.1.1 Relevamiento geológico

A continuación, se presentan los datos obtenidos gracias a las descripciones a campo de las litologías presentes.

En los alrededores del sitio se pudieron apreciar areniscas finas a medias, horizontales, estructuras cruzadas de bajo ángulo. Niveles horizontales cementados con carbonato, escasos nódulos que decoloran a blanco crema.

En la figura 19 se aprecia la ubicación de los muestreos geológicos realizados, también se puede observar un detalle de las muestras relevadas.

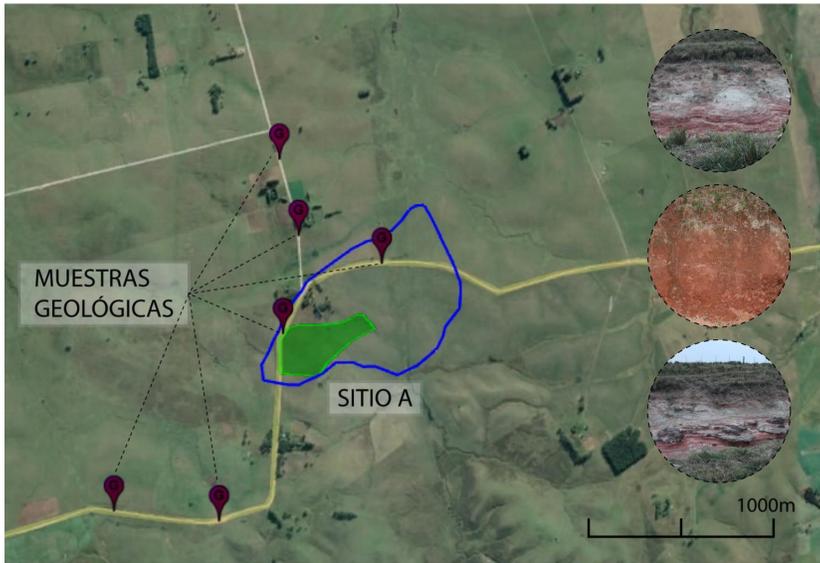


Figura 19. Localización muestreo geológico del sitio A

#### 4.1.2 Relevamiento edafológico

En la figura 20 se presenta la ubicación de los puntos de relevamiento edafológico que se realizaron en este sitio.



Figura 20. Localización perfiles edafológicos del sitio A

De los suelos estudiados, se seleccionó un perfil representativo (se destaca con un asterisco en la figura 20) en cada sitio. El perfil modal se obtuvo en lo alto de la ladera, en las coordenadas UTM -S21 762036/ 6436745, el mismo se observa en la figura 21.

En el siguiente cuadro se presenta la descripción realizada in situ del perfil modal del sitio "A".

Cuadro 3. Descripción perfil modal sitio A

Horizonte	Espesor (cm)	Descripción
A	0 - 30	Color 10 YR 2/1; Textura Ac; Transición gradual; Raíces 2-10 mm; Estructura bloques subangulares.
A2	30 - 104	Color 10 YR 2/1; Textura Ac ;Transición gradual; Raíces 1-2 mm; Estructura bloques subangulares; Moteados p/< 1 mm/C-n/Lim-c; Reacción HCl ++.
A3	104 - 121	Color 10 YR 3/1; Textura Ac;Transición gradual; Revestimientos aparentes películas de Ac de 1-2 mm; Raíces 1-2 mm; Estructura bloques subangulares; Moteados pequeños estratos delgados grises; Reacción HCl ++
AC	121 - 130	Color 7.5 YR 2.5/1;Textura Ac Ar; Transición gradual; Concreciones Ca/2-8mm/2-5%/Fr-d; Raíces 1-2 mm;Estructura bloques subangulares;Moteados: a/1 - 2 mm /C-n/límite-c /color 2.5 YR 4/8
C 1	130 - 146	Color 10 YR 5/1; Textura F Ac Ar; Transición gradual; Revestimientos aparentes películas de Ac de 1-2mm;Concreciones Ca/2-15mm/>5%/d y FeMn/1-2mm/2-5%/Fr; Raíces 1-2 mm; Moteados c/2-5 mm/C-t/límite-c; Reacción HCl +++
C 2	146 - 160	Color 7.5 YR 6/2; Textura F L; Transición gradual;Concreciones Ca/2-15mm/>5%/d; Moteados a/2-15 mm/C:t-n/límite-c/color 10R4/4; Reacción HCl +++
C 3	160 - 180	Color 10 R 4/4; Textura L F; Transición gradual;Concreciones Ca/5-15 mm/>5%/d; Moteados c/2-15 mm/C:s/Lim-a/color 2.5Y7/1; Reacción HCl +++

**Referencias:** textura: arcilloso (Ac)/ franco (F)/ arenoso (Ar)/ limoso (L).

Concreciones: Ca (de calcio) / FeMn (de hierro manganeso). Tamaño en mm, cantidad en % (< a 1%, 2 - 5 %, > 5%), y consistencia fr (friable), d (duras), si (silicificadas).

Moteados: cantidad p (< 2%), c (2 - 20%), a (>20%). Tamaño en mm. Contraste t (tenue), n (neto), s (sobresaliente). Límites a (abrupto), c (claro), d (difuso).

Reacción Hcl (intensidad): + (débil), ++ (moderada), +++ (fuerte).

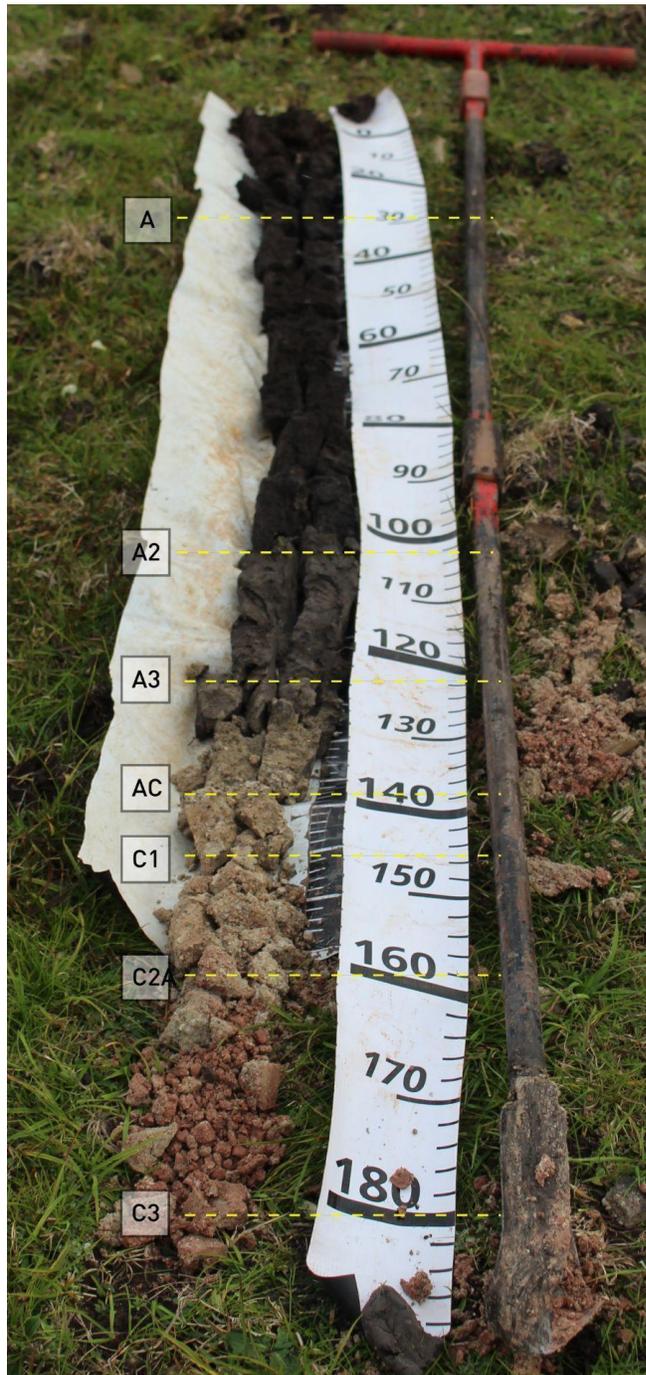


Figura 21. Perfil modal sitio A

A continuación, se presentan los datos analíticos obtenidos en el Laboratorio de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía.

Cuadro 4. Resultados de bases totales y materia orgánica sitio A

	Ca	Mg	K	C.O.	M.O.
<b>Muestra</b>	<b>cmolc/kg (meq/100g)</b>			<b>%</b>	
<b>Sitio "A" 0-12 cm</b>	20,27	7,33	1,03	3,7	6,4
<b>Sitio "A" 45-66 cm</b>	19,55	6,36	0,57	2,1	3,7
<b>Sitio "A" 96-104 cm</b>	26,03	8,54	0,72	0,9	1,5

Cuadro 5. Resultados texturales del sitio A

<b>Muestra</b>	<b>Granulometría</b>			<b>Clase textural</b>	
	<b>Arena</b>	<b>Limo</b>	<b>Arcilla</b>	<b>Nombre</b>	<b>Abreviación</b>
	----- % -----				
<b>Sitio "A" 0-12 cm</b>	17,4	25	57,6	arcilloso	Ac
<b>Sitio "A" 45-66 cm</b>	15,2	22,8	62	arcilloso	Ac
<b>Sitio "A" 96-104 cm</b>	14,7	18,5	66,8	arcilloso	Ac

Según los antecedentes el suelo pertenece a la unidad "Los Mimbres", y al grupo CONEAT 8.5, sumado a los datos obtenidos en el laboratorio, y con la descripción a campo, se estima que se trata de un Vertisol Háptico Ac.

De acuerdo a los antecedentes y a la descripción del horizonte más profundo, se considera que la formación Yaguarí es el material parental.

#### 4.1.3 Descripción de cárcavas

No se observan cárcavas activas en este sitio, los posibles inicios de las mismas parecen estar inactivos, como se puede ver en la figura 22. La litología presente, el relieve local, el piso empastado de la misma, y la presencia de tapiz herbáceo, conforman una situación favorable para que no se pierda el suelo.



Figura 22 . Tapiz herbáceo general en el contorno de la cárcava

Lo que sí se constató fue la presencia de pequeños canalículos (figura 23), probablemente producto del laboreo para preparar la tierra para la siembra. Por más que no se hayan observado cárcavas activas en este sitio, se debe tener en cuenta que las prácticas de manejo sean adecuadas para no generar problemas futuros.



Figura 23. Canalículos

## 4.2 SITIO B

En la figura 24 se compara la foto aérea de 1966 y la imagen satelital del 2022. De este modo se busca relacionar el uso y manejo antecedente en el sitio, y la situación actual del mismo, para discernir desde el presente la evolución del caso.

En color gris, se delimita el sitio B en 1966, mientras que en color verde se señala el sitio B en la actualidad. En azul se indica la cuenca hidrográfica que aporta al sitio.

El manejo actual es de pradera mejorada para el pastoreo mixto (no se efectuaron prácticas de laboreo según el productor encargado). Se aprecia que el uso y manejo dado, no presenta diferencias con el actual.

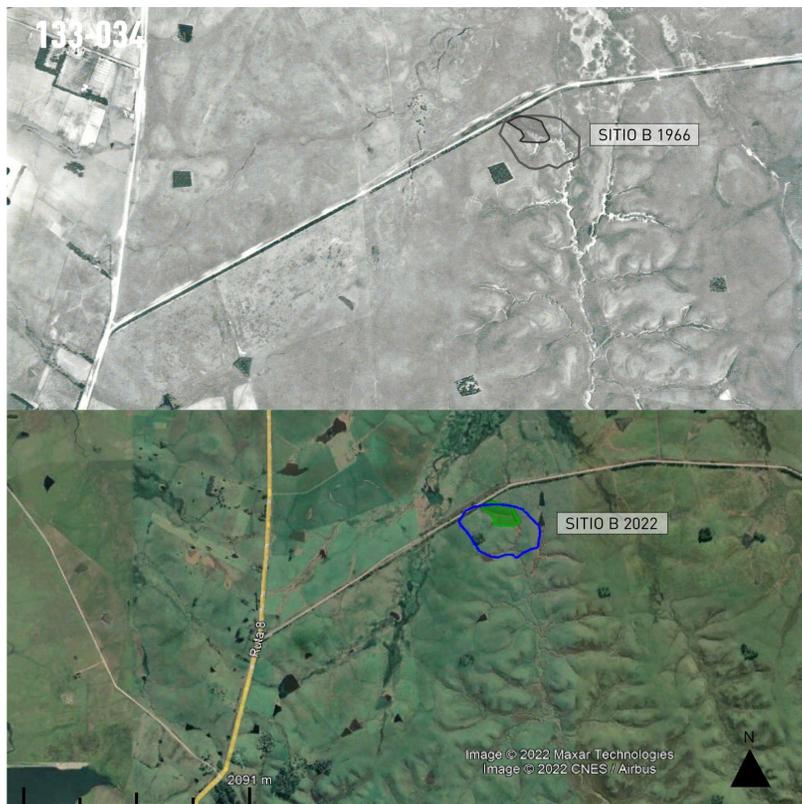


Figura 24. Ubicación sitio B

El paisaje general presenta lomadas con pendientes menores (figura 25) a 2%.



Figura 25. Relieve general del sitio B

#### 4.2.1 Relevamiento geológico

A continuación, se presentan los datos obtenidos mediante las descripciones in situ de las litologías presentes.

En la figura 26 se ilustra la ubicación de los relevamientos geológicos que se realizaron en este sitio (el asterisco indica el utilizado para la descripción).



Figura 26. Localización muestreo geológico del sitio

En el cuadro 6 se presenta la descripción realizada in situ del perfil geológico, y en la figura 27 se documenta el mismo.

Cuadro 6. Descripción perfil geológico sitio B

Profundidad (m)	Descripción
4,6 - 3,7	126 cm de arenisca muy fina, limosa, aparentemente masiva, de color ladrillo, bien seleccionada, cuarzo-feldespática, muy pocas micas (biotita, y pequeñas (muy escasas) escamas de pez color caramelo oscuro). Figura
3,7 - 3,6	10 cm de transición gradual con incremento leve de arcilla, mayor tenacidad en la roca y decoloración blanca en casi todo el nivel. Gran aumento de mica, cuarzo-feldesp. Pequeñas estructuras incipientes de onduladas muy mal conservadas. Figura 27b
3,6 - 2,7	90 cm de transición normal, va aumentando de a poco la fracción arena y las estructuras cruzadas (onduladas o ripples) de bajo ángulo. Hay niveles de decoloración a blanco, más friables. Después hay color rosado más suave que el nivel inferior. El aumento de arena no es mucho. Hay ripples de muy alta velocidad (aumento de velocidad), pero la capacidad de carga es la misma (cuerpo de agua poco profundo. Todos los estratos son tabulares, en todo el perfil. La Muscovita desciende mucho. Hay pequeños lentes arcillosos (incipiente estructura flaser). Figura 27c.
2,7 - 2,0	70 cm que gradualmente van pasando a arenisca finas de mejor selección y con un poco menos de contenido de arcilla y limo que los estratos inferiores. Se pierden estructuras ripples, parece haber una estructura masiva o no se aprecia estructura. Figura 27d
2,0 - superficie	200 cm, gradualmente se pasa a la pelita fina del estrato base. Presenta escama de pez (ornamenta de 4 dientes). Figura 27e
<b>Características generales</b>	Todos los agregados se rompen en prismas angulares (mayor tamaño los del nivel pelítico, 6 x 6 cm y de espesor variable). Las fracturas en nivel de ripples alcanzan los 40 cm máximo, y las del nivel base 30 cm máximo. El rumbo diaclasado es N60E (juego de líneas principales), el secundario es N50W y se mantiene para los estratos de arriba. El buzamiento de todo el perfil es 10° hacia el N49E. Figura 27 f

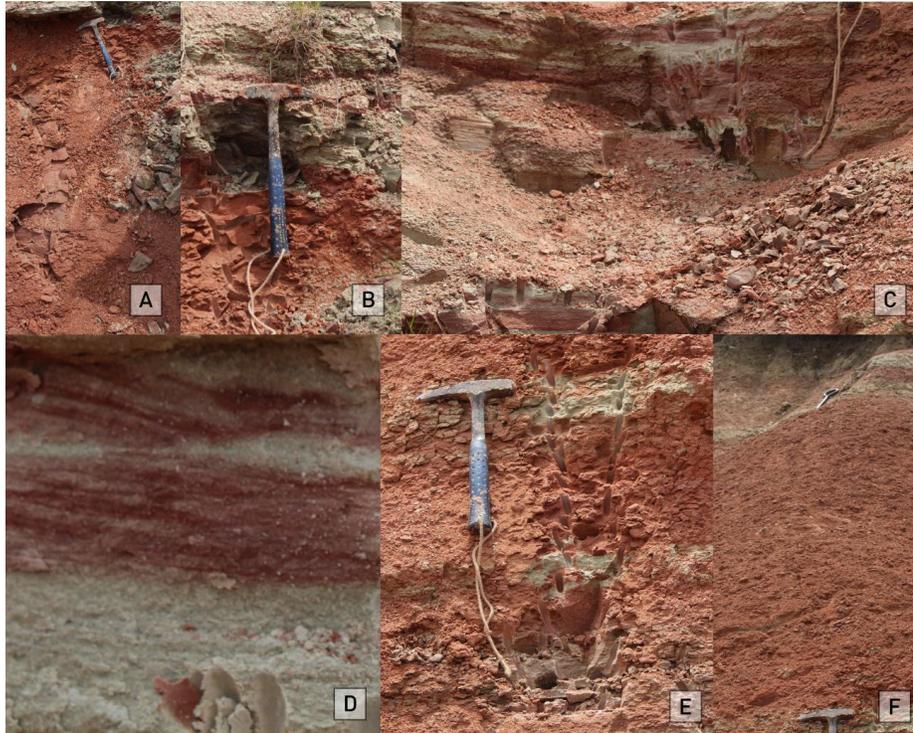


Figura 27. Perfil geológico sitio B

#### 4.2.2 Perfil SSR (suelo/saprolito/roca)

De los sitios estudiados, se seleccionó aquel en el cual fuera posible hacer este tipo de estudio. A continuación, se presenta la descripción elaborada en el campo.

En la figura 28 se observa la pared de la cárcava en la cual se realizó la descripción del perfil suelo-saprolito-roca (SSR).



Figura 28. Pared donde se realizó el perfil SSR

Cuadro 7. Descripción perfil SSR

Horizonte	Espesor (cm)	Descripción
A	0 - 12	Rompe en grumos, muchas raíces, nidos de termitas, bloques sub angulares (4 cm) se rompen fácilmente. Presencia de raíces verticales.
AB	12 - 21	Estructura de bloques sub angulares (1 cm) muy friables, presencia de raíces verticales (menor cantidad), termitas y moteados.
BA	21 -27	Estructura de bloques sub angulares (2 cm) muy friables, menos raíces (también verticales) pocas de 2 mm, la mayoría de 1mm.

<b>Bt 1</b>	<b>27 - 41</b>	Cambio de color, bloques angulares (2 cm), muy friables, raíces comienzan a ser horizontales, moteados que presentan arenisca muy fina meteorizada. Acumulación de agua (llovió el día anterior al muestreo). No hay moteados de Ox - Red. Indicación de buena infiltración
<b>Bt 2</b>	<b>41 - 56</b>	Bloques angulares (4-5 cm), más resistentes que los anteriores. Aumenta el contenido de arcilla pero sigue siendo franco. Se hace un poco más claro. Raíces gruesas (2 mm), y finas horizontales. Moteados grises y naranjas (restos de meteorización). Pátinas de arcillas muy delgadas y frecuentes.
<b>B</b>	<b>56 - 70</b>	Se observan películas de arcilla. Bloques sub angulares (3-4 cm), frágiles (un poco más que los B anteriores, pero más fuertes que los de A). Moteados asociados a las raíces, escasos y difusos (no tiene problema de drenaje). Pequeños nódulos de la arenisca de abajo, muy meteorizados (aparentan moteados rojos). Sin concreciones.
<b>BC</b>	<b>70 - 86</b>	Bloques angulares (2 cm), no se aprecian fácilmente, hay algunos restos muy pequeños conservados. No se observan señales de exceso hídrico. Posiblemente el perfil presente un horizonte Bw lo que indica acumulación de arcillas desde abajo, por la naturaleza del material geológico. Raíces verticales, escasas, finas.  Restos de arenisca meteorizada (parecen concreciones y/o moteados).
<b>C1</b>	<b>86 - 102</b>	Comienzan a dominar fragmentos de la roca original en textura, no se ve la estructura, y están meteorizados, aproximadamente son el 30%. El resto es una matriz grisácea franco arenosa. La arenisca meteorizada es de color naranja amarillento. Procesos pedogenéticos asociados a raíces, de color negro y mas arcillosos. No se observan fracturas. Los fragmentos son angulosos a subangulosos (0,5 cm)
<b>C2</b>	<b>102 - 118</b>	Los fragmentos de arena son más frecuentes y oscuros (más rojizos) siguen en matriz barrosa. Fragmentos angulosos (1 - 1,5 cm), conservan estructura horizontal (al romperlos) incipientemente. Siguen habiendo raíces, y procesos pedogenéticos (no tan frecuentes como el horizonte de arriba).

<b>C3</b>	<b>118 - 138</b>	Arenisca pasa a ser el 80 - 90 % del material. Colores violetas y terracota. Se ven los fragmentos de la arena, angulares separados por diaclasas (fracturas) de 1 x 2 cm aprox. Matriz fina, franca, color gris, ocupando espacio entre diaclasas. Siguen apareciendo raíces finas que pasan a través de las fracturas y generando zonas con efectos pedogenéticos. Los clastos de arena con textura reconocible al material madre, presentan un poco más conservada la estratificación horizontal al romper en planos horizontales.
<b>C4</b>	<b>138 - 160</b>	Nivel de arena blanca (decolorada) meteorizada (mucho arena). Bloques angulosos de arenisca (2 x 3 cm). Fracturas no se ven. Presencia de raíces en diaclasas (incipientes fracturas verticales) generan escasos niveles pedogenéticos y algunos moteados. Los bloques están decolorados a blancos, e internamente tienen decoloraciones rojizas en diferentes patrones (posible nivel de arenisca decolorada diagenéticamente, no es parte del proceso del suelo). Bloques más conservados mantienen el color parental y textura, incipiente estratificación horizontal.
<b>C5</b>	<b>160 - 218</b>	Arena blanca (nivel decolorado) con raíces, más meteorizado. Las raíces generan escasos niveles pedogenéticos y nodulos de arcilla que se asemejan a moteados. Fracturas verticales separadas a 6 cm. Bloques angulares (3 x 3 cm).
<b>R</b>	<b>218 - 460</b>	Arena muy fina cuarzo-feldespática, con algo de biotita, bastante limosa, super redondeada, bien a mal seleccionada. Color entre ladrillo/rosado que decolora a blanco. Aparente estratificación horizontal (poco notoria), estructuras internas no observables. Fractura horizontalmente (indicio de la estructura planteada). Se rompe fácilmente con la mano, en bloques sub angulares de 0,5 a 6 cm. Presenta raíces y algunas acumulaciones de materia orgánica. Las fracturas aumentan hacia la superficie, las raíces fomentan la meteorización lo cual favorece los procesos pedogenéticos.

Mediante la descripción del perfil SSR se constata la presencia de raíces en profundidades que no son contempladas en los enfoques edafológicos tradicionales. Se pudieron observar raíces a 4 metros de profundidad.

Teniendo en cuenta el sistema radicular profundo que desarrollan los árboles, queda demostrada la importancia de conocer las características del subsuelo sobre el cual se desarrollarán los mismos.

Por su parte, como ya fue mencionado en la revisión bibliográfica, las raíces cumplen funciones estabilizadoras en las laderas, lo cual consolida la hipótesis de que efectuar medidas para la conservación de suelo mediante la plantación de árboles, en determinadas situaciones sería lo ideal.

#### 4.2.3 Relevamiento edafológico

En la figura 29 se presenta la ubicación de los puntos de relevamiento edafológico que se realizaron en este sitio.



Figura 29. Localización perfiles edafológicos del sitio B

Al igual que en el sitio A, se realizaron diferentes perfiles de muestreo con el objetivo de comparar las descripciones con las de los perfiles tipo de la unidad de suelo en la que se encuentra el sitio. El perfil modal fue realizado en lo alto de la ladera, en las coordenadas 770110/ 6442301 (UTM 21S), y se indica con un asterisco en la figura 29, y se observa el mismo en la figura 30.

En el cuadro 8 se presenta la descripción realizada in situ del perfil modal del sitio B.

Cuadro 8. Descripción perfil modal sitio B

Horizonte	Espesor (cm)	Descripción
A	0 - 20	<b>Color</b> 7.5 YR 3/1; <b>Textura</b> F Ar; <b>Estructura</b> bloques subangulares; <b>Transición</b> gradual; <b>Raíces</b> 2-15 mm.
AB	20- 32	<b>Color</b> 7.5 YR 3/1; <b>Textura</b> Ac/ Ac F; <b>Estructura</b> bloques angulares; <b>Transición</b> gradual; <b>Moteados</b> p/T=1/C-t/Lim-c (terracota); <b>Raíces</b> 2 - 15 mm.
Bt 1	32 - 48	<b>Color</b> 7.5 YR 3/2; <b>Textura</b> Ac ; <b>Estructura</b> bloques angulares; <b>Transición</b> gradual; <b>Moteados</b> p/T=2-3/C-t/Lim-c (color mostaza; forma de bandas y puntitos); <b>Raíces</b> 1-2 mm.
Bt 2	48 -68	<b>Color</b> 10 YR 5/2; <b>Textura</b> Ac; <b>Estructura</b> bloques subangulares; <b>Transición</b> clara; <b>Revestimientos</b> películas de Ac; <b>Moteados</b> c/T=2-3/C-t/Lim-c (color terracota y mostaza, formas irregulares); <b>Concreciones</b> FeMn/2-5mm/2-5%/fr; <b>Raíces</b> 1-2 mm.
Bt 3	68 - 102	<b>Color</b> 2.5 YR 4/8 (Ac) + 10 YR 5/2 - 6/3 (Ar fina); <b>Textura</b> F Ac; <b>Estructura</b> bloques subangulares; <b>Transición</b> clara; <b>Moteados</b> p/T=1/C-t/Lim-d (color gleyco); <b>Concreciones</b> FeMn/2-5mm/2-5%/fr; <b>Raíces</b> 1-2 mm
C1	102 - 116	<b>Color</b> 2.5 YR 4/8 + 10 YR 6/3; <b>Textura</b> F Ac/F Ac L; <b>Estructura</b> bloques subangulares; <b>Transición</b> gradual; <b>Concreciones</b> FeMn/2-5mm/1%/fr; <b>Raíces</b> 1-2 mm.
C 2	116 - 132	<b>Color</b> 2.5 YR 4/6 + 10 YR 6/3 (en < %); <b>Textura</b> F Ac; <b>Estructura</b> bloques subangulares; <b>Transición</b> gradual; <b>Reacción HCl</b> +

#### Referencias

**Textura:** arcilloso (Ac)/ franco (F)/ arenoso (Ar)/ limoso (L).

**Concreciones:** Ca (de calcio) / FeMn (de hierro manganeso). Tamaño en mm, cantidad en % (< a 1%, 2 - 5 %, > 5%), y consistencia fr (friable), d (duras), si (silicificadas).

**Moteados:** cantidad p (< 2%), c (2 - 20%), a (>20%). Tamaño en mm. Contraste t (tenue), n (neto), s (sobresaliente). Límites a (abrupto), c (claro), d (difuso).

**Reacción Hcl (intensidad):** + (débil), ++ (moderada), +++ (fuerte).



Figura 30. Perfil modal sitio B

A continuación, se presentan los datos analíticos obtenidos en el laboratorio de suelos y aguas de la Facultad de Agronomía.

Cuadro 9. Resultados de bases totales y materia orgánica sitio B

	Ca	Mg	K	C.O.	M.O.
Muestra	cmolc/kg (meq/100g)			%	
Sitio "B" 0-20	4,58	1,73	0,2	1,6	2,7
Sitio "B" 32-48	15,92	6,58	0,47	0,8	1,5
Sitio "B" 68-80	21,63	8,39	0,51	0,2	0,3

Cuadro 10. Resultados texturales del sitio B

Muestra	Granulometría			Clase textural	
	Arena	Limo	Arcilla	Nombre	Abreviación
	----- % -----				
Sitio "B" H: 0-20	58,9	21,7	19,4	franco arenoso	FAr
Sitio "B" H: 32-48	31	4,2	64,8	arcilloso	Ac
Sitio "B" H: 68-80	30,9	38,5	30,6	franco arcilloso	FAc

Según los antecedentes el suelo pertenece a la unidad "Los Mimbres", y al grupo CONEAT 6.16, sumado a los datos obtenidos en el laboratorio, y con la descripción a campo, se estima que se trata de un Luvisol Melánico típico Ar Fr.

De acuerdo a los antecedentes y a la descripción del horizonte más profundo, se considera que la formación Yaguarí es el material parental.

#### 4.2.4 Descripción de cárcavas

En este sitio se constató la presencia de erosión en forma de cárcavas, a continuación, se describen textual y fotográficamente.

Al presentar dimensiones excesivas para este estudio, se optó por analizar el punto de mayor actividad, la “garganta” de la cárcava.

Características morfológicas: 62 metros de longitud, 13,6 metros de profundidad, y 20 metros de ancho.



Figura 31. Cabeza de la cárcava

La pendiente de la pared E varía dependiendo de los estratos presentes, el promedio de los datos obtenidos indica que la misma es de  $59^\circ$ , mientras que la pared W presenta una pendiente de  $42^\circ$ . Las mismas se pueden observar en las figuras 32 y 33.



Figura 32. Pared Oeste



Figura 33. Pared Este

En lo alto de la ladera se puede ver empastado el piso de la cárcava en su inicio, cuando la profundidad y ancho se hacen mayores la cobertura vegetal desaparece. El talweg interno se observó activo, mientras que el externo no se pudo observar.

La información de antecedentes obtenida no indica diferencias con el uso que se hace hoy en día en ese sitio (campo mejorado). En la siguiente foto se puede apreciar el tapiz herbáceo.

Se constató presencia de ganado (figura 34) dentro de la misma, debido a la presencia de huellas y la ausencia de alambrado.



Figura 34. Huellas de ganado

#### 4.3 SITIO C

En la figura 35 se coteja la foto aérea de 1966 y la imagen satelital del 2022. De este modo se busca relacionar el uso y manejo antecedente en el sitio, y la situación actual del mismo, para discernir desde el presente la evolución del caso.

En color gris y sombreado, se delimita el sitio C en 1966, mientras que en color verde se señala el sitio C en la actualidad. En azul se indica la cuenca hidrográfica que aporta al sitio.

Hoy en día el manejo es de campo natural, pero según productores de la zona hace años en este sitio se realizaron cultivos hortícolas de papa. Cerciorando dichos datos con las fotos aéreas de 1966 se constata que hubo un uso y manejo agrícola en esta zona.

El paisaje general es de lomadas suaves, más precisamente el relieve localizado del sitio se trata de una llanura (figura 36).

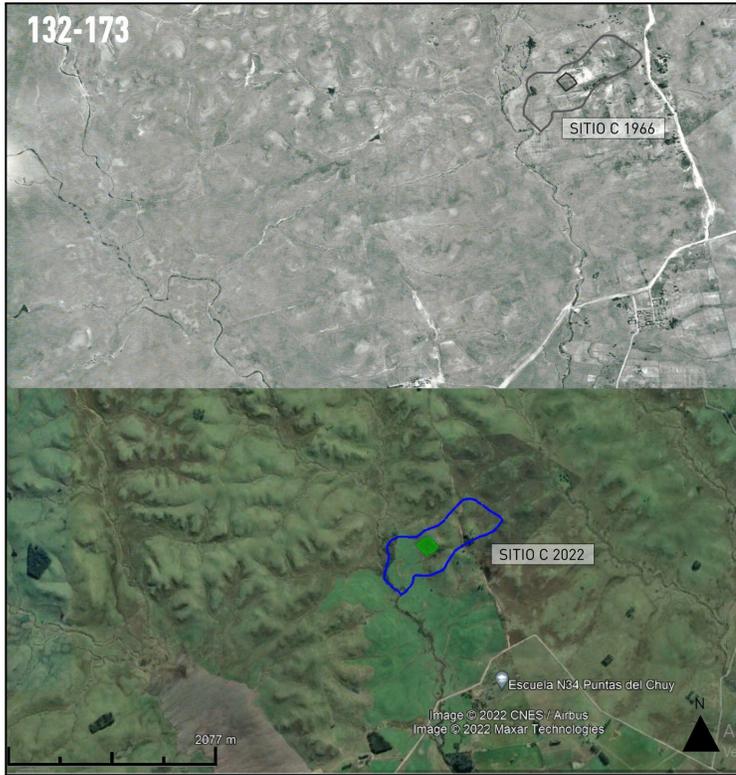


Figura 35. Ubicación del sitio C



Figura 36. Relieve general de la zona del sitio C

#### 4.3.1 Relevamiento geológico

A continuación, se presentan los datos obtenidos mediante las descripciones in situ de las litologías presentes.

En la figura 37 se expone la ubicación del relevamiento geológico que se realizó en este sitio.



Figura 37. Localización muestreo geológico sitio C

El perfil fue realizado en las coordenadas 774381/6438031 (UTM 21S), resumiéndose en el cuadro 11. La información presentada en el mismo se describe desde la base hacia el techo. Mientras que en la foto 38 se documenta.

Cuadro 11. Descripción perfil geológico sitio C

B A S E A T E C H O	Color rojizo bordeaux oscuro con algunos niveles decolorados a gris claro Estratos tabulares en todos los casos. La estratificación parece paralela/ subparalela/horizontal.
	Pelita arcillosa rompe de forma concoidal, dejando núcleos masomenos esféricos. Pelita de estratificación plano-paralela (se aprecia por cambios de color), no se aprecian otras estructuras.
	La pelita arenosa se encuentra en menor proporción, de colores grises y blanquecinos. Estratificación horizontal, y se pasa gradualmente de nuevo a la pelita arcillosa.
	Pelitas arcillosas presentan colores grises en menor proporción, siempre siguiendo el plano de estratificación. Pelita cuarzo-feldespática y presenta pequeños cristales de mica (posiblemente Muscovita).
	Pelitas con concreciones nodulares de CaCO <sub>3</sub> de 10 - 50 cm.
	Nivel calcáreo discontinuo, y posiblemente lenticular, presenta ripples. Posibles icnofósiles de Cruziana sp.
	Hacia arriba del nivel calcáreo las pelitas son un poco más arenosas (igual hay abundante arcilla). El nivel de calcáreo significa un retroceso de agua, lo que implica que el material se secó en ese momento y por eso se acumuló CaCO <sub>3</sub> .
	Debajo del nivel calcáreo señalado en el perfil se pueden apreciar reiteradamente los siguientes niveles:  3 cm nivel de pelita arenosa (superior) 5 cm nivel pelita arenosa (inferior) 80 cm de pelita arcillosa.



Figura 38. Perfil geológico sitio C

#### 4.3.2 Perfil SSR (suelo/saprolito/roca)

No se pudo realizar debido a que la pared se desmoronaba al intentarlo.

#### 4.3.3 Relevamiento edafológico

En la figura 39 se presenta la ubicación de los puntos de relevamiento edafológico que se realizaron en este sitio.

De los suelos estudiados, se seleccionó un perfil representativo en cada sitio. El perfil modal se obtuvo en lo alto de la ladera, en las coordenadas UTM -S21 774452/ 6438035, y el mismo se observa en la figura 40.

En el cuadro 12 se presenta la descripción realizada in situ del perfil modal del sitio "C".



Figura 39. Localización perfiles edafológicos del sitio C

Cuadro 12. Descripción perfil modal del sitio C

Horizonte	Espesor (cm)	Descripción
A	0 - 22	<b>Color</b> 7.5 YR 3/2; <b>Textura</b> F Ac Ar ; <b>Estructura</b> bloques subangulares; <b>Transición</b> gradual; <b>Raíces</b> 2-10 mm.
A 2	22 - 29	<b>Color</b> 5 YR 3/3; <b>Textura</b> F; <b>Estructura</b> bloques angulares/sub; <b>Transición</b> gradual; <b>Concreciones</b> Ca/2-5mm/2-5%/f-d; <b>Raíces</b> 2-10mm; <b>Reacción HCl</b> ++
A 3	29 - 43	<b>Color</b> 5 YR 5/4 - 4/3; <b>Textura</b> F/F Ar; <b>Estructura</b> bloques angulares/sub; <b>Transición</b> clara/abrupta; <b>Concreciones</b> Ca/1mm - 3 cm/>5%/f-d; <b>Raíces</b> 1-5 mm; <b>Reacción HCl</b> +++
AC	43 - 67	<b>Color</b> 10 YR 7/2; <b>Textura</b> F Ar; <b>Estructura</b> bloques subangulares; <b>Transición</b> clara/abrupta; <b>Raíces</b> 1-10 mm; <b>Reacción HCl</b> ++
		<b>Color</b> 10 YR 7/2; <b>Textura</b> F Ac L; <b>Estructura</b> bloques subangulares; <b>Transición</b> gradual; <b>Raíces</b> 1-2 mm; <b>Reacción HCl</b> ++
C	67 - 90	<b>Color</b> 5 YR 5/4; <b>Textura</b> F Ac L; <b>Estructura</b> bloques subangulares; <b>Transición</b> clara; <b>Reacción HCl</b> ++
		<b>Color</b> 5 YR 5/4; <b>Textura</b> F Ac L; <b>Estructura</b> bloques subangulares; <b>Transición</b> gradual; <b>Concreciones</b> FeMn/2-5 mm/<2% /fr; <b>Raíces</b> 1-2 mm; <b>Reacción HCl</b> ++

Referencias: idem. cuadros 3 y 8.



Figura 40. Perfil modal sitio C

A continuación, se presentan los datos analíticos obtenidos en el laboratorio de suelos y aguas de la Facultad de Agronomía.

Cuadro 13. Resultados de bases totales y materia orgánica sitio C

	Ca	Mg	K	C.O.	M.O.
<b>Muestra</b>	<b>cmolc/kg (meq/100g)</b>			<b>%</b>	
<b>Sitio "C"</b> <b>H:0-9</b>	20,89	1,42	0,68	2,1	3,6
<b>Sitio "C"</b> <b>H: 22-29</b>	31,7	1,42	0,52	1,4	2,5
<b>Sitio "C"</b> <b>H: 43-55</b>	39,41	1,08	0,39	0,3	0,5

Cuadro 14. Resultados texturales del sitio C

<b>Muestra</b>	<b>Granulometría</b>			<b>Clase textural</b>	
	<b>Arena</b>	<b>Limo</b>	<b>Arcilla</b>	<b>Nombre</b>	<b>Abreviación</b>
	----- % -----				
<b>Sitio "C"</b> <b>H: 0-9</b>	57,4	17,6	25	franco arcillo arenoso	FACAr
<b>Sitio "C"</b> <b>H: 22-29</b>	49,4	29,7	20,9	franco	F
<b>Sitio "C"</b> <b>H: 43-55</b>	52,3	30,6	17,1	franco arenoso	FAr

Según los antecedentes el suelo pertenece a la unidad "Los Mimbres", y al grupo CONEAT 6.13, sumado a los datos obtenidos en el laboratorio, y con la descripción a campo, se estima que se trata de un Inceptisol Melánico. De acuerdo a los antecedentes y a la descripción del horizonte más profundo, se considera que la formación Yaguarí es el material parental.

#### 4.3.4 Descripción de cárcavas

Dado que la cárcava no presenta cabeza ni una forma espacial que permita medir su largo, ancho o profundidad, no fue posible medir sus dimensiones. Sganga (1999a) hace énfasis en determinar las características de la cabeza de la cárcava para indicar su posible comportamiento a futuro.

Con las figuras 41, 42 y 43 se busca ilustrar la figura de la misma y su disposición en el paisaje. Se puede observar que la cárcava ocurre en la zona media de la lomada, donde no se concentra el agua de escurrimiento.



Figura 41. Cárcava sitio C



Figura 42. Cárcava sitio C



Figura 43. Cárcava del sitio C

De los datos recabados sobre la historia de uso y manejo mediante las entrevistas con los productores, y el análisis de las fotos aéreas de 1966, se desprende que en este sitio se realizaron plantaciones hortícolas de papa. Este tipo de cultivo requiere un laboreo del suelo intensivo, formando camellones en general, en el sentido de la pendiente. Esto podría explicar en gran parte el patrón disímil de estas cárcavas.

#### 4.4 CARACTERÍSTICAS DEL PAISAJE

Con las siguientes fotos se aprecian paisajes similares a los sitios B y C desde el punto de vista topográfico, pero que presentan diferencias en lo que es el desarrollo de la vegetación.

En la figura 44, se aprecia una cárcava inactiva, la cual presenta paredes con pendientes suaves. Debido a la vegetación existente, se puede deducir que no hay presencia de ganado. El subsuelo parece ser el mismo que en los sitios B y C. Existen signos de erosión, pero de menor magnitud que en los mencionados sitios.

Por su parte, en la figura 45 se expone un caso similar al observado en la figura 44, pero con la salvedad, que presenta paredes con pendientes mayores al caso anterior. El grado de erosión parece similar, lo cual podría estar explicado por la presencia de vegetación leñosa sobre los bordes de la cárcava.



Figura 44. Características del paisaje general



Figura 45. Cercamiento de cárcava con vegetación leñosa

Con la figura 46 se quiere resaltar la diferencia entre la presencia y ausencia de árboles en el paisaje de la zona.

La topografía es similar a la del sitio B, siendo la vegetación presente la mayor diferencia en cuanto al manejo, por lo que la presencia de cárcavas (en el sitio B) en parte podría estar explicada por las medidas de manejo empleadas; el campo natural mejorado, la presencia de ganado dentro de la misma, y la ausencia de árboles.



Figura 46. Presencia de árboles en el paisaje

#### 4.5 DISCUSIÓN

Luego de analizar la información obtenida de los diferentes autores, se sintetizan las causas fundamentales en relación al avance y dimensiones que alcanza una cárcava: la geología presente en la zona definirá la topografía, que determina las formas del relieve y la magnitud de las pendientes; las características físicas y químicas del suelo, definirán en principio, la estructura del mismo, y por lo tanto su estabilidad frente a distintas situaciones; las características físicas de la cuenca, el drenaje superficial y subsuperficial, natural o antrópico, y la cobertura vegetal que resulta ser la variable más influyente en la pérdida de suelo.

Por lo tanto, los momentos en que el suelo no presenta el tapiz vegetal pasan a ser las situaciones más críticas. Las combinaciones de todas las características ya mencionadas, resultan en diferentes situaciones, que comprometen en mayor o menor medida la calidad del suelo.

Uno de los objetivos de este trabajo fue estudiar las diferentes causas por las cuales se generan las cárcavas, incorporando un análisis integral para la descripción de los sitios, que adiciona características geológicas al tradicional relevamiento edafológico. Generando un insumo esencial con el fin de ajustar las recomendaciones para el control y la recuperación de cárcavas.

De esta forma se analizaron los diferentes comportamientos erosivos que ocurren sobre cada material geológico, resultando que los sitios B y C presentaron actividad erosiva en forma de cárcavas a diferencia del sitio A que presentó actividad erosiva leve. La desigualdad que se observa, según lo constatado en el campo, refiere al tamaño de grano, ya que los tres sitios se desarrollan sobre la formación Yaguarí.

El otro tipo de causas que pueden generar erosión son las denominadas antrópicas, existen evidencias que vinculan la formación de cárcavas con las prácticas de manejo inadecuadas. El análisis de los antecedentes de uso y manejo permitió constatar que en los sitios A y C se realizaron actividades de manejo agrícola, mientras que en el sitio B no se constató lo mismo.

Adicionalmente este trabajo demuestra la importancia de estudiar el perfil suelo-saprolito-roca, por ejemplo, en el rubro forestal.

Los suelos de la zona estudiada presentan características físicas y químicas favorables para el desarrollo de los árboles, siendo profundos y arenosos lo que permite un extenso desarrollo radicular, alcanzando profundidades mayores a las que se describen en los perfiles típicos.

En otro orden, al recorrer los alrededores de la zona de estudio se constata la configuración natural que presenta el paisaje, y en base a la información obtenida en la revisión, queda demostrada la importancia de la presencia de árboles.

Según Marin y Osorio (2017), los mismos actúan como anclaje del suelo en las laderas, y definen el fenómeno de arqueo como aquel que se desarrolla debido a la presencia de múltiples árboles y/o elementos de la vegetación. Asimismo, dan refugio al ganado y generan beneficios notorios, los cuales no son tema de estudio en este trabajo, pero cabe mencionar que se reportan incrementos en la producción de los animales debido a un mayor bienestar.

En la bibliografía consultada se indica que la disposición de las especies en el terreno afectado a la cárcava es algo a tener en cuenta, ya que para contemplar las distintas condiciones que existen dentro de una cárcava, habría que plantar diferentes especies. A nivel nacional Acosta y Crosara (1987) proponen colocar los residuos de cosecha para ir rellenando la cárcava. Teniendo en cuenta la experiencia de los distintos autores y lo observado a campo, se está de acuerdo con los autores.

En los sitios de estudio se observan signos de procesos erosivos para los cuales se deberían implementar medidas de manejo adecuadas para preservar el suelo. Se entiende que un tratamiento exitoso con el fin de enlentecer la pérdida de suelo, pasa por el íntegro conocimiento de cada situación en particular, es decir, comprender cómo funciona el suelo que se pierde, el agua (energía) que lo erosiona, y la vegetación presente.

Considerando lo anteriormente mencionado y que la prevención es fundamental en disminuir el desarrollo de las cárcavas, se recomiendan las siguientes medidas en los tres sitios relevados: excluir mediante alambrado al ganado ovino y bovino de las zonas afectadas por las cárcavas, con énfasis en las cabezas; tener en cuenta la plantación de árboles para consolidar estratos débiles de suelo y a su vez brindar beneficios para el ganado; no realizar prácticas de manejo inadecuadas.

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

La propuesta de abordaje planteada para el estudio integral de la relación suelo-saprolito-roca que aquí se presenta, permitió entender los procesos erosivos de los sitios estudiados. Resalta la importancia de comprender los sucesos que ocurren más allá de los primeros 80 - 120 cm de suelo, y con ello realizar un uso y manejo responsable del mismo.

Se constataron diferencias entre los sitios, tanto litológicas, edáficas como de uso y manejo, más allá de estar en la misma posición topográfica.

Los sitios B y C presentan similitudes en el tamaño de grano de las litologías, siendo en ambos casos rocas sedimentarias detríticas finas, por otro lado, tienen diferencias edafológicas, en el sitio B los suelos corresponden a Luvisoles Melánicos Típicos y en el sitio C son Inceptisoles Melánicos, ambos presentan estructura pobre.

En el sitio A son Vertisoles Háplicos Arcillosos y la litología es de grano más grueso que los anteriormente mencionados y cementadas con carbonato de calcio.

Las cárcavas en el sitio B se asocian a las concavidades de las laderas, mientras que en el sitio C se generan en el medio de una ladera, donde la concentración de agua no sería el principal factor desencadenante para la ocurrencia de las mismas. En el sitio A no se observan cárcavas activas, las que hay no se desarrollaron como en los dos sitios anteriores.

La historia del uso y manejo de los diferentes sitios ofrece información que determina que, en el sitio C existen antecedentes de actividad hortícola, en particular la papa, asimismo en el sitio A los hay de cultivos agrícolas, mientras que en el sitio B no se obtuvieron datos que indiquen antecedentes de uso y manejo diferentes al actual, es decir, pradera natural.

Se considera inadecuado el uso y manejo dado en su momento a los suelos del sitio C; mientras que en el sitio B se continúa sin tomar las medidas necesarias teniendo en cuenta la fragilidad de la situación; en tanto el sitio A, no presenta problemas de erosión como los otros dos sitios.

Se constata la presencia de ganado en las cárcavas presentes en los sitios B y C, que favorecen el crecimiento de las cárcavas. Por su parte, en los tres sitios se observa la ausencia de árboles cercanos a las zonas erosionadas, los cuales ayudarían a controlar dicho proceso.

Teniendo en cuenta las características que presentan los sitios, existe alta probabilidad de que se manifiesten y/o aceleren los procesos erosivos, si no se toman las medidas de manejo y conservación de suelos adecuada..

Se entiende pertinente seguir profundizando y tomando otras zonas del país para validar el enfoque integral aplicado en este trabajo, el cual permitió analizar y comprender la influencia del material parental en el suelo, con una historia de uso y manejo, en el desarrollo de los procesos de erosión de mayor magnitud.

## 5.2 CONSIDERACIONES PRELIMINARES

De la bibliografía consultada y con lo visto en el campo, surgen ciertas recomendaciones para el uso y manejo de las cárcavas que no integran este estudio, pero que vale la pena mencionarlas:

Los sistemas silvopastoriles cobran importancia como opción para el control de cárcavas, debido al sistema radicular profundo de los árboles que cohesiona el suelo formando una masa más estable; la menor cantidad de actividades de laboreo con respecto a otro tipo de cultivos; y los beneficios que otorgan los productos maderables no madereros.

Se deberá buscar la combinación con especies nativas de forma tal de generar soluciones o barreras naturales, pudiéndose utilizar especies que se adapten a los bajos, y otras que lo hagan a la parte alta de la ladera. De esta forma se incrementa la diversidad y no existe presión sobre el uso de una misma especie, sumado a la posibilidad de diversificar productos y beneficios.

Son favorables aquellas especies que producen abundante hojarasca, de rápido crecimiento, y sistema radicular robusto el cual aporta buen anclaje y abundantes raíces fibrosas. Como también que se planten asexualmente, posean copa densa y perenne, y requieran poco mantenimiento.

Para finalizar, se considera fundamental el rol del estado en apoyar y promover la investigación como forma de preservar los recursos naturales para que sean utilizados de manera sostenible.

## 6 RESUMEN

La importancia de los suelos está definida por su enorme influencia sobre el medio ambiente y la economía global. La erosión es una de las principales amenazas de los mismos. Este trabajo de tesis se enfoca en la erosión hídrica, y en su estado más avanzado, las cárcavas. Los suelos destinados a la forestación han sido poco estudiados, debido a ser marginales para la agricultura, por sus características físicas y químicas. Estas determinan que sean muy vulnerables frente a eventos erosivos. El estudio se realizó en el dpto. de Cerro Largo, donde el rubro forestal incrementó el área plantada. Con el objetivo de contribuir al conocimiento de dichos suelos, es que se agregan características geológicas a los habituales enfoques edafológicos, integrando información del suelo, su manejo, el saprolito y la roca. Para comprender los procesos vinculados a la erosión, la influencia del crecimiento radicular profundo, y con ello recomendar medidas preventivas de manejo y control. Se seleccionó mediante observación de la serie histórica de Google Earth cárcavas con signos de evolución en el tiempo, y que hoy en día se presenten activas. Como sustento se analizaron las fotos aéreas de 1966 mediante estereoscopia. También se tuvieron en cuenta los antecedentes de uso y manejo (entrevistas con productores de la zona), diferenciando su impacto en el proceso erosivo. Con el fin de comprobar la actividad radicular en profundidad, y detallar los procesos pedogenéticos que sufre la roca madre, se realizó un perfil SSR (resalta la necesidad de redefinir el concepto de suelo). Los sitios se analizaron experimentalmente mediante la metodología tradicional de relevamiento de suelos, en cada uno se realizaron 6 perfiles, siguiendo transectas que definían el muestreo desde el alto de la ladera hasta la parte baja. Se seleccionó un perfil modal de cada sitio y se envió al laboratorio de la FAGro para realizar análisis de textura, pH, bases totales y carbono orgánico. Con los resultados se estima que los suelos son: Vertisol Háptico Ac (sitio A), Luvisol Melánico típico Ar Fr (sitio B), y un Inceptisol Melánico (sitio C), perteneciendo los tres a la unidad de suelos “Los Mimbres”. En cuanto a la geología, los sitios B y C presentan similitudes en el tamaño de grano, siendo en ambos casos rocas sedimentarias detríticas finas, mientras que el sitio A es de grano más grueso y cementadas con carbonato de calcio. Según lo analizado existe alta probabilidad de que se manifiesten y/o aceleren los procesos erosivos, si no se toman las medidas de manejo y conservación de suelos adecuada; excluir mediante alambrado al ganado ovino y bovino de las zonas afectadas por las cárcavas (con énfasis en las cabezas); tener en cuenta la plantación de árboles para consolidar estratos débiles de suelo y a su vez brindar beneficios para el ganado. Se entiende pertinente seguir profundizando y estudiando otras zonas para validar el enfoque integral aplicado en este trabajo.

Palabras clave: Erosión; Cárcavas; Árboles; Sistema radicular profundo; Suelos.

## 7. SUMMARY

The importance of soils is defined by their enormous influence on the environment, and therefore on the global economy. Erosion is one of the main threats to soils. This thesis work focuses on water erosion, and particularly, in its most advanced stage, gullies. Soils destined for afforestation in Uruguay have been scarcely studied, because they are marginal for agriculture, due to their physical and chemical characteristics. These characteristics make them highly vulnerable to erosive events. The study was carried out in the department of Cerro Largo, where forestry began to cover larger areas. With the aim of contributing to the knowledge of soils used for forestry production, geological characteristics were added to the traditional edaphological approaches, using an integral point of view that contemplates the soil, its management, the saprolite and the rock. This was done in order to understand the processes linked to erosion, how it influences deep root growth, in order to be able to more accurately recommend preventive management and control measures. For this purpose, gullies that showed signs of evolution over time and that are still active today were selected by observing the historical series of Google Earth images. As support, photos of areas from 1966 were analyzed by means of stereoscopy. We also took into account the history of use and management (interviews with producers in the area), differentiating their impact on the erosive process. In order to verify the root activity at depth, and to detail the pedogenetic processes undergone by the bedrock, an SSR profile was carried out (highlighting the need to redefine the soil concept). The sites were analyzed experimentally using the traditional soil survey methodology, in each one 6 profiles were made, following transects that defined the sampling from the top of the slope, passing through the middle zone and reaching the lower part. A modal profile was selected from each site and sent to the agronomy faculty laboratory for analysis of texture, pH, total bases and organic carbon. With the results it is estimated that the soils are: Vertisol Háplico Ac (site A), typical Melanic Luvisol Ar Fr (site B), and a Melanic Inceptisol (site C), all three belonging to the "Los Mimbres" soil unit. Regarding the geology, sites B and C present similarities in the grain size of the lithologies, being in both cases fine detrital sedimentary rocks, while site A is coarser grained and cemented with calcium carbonate. According to what has been analyzed, there is a high probability that erosive processes will manifest and/or accelerate if appropriate soil management and conservation measures are not taken; exclude sheep and cattle from the areas affected by gullies (with emphasis on the heads) by fencing them in; take into account the planting of trees to consolidate weak soil strata and in turn provide benefits for the livestock. It is considered pertinent to continue studying other areas in order to validate the integrated approach applied in this work.

Key words: Erosion; Gullies; Trees; Deep root system; Soils.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Acosta, G.; Crosara, A. 1987. Serie: la erosión en cárcavas. Parte I: la forestación en el control de cárcavas en el departamento de Maldonado. MGAP. DGRNR. Boletín técnico no.12:1-17.
2. Bossi, J.; Navarro, R. 1988. Geología del Uruguay. Montevideo, Universidad de la República. Departamento de Publicaciones. t. 2, 996 p.
3. \_\_\_\_\_; Ferrando, L. 2001. Carta geológica del Uruguay. Montevideo, Uruguay, Geoeditores. Esc. 1/500.000. Color.
4. Bouillet, J. -P.; Laclau, J. -P.; Arnaud, M.; Thongo M'Bou, A.; Saint-Andre', L.; Jourdan, C. 2002. Changes with age in the spatial distribution of roots of Eucalyptus clone in Congo Impact on water and nutrient uptake. Forest Ecology and Management. 171:16-57.
5. Brady, N.; Weil, R. 2002. The nature and properties of soils. 15<sup>th</sup>. ed. Upper Saddle River, New Jersey, Pearson. 1071 p.
6. Bravo Espinosa, M.; Mendoza, M.; Medina-Orozco, L.; Sáenz-Reyes, T. 2010. Características y control de cárcavas. Terra Latinoamericana. 28(3):281-285.
7. Califra, A.; Durán, A. 2010. Suelos de aptitud forestal: criterios para su selección, área de distribución, características morfológicas, físicas y químicas. In: Jornadas de Actualización Técnica (2010, Montevideo, Uruguay). 10 años de investigación en producción forestal, productividad y preservación de los recursos suelo y agua. Montevideo, Uruguay, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. pp. 1-5.
8. Carrasco, J. 2019. Técnicas de control de cárcavas. (en línea). Rayantué, INIA. s.p. Consultado jun 2021. Disponible en <https://web.inia.cl/wp-content/uploads/2019/06/5.-T%C3%A9cnicas-de-control-de-c%C3%A1rcavas-Jorge-Carrasco.pdf>

9. Castellano, A.; Contreras, V.; Bedmar, E. J. 2016. Utilización de plantas leguminosas en restauración medioambiental de taludes y suelos degradados. (en línea). Mol. 16:48-59. Consultado 23 jun. 2020. Disponible en [https://www.researchgate.net/profile/Mohammad\\_Hossain219/publication/311577320\\_MOL\\_16\\_2016/links/584e92bd08aecb6bd8cfa1ec/MOL-16-2016.pdf#page=48](https://www.researchgate.net/profile/Mohammad_Hossain219/publication/311577320_MOL_16_2016/links/584e92bd08aecb6bd8cfa1ec/MOL-16-2016.pdf#page=48)
10. Clérico, C.; García Préchac, G. 2001. Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región Sur de la cuenca del Río de la Plata. Agrociencia (Uruguay). 5(1):92-103.
11. Da Silva, E. V.; Bouillet, J. -P.; de Moraes Gonçalves, J. L.; Hamilton Abreu, Cassio. J.; Ocheuze Trivelin, P. C.; Hinsinger, P.; Jourdan, C.; Nouvellon, Y.; Stape, J. L.; Laclau, J. -P. 2011. Functional specialization of Eucalyptus fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths. Functional Ecology. 25:996-1006.
12. De Santa Ana, H.; Goso, C.; Daners, G. 2006a. Cuenca Norte: estratigrafía del Carbonífero – Pérmico. In: Veroslavsky, G.; Ubilla, M.; Martínez, S. eds. Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales Paleozoico. Montevideo, D.I.R.A.C. pp.147-208.
13. \_\_\_\_\_; Veroslavsky, G.; Fulfaro, V.; Rosello, E. 2006b. Cuenca Norte: evolución tectónica y sedimentaria del Carbonífero-Pérmico. In: Veroslavsky, G.; Ubilla, M.; Martínez, S. eds. Cuencas sedimentarias del Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales. Paleozoico. Montevideo, D.I.R.A.C. pp. 209-244.
14. Durán, A.; García Préchac, F. 2007. Suelos del Uruguay: origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo, Hemisferio Sur. v. 2, 356 p.
15. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. (en línea). Roma. 126 p. Consultado abr. 2021. Disponible en <http://www.fao.org/3/W2598S/w2598s00.htm>

16. \_\_\_\_\_. 2015. Estado mundial del recurso suelo. (en línea). Roma. 92 p. Consultado 26 abr. 2021. Disponible en <http://www.fao.org/3/i5126s/i5126s.pdf>
17. García Préchac, F.; Clérici, C. 1994. Erosión del suelo: predicción y control. In: Morón, A.; Martino, D.; Restaino, E. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, INIA. pp. 149 -154.
18. \_\_\_\_\_.; Durán, A.; Califra, A.; Hill, M. 2010. Propiedades hídricas de los suelos. Montevideo, Uruguay, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 86 p
19. \_\_\_\_\_.; Manta, E.; Cancela, H.; Cristina, H. 2013. Informe sobre la calidad del agua en la cuenca del Río Santa Lucía: estado de situación y recomendaciones. (en línea). Montevideo, MGAP. 20 p. Consultado jun. 2021. Disponible en <https://quinto-plan.gobiernoabierto.gub.uy/system/documents/attachments/000/000/009/original/c051ce78bef533faa83835d17fcf896d902354bb.pdf>
20. \_\_\_\_\_.; Clérici, C.; Hill, M.; Hill, E. 2016. EROSION versión 6.0.20: Programa de computación para usar USLE/RUSLE en la Región Sur de la Cuenca del Plata. (en línea). Montevideo, Facultad de Agronomía. s.p. Consultado set. 2022. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/programa-erosion-60-usle-rusle>.
21. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Sánchez, G.; Dell'Acqua, M.; Pereira, G.; Dávila, F.; Ferreira, G.; Olivera, G.; Galain, M. 2018. Actualización técnica del modelo de estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica para la elaboración de los planes de uso y manejo Responsable de Suelos (PUMRS). (en línea). Montevideo, MGAP. 9 p. Consultado oct. 2021. Disponible en [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-01/Actualizaci%C3%B3n%20t%C3%A9cnica%20del%20modelo%20USLE-RUSLE\\_0.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-01/Actualizaci%C3%B3n%20t%C3%A9cnica%20del%20modelo%20USLE-RUSLE_0.pdf).

22. Gardi, C.; Angelini, M.; Barceló, S.; Comerma, J.; Cruz Gaistardo, C.; Encina Rojas, A.; Jones, A.; Krasilnikov, P.; Mendonça Santos Brefin, M. L.; Montanarella, L.; Muniz Ugarte, O.; Schad, P.; Vara Rodríguez, M. I.; Vargas, R. eds. 2014. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe. Ciudad de Luxemburgo, Comisión Europea. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. 176 p.
23. Gómez Romero, M.; Villegas, J.; Sáenz Romero, C.; Lindig Cisneros, R. 2013. Efecto de la micorrización en el establecimiento de *Pinus pseudostrabus* en cárcavas. Madera y Bosques 19(3):51-63.
24. Hasenmueller, E. A.; Gu, X.; Weitzman, J. N.; Adams, T. S.; Stinchcomb, G. E.; Eissenstat, D. M.; Drohan, P. J.; Brantley, S. L.; Kaye, J. P. 2017. Weathering of rock to regolith: the activity of deep roots in bedrock fractures. Geoderma. 300:11-31.
25. IMPO (Instituto Nacional de Impresiones y Publicaciones Oficiales, UY). 1987. Ley No. 15.939. (en línea). Montevideo, Uruguay. s.p. Consultado ago. 2021. Disponible en <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/15939-1987>
26. \_\_\_\_\_. 2004. Ley No. 15.239, decreto No. 333: regulación de usos y conservación de suelos y aguas superficiales. (en línea). Montevideo, Uruguay. s.p. Consultado ago. 2021. Disponible en <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-ley/15239-1981>
27. \_\_\_\_\_. 2008. Ley No. 15.239, decreto No. 405: regulación de usos y conservación de suelos y aguas superficiales. (en línea). Montevideo, Uruguay. s.p. Consultado ago. 2021. Disponible en <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-ley/15239-1981>
28. \_\_\_\_\_. 2009. Ley No. 18.564: regulación del uso y manejo de las aguas y el suelo. Sanciones por incumplimiento. (en línea). Montevideo, Uruguay. s.p. Consultado ago. 2021. Disponible en <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/18564-2009/2>
29. \_\_\_\_\_. 2015. Ley No. 19.355, artículo 303. (en línea). Montevideo, Uruguay. p.1. Consultado ago. 2021. Disponible en <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/19355-2015/303>

30. Laclau, J.; da Silva, E. A.; Lambais, G. R.; Bernoux, M.; le Maire, G.; Stape, J. L.; Bouillet, J. -P.; de Moraes Gonçalves, J. L.; Jourdan, C.; Nouvellon, Y. 2013. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. *Frontiers in Plant Science*. 4:1-12.
31. Lambais, G. R.; Jourdan, C.; de Cássia Piccolo, M.; Germon, A.; Costa Pinheiro, R.; Nouvellon, Y.; Stape, J. L.; Camargo Campoe, O.; Robin, A.; Bouillet, J. P.; Le Maire, G.; Laclau, J. P. 2017. Contrasting phenology of *Eucalyptus grandis* fine roots in upper and very deep soil layers in Brazil. *Plant Soil*. 421:301-318.
32. Liu, X.; LI, H.; Zhang, S.; Cruse, R.; Zhang, X. 2019. Gully Erosion Control Practices in Northeast China. *Sustainability*. 11(5065):1-16.
33. MAP. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. (en línea). Montevideo, Uruguay. s.p. Consultado abr. 2021. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/carta-reconocimiento-suelos-del-uruguay-escala-11000000>
34. Marín Sánchez, R.; Osorio, J. 2017. Efectos de la vegetación en la estabilidad de Laderas: una revisión. *Revista Politécnica*. 13(24):113-126.
35. Mármol, S. 2021. Exploración radicular profunda en plantaciones de *eucalyptus grandis*: estudio del perfil continuo suelo-saprolito-roca, su interacción con las raíces y aportes silviculturales, agronómicos y ecológicos. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 281 p.
36. MDN. SGM (Ministerio de Defensa Nacional. Servicio Geográfico Militar, UY). 1985. Carta topográfica a escala 1:50.000. Montevideo, Uruguay. s.p.

37. MGAP. DGRNR (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección General de Recursos Naturales Renovables, UY). 1999. Carta nacional de erosión antrópica. (en línea). Montevideo, Uruguay. 1 p. Consultado may. 2021. Disponible en [http://web.renare.gub.uy/media/suelos/informes/cartaerosionantrópica\\_informe.pdf](http://web.renare.gub.uy/media/suelos/informes/cartaerosionantrópica_informe.pdf)
38. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2008. Riesgo de degradación de tierras. (en línea). Montevideo, Uruguay. 1 p. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/Riesgo%20de%20degradacion%20de%20tierras%20formato%20shp.zip>
39. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2020. CONEAT. (en línea). Montevideo, Uruguay. 1 p. Consultado feb. 2021. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/coneat>
40. Montaña, J. 2004. Recursos hídricos subterráneos: el sistema acuífero guaraní (SAG). In: Veroslavsky, G.; Ubilla, M.; Martínez, S. eds. Cuencas sedimentarias del Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales. Mesozoico. Montevideo, D.I.R.A.C. pp. 193-216.
41. Pawlik, L.; Kasprzak, M. 2018. Regolith properties under trees and the biomechanical effects caused by tree root systems as recognized by electrical resistivity tomography (ERT). *Geomorphology*. 300:1-12.
42. Pérez Bidegain, M.; García Préchac, F.; Hill, M.; Clérici, C. 2010. La erosión de suelos en sistemas agrícolas. In: García Préchac, F.; Ernst, O.; Arbeletche, P.; Pérez Bidegain, M.; Pritsch, C.; Ferenczi, A.; Rivas, M. eds. Intensificación agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural. Montevideo, Tradinco. pp. 67-87.
43. Preciozzi, F.; Spoturno, J.; Heinzen, W.; Rossi, P. 1985. Memoria explicativa de la carta geológica del Uruguay a escala 1:500.000. Montevideo, Ministerio de Industria y Energía. Dirección Nacional de Minería y Geología. 90 p.

44. Prieto González, P. 2011. Base cartográfica para el desarrollo de una metodología de monitoreo de propiedades físicas y químicas de suelos forestales. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 110 p.
45. Rose, K. L.; Graham, R. C.; Parker, D. R. 2003. Water source utilization by *Pinus jeffreyi* and *Arctostaphylos patula* on thin soils over bedrock. *Oecologia*. 134:46-54
46. Sganga, J. C. 1999a. Contribución al conocimiento de las características y génesis del proceso erosivo en cárcavas en Uruguay: estrategias para su control. Montevideo, MGAP. DGRNR. 29 p.
47. \_\_\_\_\_; Gesto, J. C. 1999b. Evaluación de algunos procedimientos mecánicos para la normalización de terrenos con cárcavas. Montevideo, MGAP. DGRNR. DSA. 35 p.
48. Shruthi, R.; Kerle, N.; Jetten, V. 2011. Object-based gully feature extraction using high spatial resolution imagery. *Geomorphology*. 134:260 - 268.
49. Witty, J. H.; Graham, R. C.; Hubbert, K. R.; Doolittle, J. A.; Wald, J. A. 2003 Contributions of water supply from the weathered bedrock zone to forest soil quality. *Geoderma*. 114:389-400.

## 9. ANEXOS

### 9. 1 TÉCNICAS DE LABORATORIO

#### 9.1.1 Determinación de materia orgánica

Materiales y reactivos necesarios: matraces Erlenmeyer de 250 ml, pipeta aforada de 10 ml, probeta de 50 ml, copa graduada 25 ml, copa graduada de 100 c.c. o más.

Reactivos: solución de dicromato de potasio 1N, ácido sulfúrico comercial límpido, solución de sal de Mohr, fluoruro de sodio o ácido fosfórico, agua destilada, solución de difenilamina.

##### 9.1.1.1 Preparación de soluciones

Solución de  $K_2Cr_2O_7$  (dicromato de potasio)

- $K_2Cr_2O_7$  ppa ----- 49.035 grs.
- $H_2O$  csp ----- 1.000 c.c.

Solución de sal de Mohr:

- $Fe (NH_4)_2 (SO_4)_2 \cdot 6 H_2O$  ----- 160 grs.
- $H_2SO_4$  ----- 40 c.c.
- $H_2O$  dest. c.s.p. ----- 1000 c.c.

Se puede calentar hasta casi ebullición.

El procedimiento consiste en colocar en un recipiente resistente al calor (boro 3.3), agregar 500 cc de agua desionizada y 40 cc de ácido sulfúrico, agitar manualmente hasta lograr una solución homogénea. Agregar 160g de  $Fe (NH_4)_2$  y volver a agitar. Calentar esta solución casi a ebullición y dejar enfriar a temperatura ambiente. Una vez frío, trasvasar ha aforado de 1000 ml y enrasar con agua desionizada.

Solución de indicadora

- Difenilamina ----- 0.5 grs.
- $H_2O$  destilada ----- 20 c.c.
- $H_2SO_4$  c.s.p. ----- 100 c.

#### Solución indicadora

- 1.10 PHENANTROLIN (C<sub>12</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>) ----- (3.71 g)
- Sulfato ferroso 7-Hidratos ----- (1.73 g)
- Aforar a 250 ml con agua desionizada

#### 9.1.1.2 Procedimiento de la técnica

El procedimiento consiste en colocar en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, por su orden:

- a) 0.5, 1 o 2 g de suelo (según su tenor aproximado de MO).
- b) 10 ml. de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 1N (con pipeta aforada).
- c) 20 ml. de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado (con dispensador automático).
- d) Agitar un minuto.
- e) Dejar reposar 20 minutos bajo la campana.
- f) Agregar 50 ml. de agua desionizada con probeta.
- g) Enfriar en bandeja con agua hasta temperatura ambiente.
- h) Agregar 5 ml. de Ac. fosfórico (pipeta automática).
- i) Agregar 10 gotas de indicador de MO.

En cada tanda se aplica la técnica a las muestras problema, al control y a un blanco.

Desde la bureta, agregar la solución recientemente valorada de Sal de Mohr, agitando continuamente el matraz Erlenmeyer hasta el viraje del color verde a color púrpura (violeta).

Con el agregado de Mohr, la solución va pasando por distintos tonos de verde, del más oscuro hasta llegar a un verde esmeralda, previo al color borravino.

Cuanto mayor gasto de Mohr, mayor contenido de materia orgánica presente.

Para cada tanda se hace un blanco, que consiste en el mismo procedimiento, pero sin contener muestra problema. Al realizar la titulación de esta muestra en blanco se obtiene la normalidad exacta de la sal de Mohr.

### 9.1.1.3 Cálculos

$$\text{Ne (normalidad exacta)} = \frac{10}{\text{gasto de prueba en blanco}}$$

$$\% \text{ de carbono} = \frac{(\text{vol dicromato} \times \text{N dicromato} - \text{gasto} \times \text{Ne}) \times (0.003 \times 1.3 \times 100)}{\text{peso de muestra}}$$

$$\% \text{ de carbono} = \frac{(\text{vol dicromato} \times \underline{\text{N dicromato}} - \text{gasto} \times \text{Ne}) \times (0.003 \times 1.3 \times 100)}{\text{peso de muestra}}$$

El valor 0.003 es una constante obtenida de dividir el peso atómico del Carbono entre el cambio de valencia. Mientras que el 1.3 corresponde al factor promedio para corregir por oxidación incompleta.

$$\% \text{ de carbono} = (10 \times \underline{1} - \text{gasto} \times \text{Ne}) \times 0.39 / \text{peso muestra (g)}$$

$$\% \text{ humus} = \% \text{ carbono} \times 1.724$$

Se asume que el humus posee una cantidad de C de 58%.

### 9.1.2 Análisis granulométrico

Materiales y reactivos necesarios: balanza con precisión 0.01g, balanza con precisión 0.001g, densímetro Bouyoucos (g/l a 20° C), plancha calórica (hasta 90° C), vasos de bohemia 1000 ml (digestión), frascos con tapa rosca de 500 ml (agitador), varilla agitadora de metal con cilindro perforado, probetas de 1000 ml, agitador con regulador de RPM, embudo de 20 cm de diámetro, tamiz 50 micras (300 mallas/pulgada), placas de Petri, estufa de 105° C

Reactivos: perhidrol (agua oxigenada) 130 Vol., calgón (dispersante; 50 g/l de hexametáfosfato de sodio)

### 9.1.2.1 Procedimiento de la técnica

Pesar 50 g de suelo (precisión 0.01g), previamente molidos en mortero y pasarlos a un vaso de bohemia de 1000 ml. En caso de suelos arcillosos se puede pesar 30 g y en arenosos 70 g.

Agregar 40 ml de agua desionizada y 10 ml de perhidrol. Al observar que se atenúa la reacción, colocar los vasos de bohemia en la plancha a 60° C e ir agregando de a 10 ml de perhidrol; pasada una hora desde que está en la plancha, aumentar la temperatura de ésta a 90° C y continuar agregando perhidrol hasta que se obtengan colores claros. Mientras se producen las reacciones, se recomienda realizar la pesada para el cálculo de Factor Seco (FS), el cual se realiza en una balanza de precisión 0.001 g. Para esto, se toma el peso en vacío de una placa de Petri, se anota y tara para pesar en ella 10g de suelo seco y molido, las cuales se colocarán en una estufa a 105° C durante 2 horas, se dejan enfriar en un desecador y se les toma el peso nuevamente conteniendo la muestra.

Una vez obtenido las muestras de color claro, se dejan enfriar y se pasan a las botellas de 500 ml, agregar 50 ml de dispersante y enjuagar el vaso con agua deionizada, procurando no sobre pasar en la botella los 250 ml totales. Enfriar en agua si es necesario aún y colocar en agitador durante toda la noche (tiempo mínimo de agitado 6 hs), a una velocidad de 80 golpes/min (frec. 8.5).

Una vez agitado, se debe trasvasar a las probetas de 1000 ml, en la cual se agrega la suspensión, enjuague de las botellas y se enrasa a 1000 ml con agua desionizada. En esta etapa del proceso se pueden tomar dos vías, se puede retirar la arena a partir del tamiz o se deja para el final.

En caso de sacarla, tener en cuenta que el volumen total del enjuague de la arena no puede superar los 1000 ml.

En ambos casos, una vez enrasado, se agita la suspensión con la varilla de cilindro perforado unas 10 veces y se anota la hora. Se debe preparar además un blanco, el cual solo contendrá los 50 ml de dispersante y se enrasa también a 1 litro.

Una vez finalizada la agitación de las muestras se toma lectura con el densímetro a las 2 y 6 horas, procurando no mover ni agitar la suspensión en el momento de las lecturas, si esto ocurriera (agitado de la suspensión), se debe

comenzar nuevamente con el agitado de la muestra con la varilla de cilindro perforado.

Una vez tomadas las lecturas de densidad, se tamiza la arena (si no se realizó previamente a las lecturas, en este caso se realizó previamente) y se lava con agua corriente del grifo hasta ver que ésta no elimina más arcillas y limos. La arena obtenida, se trasvasa a placas de Petri y se lleva a la estufa de 105° C por 4 horas, para su posterior pesado en seco.

De esta manera, se obtiene el contenido de arena por peso en seco, % de arcilla por diferencia de densidad y % de limo por diferencia entre PT inicial menos los % de arena y arcilla.

#### 9.1.2.2 Cálculos

$\% \text{ Arena} = (\text{peso de arena en seco} \cdot 100 \cdot \text{FS} \cdot \text{FSM}) / \text{peso de suelo inicial}$

$\% \text{ Arcilla} = ((\text{prom. de lecturas densímetro-PB}) \cdot \text{FS} \cdot \text{FSM} \cdot 100) / \text{peso de suelo inicial}$

$\% \text{ Limo} = 100 - \% \text{ Ar} - \% \text{ Ac}$

$\text{FS} = \text{peso de suelo seco al aire (estufa a } 60^{\circ}\text{C)} / \text{peso de suelos seco a } 105^{\circ}\text{C}$

$\text{FSM} = 100 / (100 - \% \text{ MO})$

#### 9.1.3 Determinación de bases de intercambio

Reactivo: acetato de amonio 1M a pH 7, para el cual hay que diluir 60 mL de ácido acético glacial en 75 mL de solución concentrada de amoníaco. Llevar a 1 litro con agua desionizada. Ajustar el pH entre 6.9 y 7.1 con amoníaco o ácido acético.

#### 10.1.3.1 Procedimiento de la técnica

- a) Pesar 2.5 grs de suelo seco y colocar en frasco con tapa rosca
- b) Agregar 25 mL de acetato de amonio 1M a pH 7
- c) Agitar 20 minutos y filtrar en papel Whatman No. 1

d) Leer Ca y Mg por EAA (espectrometría de absorción atómica), y K y Na por EE (espectrometría de emisión) en el extracto.