

CAPÍTULO V: PALEOSUELOS

5.1- Introducción

Un suelo fósil o paleosuelo, como otros tipos de fósiles, corresponde a los restos de un suelo antiguo. Este puede haber sido enterrado por depósitos posteriores, o bien estado expuesto durante un amplio intervalo de tiempo sin ningún tipo de actividad pedogenética (Retallack, 2001). Generalmente los paleosuelos son suelos que se encuentran en desequilibrio con los factores formadores de suelo actuales, es decir son suelos desarrollados bajo condiciones diferentes a las del presente. Los suelos se forman debido a modificaciones físicas, químicas y biológicas de los materiales (sedimentos y rocas) de la superficie terrestre. La formación de un suelo depende siempre de cinco factores denominados “factores formadores de suelo”, los cuales son:

- **Material parental:** El material mineral meteorizado a partir del cual se desarrolla un suelo se denomina *roca madre*. La naturaleza de la roca madre influye en el suelo de dos maneras. En primer lugar, el tipo de roca madre afectará a la velocidad de meteorización y, por ende, a la velocidad de formación del suelo. Por ejemplo, las rocas madres que son sedimentos no consolidados están en parte ya meteorizados, es por ello que el desarrollo de suelo será mucho más rápido que cuando el material parental es un lecho rocoso. En segundo lugar, la composición química de la roca madre afectará la fertilidad del suelo. Esto influye en el carácter de la vegetación natural que el suelo puede sustentar. Antes se creía que el material parental era el factor principal que producía las diferencias entre los distintos tipos de suelo. Pero en realidad, es sabido que se pueden producir suelos similares a partir de rocas madres diferentes y que diferentes tipos de suelo se originan a partir de una misma roca madre.
- **Clima:** El clima se considera el factor más influyente en la formación del suelo. La temperatura y las precipitaciones son los elementos que ejercen el efecto más fuerte sobre la formación del suelo. Las variaciones de temperatura y de precipitaciones determinan si predominará la meteorización química o la mecánica y también influyen en gran medida en la velocidad y profundidad de la meteorización. Por ejemplo, un clima cálido y húmedo puede producir una potente capa de suelo meteorizado químicamente; a su vez, un clima frío y seco produce una fina capa de

derrubios meteorizados físicamente. Por su parte, la cantidad de precipitaciones influye sobre el grado de lixiviación de los diversos materiales del suelo, afectando con ello a su fertilidad. Por último, las condiciones climáticas a su vez condicionan el tipo de vida animal y vegetal presente en el suelo.

- **Topografía:** La pendiente del terreno puede variar en gran medida en cortas distancias. Esas variaciones, a su vez, pueden inducir al desarrollo de suelos localizados de acuerdo al tipo de pendiente. En pendientes pronunciadas, los suelos poseen poco desarrollo, debido a que la infiltración de agua es muy poca. Como consecuencia, el contenido de humedad del suelo puede no ser suficiente para el crecimiento de las plantas. En contraste, los suelos desarrollados en las tierras bajas tienen un carácter muy diferente. Estos suelen ser suelos espesos y oscuros. El color oscuro se debe a la gran cantidad de materia orgánica que se acumula, ya que las condiciones saturadas retrasan la descomposición vegetal. El terreno óptimo para el desarrollo de un suelo es una superficie plana a ligeramente ondulada en zonas altas. Aquí, encontramos buenas condiciones de drenaje, erosión mínima e infiltración suficiente de agua en el suelo.
- **Organismos:** Las plantas y los animales desempeñan un papel vital en la formación del suelo. Los tipos y la abundancia de organismos presentes tienen una fuerte influencia sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo. Las plantas y los animales proporcionan materia orgánica al suelo. Ciertos suelos anegados están compuestos casi exclusivamente de materia orgánica, mientras que los suelos de desierto pueden contener cantidades de tan sólo 1%. La fuente principal de materia orgánica del suelo es la vegetal, aunque también contribuyen los animales y un número infinito de microorganismos. Por consiguiente, la fertilidad del suelo está relacionada en parte con la cantidad de materia orgánica presente. El producto final de la materia orgánica se denomina *humus*, un material que ya no se parece a las plantas ni a los animales a partir de los cuales se formó.
- **Tiempo:** La naturaleza del suelo se ve muy influida por la duración de los procesos que han estado actuando. Si se ha producido edafogénesis durante un tiempo comparativamente corto, el carácter de la roca madre determina en gran medida las características del suelo. A medida que avanzan los procesos edáficos, la influencia de la roca madre sobre el suelo se ve eclipsada por los otros factores formadores de suelo, en especial el clima. No puede enumerarse la magnitud de tiempo necesaria para que evolucionen los diversos tipos de suelos, porque los procesos de formación

de suelo actúan a velocidades variables bajo circunstancias diferentes. Sin embargo, a modo de regla, cuanto más tiempo ha estado formándose un suelo, mayor es su espesor y menos se parece al material parental.

Cabe aclarar que los factores formadores de suelo no actúan por separado sino que lo hacen todos a la vez. De esta manera, ningún factor individual es responsable de las características de un suelo, es la influencia combinada del material parental, el clima, la topografía, los organismos y el tiempo lo que determina el tipo de suelo que se va a formar.

Los paleosuelos de la Formación Mata Amarilla, como se desarrollará más adelante en el presente capítulo, poseen características de suelos hidromórficos y se los podría agrupar dentro del grupo de los “gleysoles” o suelos de tipo *gley*, de acuerdo a la clasificación de Mack *et al.* (1993). Esta denominación hace referencia a las coloraciones gris, gris verdosas a verde oliva que poseen los mismos, provocadas por el estado reducido de los óxidos de hierro. Estos paleosuelos, como veremos a lo largo del capítulo, poseen características compatibles con climas tropicales húmedos estacionales, lo cual va en concordancia con el comienzo del período de “*greenhouse*” del Cenomaniano, el cual perdura durante todo el Cretácico superior y gran parte del Paleógeno (Royer, 2010). El Cenomaniano constituye un período muy importante en la evolución de la vegetación ya que se produce un recambio florístico de grupos mesofíticos hacia floras dominadas por angiospermas (Iglesias *et al.*, 2009). Estos cambios paleoflorísticos también se registran en los paleosuelos ya que a partir del Cenomaniano los procesos pedogenéticos son muy similares a los procesos actuales, debido a que la vegetación es similar.

El capítulo se ordenó de la siguiente manera, en una primera instancia, dentro del apartado **5.2** Morfología de paleosuelos se describen e interpretan todos los rasgos pedogenéticos macroscópicos descritos durante las tareas de campo. A continuación se describen los rasgos micromorfológicos en el apartado **5.3**. Sobre la base de las descripciones macroscópicas y microscópicas se describieron los diferentes horizontes de suelos (ver apartado **1.5.4** del capítulo I). A partir de las características dominantes y de los horizontes de suelo, se los clasifica y se realiza una pequeña discusión acerca de si es o no válido determinarlos de acuerdo a la clasificación de suelos actuales (Soil taxonomy; Soil Service Staff, 1998). Luego se determinó el grado de desarrollo de cada nivel de paleosuelos en un rango de 1 a 7, siguiendo los criterios de Bown y Kraus (1987). Posteriormente se puso especial

énfasis en las variaciones tanto verticales como laterales de los paleosuelos y su correlación con los paleoambientes sedimentarios en los cuales se desarrollaron, teniendo en cuenta relaciones entre tasa de sedimentación, material parental, condiciones de drenaje, topografía y tipo de suelo.

Por último se estudiaron los paleosuelos acumulados desde un punto de vista genético como una herramienta para poder detectar avulsiones de los canales fluviales en los depósitos de las planicies de inundación. De esta manera se estimaron tasas de avulsión y tasas de acomodación relativas a lo largo de toda la Formación Mata Amarilla.

5.2- Morfología de Paleosuelos

5.2.1- Color y Textura

El color es una de las características más importantes de los paleosuelos por tres razones fundamentales:

1. Es una propiedad de fácil identificación mediante comparación visual con cartillas de suelos
2. Es un indicador de las características físicas y químicas tales como profundidad del nivel freático, condiciones de drenaje y diferenciación de horizontes.
3. Refleja el contenido de “humus” o materia orgánica
4. Indica el estado de óxido/reducción los componentes de hierro presentes en el suelo.

Los colores fueron determinados en los trabajos de campo en roca fresca tanto en húmedo como en seco, para ello se utilizó la carta de colores de suelo de Munsell (Munsell[®] Soil Color Chart, 2000). No sólo se determinaron los colores de la matriz de suelo sino también de los moteados, nódulos, concreciones, cutanes y rizolitos.

Los colores en los suelos y rocas sedimentarias están directamente relacionados con el tipo de óxido de hierro presente (Schwertmann, 1993; Kraus, 1997). Los colores predominantes en los paleosuelos de la Formación Mata Amarilla son los colores denominados “gley”, los cuales incluyen colores negros a grises oscuros para los horizontes superiores (Gley 1 N3/- y N2.5/-; lámina 5.1 A y B) y colores de la gama gris-verdosa para los horizontes subsuperficiales (Gley 1 10GY

5/1 y N5/-; lámina 5.1 C y D). Estos colores son atribuidos a condiciones de drenaje impedido o ineficiente, probablemente producto del alto contenido de arcillas expansivas (esmeclitas), lo cual disminuye en forma considerable el potencial de infiltración (Retallack, 1994). La remoción preferencial de hierro de los horizontes “A” indica condiciones reductoras, producidas por el alto contenido de materia orgánica y por las condiciones de saturación elevadas. Los colores negros y grises oscuros de los horizontes “Ag” (el sufijo “g” se refiere a *gley*) reflejan remoción de hierro (bajos cromas) y alto contenido de materia orgánica (Lámina 5.1 A). Es de destacar que cuanto más saturado y más fino es el material parental de un suelo, se va a acumular mayor contenido de materia orgánica, lo que a su vez genera peores condiciones de drenaje. Varias características indican que los horizontes subsuperficiales de suelo estuvieron saturados y bajo condiciones reductoras, como lo son los horizontes “Bg” y “Cg” de textura pelítica. La matriz gris verdosa de los horizontes subsuperficiales “Bg” posee cromas de 1 (Lámina 5.1 C y D), indicando reducción de la matriz, es decir el hierro se encuentra en estado ferroso (Fe^{++}), lo cual es típico de condiciones de saturación prolongada (25-50% del año) (Daniels *et al.*, 1971). Los moteados de coloración amarillenta a amarronada, los cuales se encuentran a lo largo de toda la Formación Mata Amarilla, indican condiciones de suelo seco o drenado, lo cual evidencia una probable estacionalidad en la saturación (Retallack, 1994; 2001). De esta manera las zonas aledañas a las raíces y excavaciones, así como también los planos de *slickensides* constituyen áreas de aireación y oxidación de los óxidos de hierro durante la estación seca o no saturada (Lámina 5.1 B y F, las flechas blancas indican las excavaciones y rizolitos de coloración amarillas). Estas coloraciones amarillentas a castañas indican presencia de goethita (α - $FeOOH$) en ausencia de hematita, los colores poseen tonos *o hues* de entre 7,5YR y 10YR. Generalmente los horizontes de suelo subsuperficiales “Cg” de textura arenosa a limo arenosa poseen coloraciones amarillentas a castañas (7,5YR-10YR), el hierro en estos casos se encuentra como goethita (Lámina 5.1 E y F) o como óxidos de hierro hidratados (limonita), lo cual indica condiciones de drenaje más favorables, probablemente producto de paleotopografías más elevadas y de las texturas con mayor permeabilidad.

En la sección superior de la Formación Mata Amarilla aparecen algunos niveles de coloración rojiza en forma saltuaria intercalados con los niveles grises verdosos característicos (10R 4/4; lámina 5.1 G). Las coloraciones rojizas (10R y

Color y textura



De **A** a **G** las flechas marcan los diferentes colores de referencia según la carta de colores de Munsell (Munsell® soil color chart, 2000.)

2,5YR) reflejan la presencia de hematita, la cual generalmente está asociada a la goethita y produce tonos (*hues*) entre 5YR y 10 YR. El enrojecimiento o “rubificación” es típico de los suelos de clima seco como los del mediterráneo (Duchaufour, 1982). Las rocas de coloración rojiza generalmente son atribuidas a modificaciones posdeposicionales de los minerales ferruginosos (Walker, 1967) o a alteraciones diagenéticas de goethita a hematita (Blodgett, 1988; Retallack, 1991). Por analogía a ejemplos de suelos actuales la rubificación o enrojecimiento es característica de suelos de tipo fersialíticos (Duchaufour, 1982), en los cuales el hierro y las arcillas son iluviadas (movidas hacia abajo) durante la estación húmeda, y durante la estación seca se produce la oxidación y el enrojecimiento (Duchaufour, 1982). Esto podría ser producto de una mejora en las condiciones de drenaje local debido a topografías más elevadas, o por un cambio climático más general que produce una acentuación de la estacionalidad. La primera génesis es la más probable, debido a que los niveles rojizos no son continuos, y a que se encuentran interdigitados con niveles gris verdosos (Lámina 5.1 G, se observa en flechas blancas los niveles ricos en hematita y en flechas negras los colores *gley* con el hierro en estado ferroso).

De esta manera se observa que las condiciones de drenaje de los paleosuelos de la Formación Mata Amarilla fueron malas tanto para los horizontes superficiales como subsuperficiales; por ello se los puede agrupar dentro de los llamados suelos “hidromórficos”. Las condiciones hidromórficas podrían ser una combinación de anegamientos tanto de aguas superficiales (horizontes superficiales que impiden la percolación o infiltración de agua), así como también de aguas subterráneas ya que los sistemas fluviales distributarios (unidades de canales simples de gran escala y faja de canales complejos) estarían en zonas bajas relativamente cercanas a la costa, así como también las zonas albuféricas y de planicies costeras.

5.2.2- Moteados

Los moteados son comúnmente asociados con las trazas de raíces y los rellenos de cavidades y/o excavaciones (Retallack, 2001). Se generan en las partes del suelo que poseen un contacto directo con la biosfera (organismos, ej. vegetación) y la atmósfera (entrampan aire, al menos durante alguna estación del año). Muchos de los moteados son considerados rizohalos, es decir, trazas de la zona de actividad

de las raíces, siguiendo los criterios de Kraus y Hasiotis (2006). Hay cinco tipos diferentes de moteados en la Formación Mata Amarilla.

Los moteados azul-violáceos (Gley 2: 10B y 5PB) indican capas altamente saturadas en agua, contienen óxidos de hierro en estado ferroso y abundante materia orgánica, generalmente están asociados con óxidos de manganeso y poseen halos de color violáceo (5PB 4/1; Lámina 5.2 A).

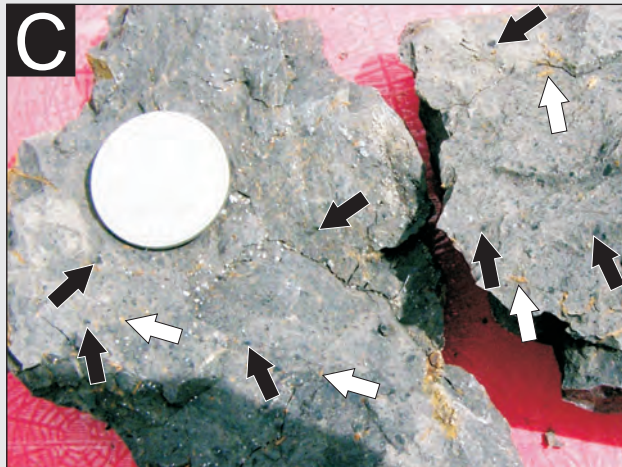
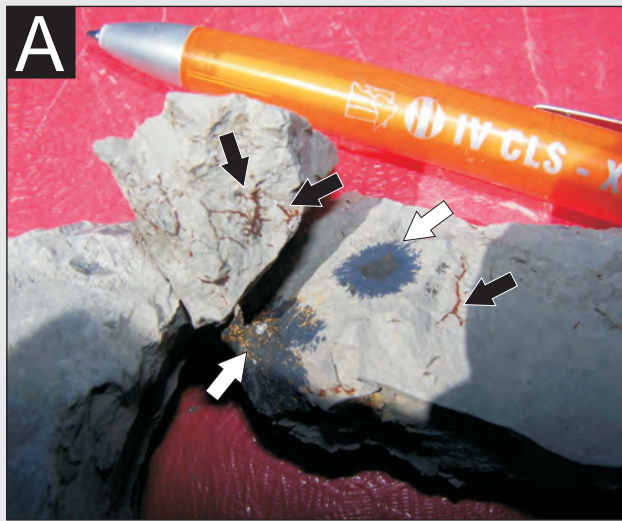
Los moteados amarillentos a amarronados (7,5YR-10YR) son los más comunes a lo largo de toda la Formación Mata Amarilla (Lámina 5.2 B), indican la re-oxidación de los óxidos de hierro de la matriz del suelo y generalmente se ubican en las cavidades dejadas por las raíces, en las excavaciones de animales o en las superficies de los espejillos de fricción o *slickensides*.

Un tercer tipo de moteado es de color gris oscuro a negro (N 2.5), que se corresponde con pequeños restos de materia orgánica carbonosa de origen vegetal. Son siempre de pequeño tamaño y se encuentran diseminados por toda la matriz del suelo, generalmente asociados con los moteados de color amarillento a amarronados (Lámina 5.2 C).

Los moteados blanquecinos (N8/-; N7/-) se caracterizan por tener muy bajas intensidades de color o *value* (8 y 7; Lámina 5.2 D), no son muy comunes en la Formación Mata Amarilla, caracterizan a los horizontes subsuperficiales ubicados por debajo del horizonte "A". Se distinguen por la disminución de la materia orgánica, óxidos de hierro y arcilla producto de la eluviación. Se producen por anegamiento o encharcamientos superficiales, si se acentúa el período de anegamiento se incrementa la eluviación y se produce el desarrollo de un horizonte "E" eluvial. A este tipo de moteados se los denomina "albanes" o "neoalbanes" (Retallack, 2001).

Por último los moteados de color naranja (10YR 8/6 hasta 10YR 6/8) son atribuidos a jarosita (Kraus, 1998). La jarosita se forma comúnmente a partir de la pirita cuando las condiciones de drenaje del suelo permiten la oxidación, lo que conlleva a elevar la acidez del suelo (Van Breeman, 1982; Miedema *et al.*, 1974; Kraus, 1998). La oxidación de la pirita produce óxidos de hierro y yeso (Van Breeman, 1982; Dent, 1986). Tanto los óxidos de hierro como los niveles con yeso se encuentran asociados a los paleosuelos con moteados de jarosita de la Formación Mata Amarilla Inferior y Superior (Lámina 5.2 E y F). La pirita se encuentra generalmente en sedimentos marinos (Berner, 1984) y en suelos muy pobremente

Moteados



A- Moteados azul-violáceos (flechas blancas), contienen óxidos de hierro en estado ferroso, abundante materia orgánica y generalmente están asociados con óxidos de manganeso, poseen halos de color violáceo, asociados a moteados amarillentos a amarронados (flechas negras). **B-** Moteados amarillentos a amarронados (7,5YR-10YR), son los más comunes a lo largo de toda la Formación Mata Amarilla. **C-** Moteados de colores gris oscuro a negro, corresponden a pequeños restos de materia orgánica carbonosa de origen vegetal (flechas negras), se encuentran asociados con los moteados de color amarillento a amarронados (flechas blancas). **D-** Moteados blanquecinos los cuales se caracterizan por tener muy bajas intensidades de color, se producen por la disminución de la materia orgánica, óxidos de hierro, arcilla y compuestos de aluminio producto de la eluviación. **E y F-** Moteados de color naranja, están compuestos de jarosita, ésta se forma comúnmente a partir de la piritita cuando las condiciones de drenaje del suelo permiten la oxidación, lo que conlleva a elevar la acidez del suelo.

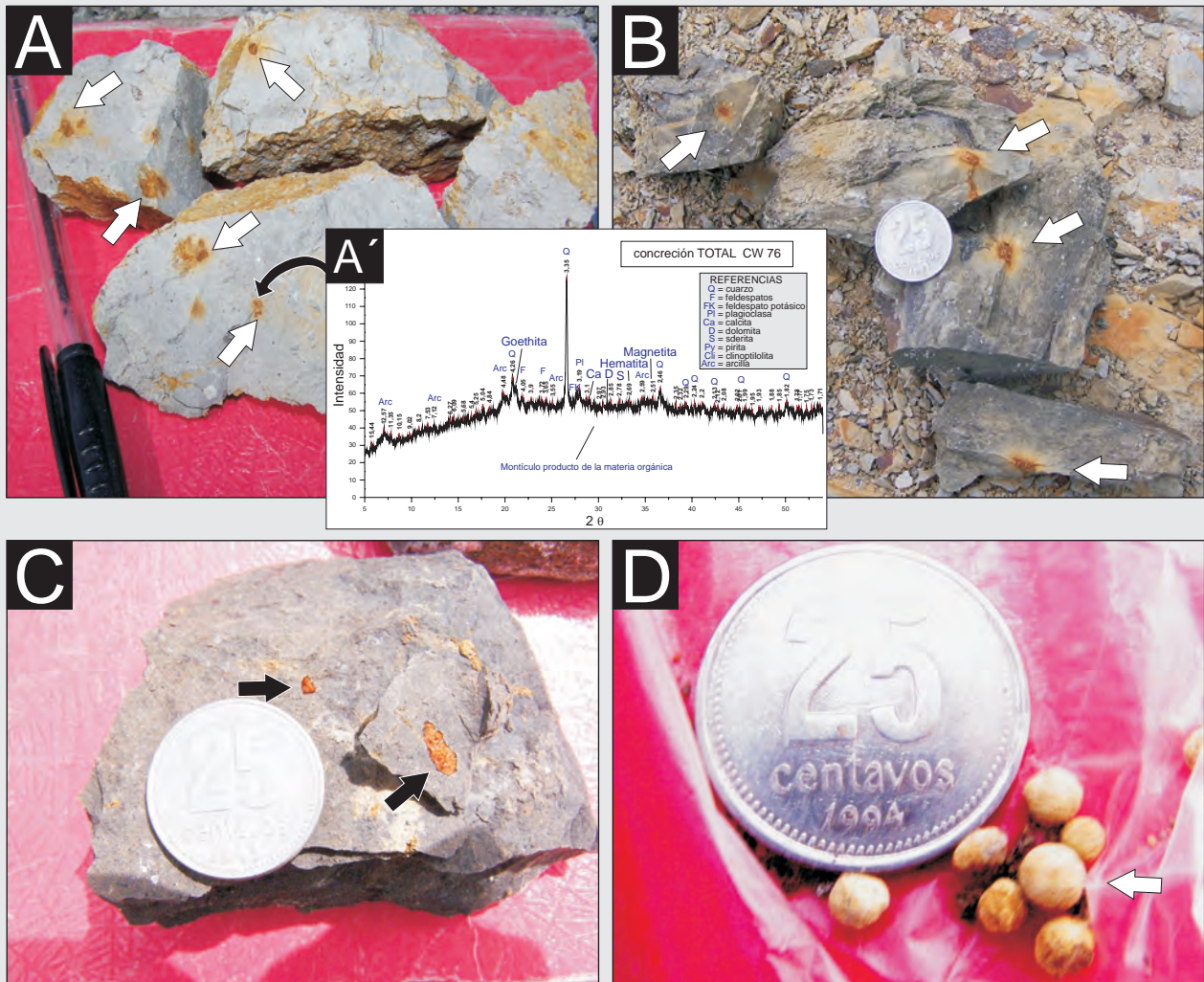
drenados de áreas costeras y estuarios (Van Breeman, 1973; Miedema *et al.*, 1974). Estos suelos han sido denominados “suelos con potencial de sulfato ácido” por Brinkman y Pons (1973), debido a que cuando mejoran las condiciones de drenaje del suelo se produce la oxidación de la pirita y ésta genera condiciones ácidas y suelos con sulfato ácido. Esto permite el desarrollo de moteados y nódulos de jarosita. Este tipo de suelo fue descrito para sucesiones fósiles, como por ejemplo los paleosuelos del Paleoceno de la Cuenca de Bighor, Wyoming, USA (Kraus, 1998).

5.2.3- Nódulos

Los nódulos y las concreciones, conjuntamente con los moteados son los principales rasgos redoximórficos o características redox. Estos atributos redox en los suelos son causados por la alternancia y sobreimposición de condiciones de oxidación y reducción (Retallack, 2001). Los nódulos más abundantes en la Formación Mata Amarilla son los amarillentos a marrón oscuro (7.5YR 6/6 hasta 7.5YR 5/8), los cuales están compuestos de óxidos de hierro, cuarzo, arcillas de tipo esmectita y menores cantidades de calcita y siderita (determinado por difracción de rayos X; Lámina 5.3 A´). Poseen generalmente entre 0,5 y 20 mm (Lámina 5.3 A y B) y usualmente están rodeados por halos de color grisáceo más claro (ver Lámina 5.3 B). Los nódulos amarillentos son debidos a cambios en las condiciones redox del suelo como respuesta a las fluctuaciones en la saturación de agua del suelo. El hierro es removido preferencialmente desde las partes del suelo en condiciones de reducción y precipitado en las partes más aireadas en forma de nódulos. Es por ello que los nódulos de hierro abundan en las facies limosas y arenosas de la formación. Las zonas decoloradas (halos; Lámina 5.3 B) alrededor de los nódulos representan áreas de lavado o eluviación del hierro. Los nódulos de hierro caracterizan los suelos limo-arenosos actuales sujetos a condiciones con drenaje ineficiente hasta muy pobre (Imbellone *et al.*, 2009). Los suelos con drenaje impedido tienden a no generar nódulos, debido a que el periodo de saturación es total y no hay alternancia de oxidación y reducción; de esta manera el óxido de hierro no puede ser removilizado y precipitado como nódulos.

Los nódulos de siderita y de calcita (Lámina 5.3 C), están caracterizados por su coloración anaranjada fuerte (5YR 6/8). Siempre se encuentran acompañados de una cobertura o “*coating*” de coloración negra (5YR 2.5/1) que probablemente

Nódulos



Concreciones



A- Nódulos de óxidos de hierro de color amarillento en una facies limoarenosa (horizonte "Cg"), son producidos por cambios en las condiciones redox del suelo como respuesta a las fluctuaciones en la saturación del suelo. **A'** - Difractograma de Roca Total de nódulo foto A. **B**- Nódulos de óxido de hierro que están rodeados por halos de color grisáceo claro. **C**- Nódulos de siderita y de calcita, están caracterizados por su coloración anaranjada fuerte. Poseen una pátina o *coating* de coloración negra compuesta de óxido de manganeso (pirolusita). **D**- Nódulos de calcita de pequeño tamaño, poseen un muy alto porcentaje de arcilla de tipo esmectita. **E**- Concreción de óxido de manganeso, asociada a condiciones de drenaje muy pobres con períodos alternantes de oxidación y reducción, piqueta de escala (50 cm de largo).

corresponda a un óxido de manganeso (pirolusita), el cual, se encuentra frecuentemente asociado a horizontes “Bg”.

Los nódulos de calcita son de pequeño tamaño (0,1 a 10 mm de diámetro), de color amarillo pálido a beige (10YR 8/3), subredondeados a esféricos (Lámina 5.3 D). Si bien son en su mayoría carbonáticos tienen un muy alto porcentaje de arcilla de tipo esmectita. Estos nódulos se encuentran generalmente dispersos en la matriz del paleosuelo, aunque suelen concentrarse alrededor de las trazas de raíces y/o excavaciones.

5.2.4- Concreciones

En la parte Norte del área de estudio hay presencia de concreciones de color negro azabache (10B 2.5/1). Estas concreciones son muy notorias en afloramiento, debido a que poseen formas esféricas a cilíndricas con diámetros que promedian los 20 a 60 cm. y en ocasiones superan los 60 cm de largo (Lámina 5.3 E). El color y el análisis composicional son consistentes con una mezcla de óxidos de manganeso (principalmente pirolusita) y de goethita (Kraus, 1999; Kraus y Hasiotis, 2006). Las concreciones de color negro son mucho más ricas en manganeso, mientras que las concreciones de color marrón son más ricas en hierro (Zhang y Karathanasis, 1997). Las acumulaciones de manganeso son comunes en los suelos con matriz de colores de bajas intensidades (gris-verdosos), y generalmente se las asocia a condiciones de drenaje muy pobres con períodos alternantes de reducción y oxidación (Retallack, 2001; Birnie y Paterson 1991; Stiles *et al.*, 2001; Kraus y Hasiotis, 2006). Estas concreciones han sido atribuidas a sistemas radiculares o tocones de árboles (Kraus y Hasiotis, 2006). Los microorganismos son agentes muy importantes en la precipitación de minerales ferromagnesianos (Konhauser, 1998) y las raíces son un lugar propicio para la formación de concreciones debido a que son una fuente de materia orgánica y carbón para las bacterias y microorganismos (Robbins *et al.*, 1992). De este razonamiento es adecuada la posible asociación de estas concreciones de óxidos de manganeso a tocones de árboles, y por ello debería clasificarse como una rizoconcreción (Klappa, 1980; Kraus y Hasiotis, 2006).

5.2.5- Espejillos de fricción (*slickensides*) y Microrelieve Gilgai

Los *slickensides* o espejillos de fricción se encuentran a lo largo de toda la Formación Mata Amarilla, son fracturas o planos de fricción que se intersectan unos a otros. Generalmente son superficies cóncavas hacia arriba y forman una especie de cuenca o *bowl* (Lámina 5.4), cuyos planos poseen coloraciones diferentes al de la matriz del paleosuelo, siendo generalmente similar al de los moteados y nódulos (Lámina 5.4). Sin embargo en ocasiones presentan el mismo color de la matriz del paleosuelo (Lámina 5.1 C). Los *slickensides* suelen ser un indicador del tamaño de grano y viceversa, ya que los limos poseen grandes *slickensides* mientras que en los paleosuelos arcillosos son mucho más pequeños. Los *slickensides* se forman en suelos que contienen arcillas del grupo de las esmectitas, llamadas vulgarmente “arcillas expansivas”, debido a sus propiedades de expandirse cuando están hidratadas y de contraerse en ausencia de agua. De esta manera la presencia de *slickensides* indica periodos alternantes de hidratación y deshidratación del suelo, es decir un clima estacional. El continuo desarrollo de *slickensides* durante períodos húmedos y secos alternante genera una topografía ondulada característica, con pequeños montículos y depresiones. A este relieve se lo denomina topografía Gilgai o microrelieve Gilgai. Generalmente la longitud de onda es del orden de los 3 metros y promedian los 2 m de altura (Lámina 5.4). Las grietas producidas por los *slickensides* generan una sinmixis o mezcla del material de suelo a través del tiempo. En las depresiones el material es transportado hacia abajo y en los montículos es transportado hacia arriba por los planos principales de *slickensides*.

5.2.6- Cutanes

Los cutanes o barnices se producen por la translocación de material desde los horizontes superiores hacia los horizontes subsuperficiales. El proceso de remoción del horizonte superficial se denomina “eluvación” y la concentración y/o precipitación del cután se debe a “iluvación”. De esta manera los cutanes son rasgos muy importantes en la pedología ya que son la evidencia de los principales procesos de desarrollo de horizontes de suelos (Eluvación- Iluvación).

La translocación de material (preferentemente arcillas, materia orgánica y óxidos de hierro y manganeso) se da a través de los espacios porales de la matriz de suelo. De esta manera, en los suelos arenosos se producen cutanes o barnices

Microrrelieve Gilgai y Slickensides o espejillos de fricción

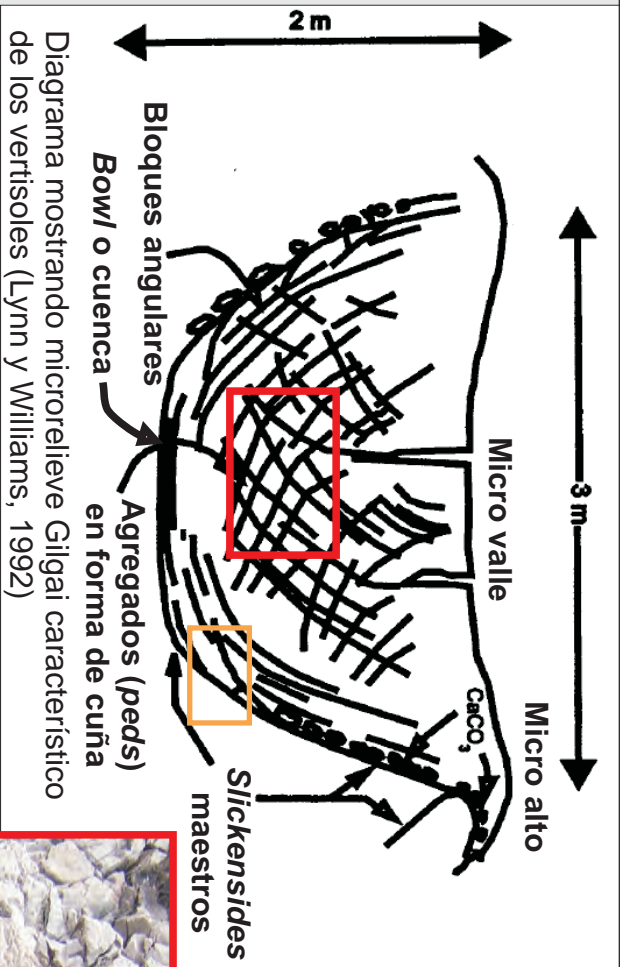


Diagrama mostrando microrelieve Gilgai característico de los vertisoles (Lynn y Williams, 1992)



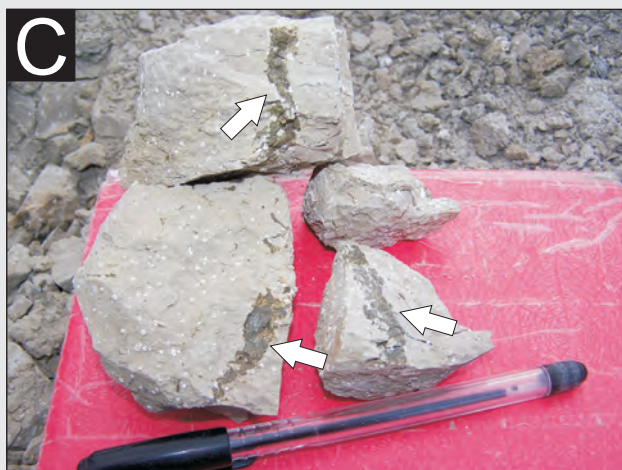
alrededor de los granos de arena, a los cuales se los denomina microcutanes o *coatings* argílicos (ver apartado 5.3 Micromorfología). En cambio en los suelos limosos y arcillosos la translocación de material se da a través de los huecos producidos por los *slickensides* (Lámina 5.5 A, B y E), así como también en aquellos producidos por organismos, ya sean excavaciones o raíces (Lamina 5.5 C), o alrededor de los agregados de suelo (“*peds*”) (Lamina 5.5 F).

Los cutanes generalmente son iluviados en horizontes “B”; si el material iluviado es arcilloso junto con materia orgánica, al horizonte se lo denomina horizonte argílico “Bt” (siempre y cuando no tenga otra característica preponderante). Los cutanes poseen diferentes nombres de acuerdo a la composición del material iluviado. Por ejemplo, si son de composición argílica se denominan “argillanes” (Andreis, 1981; Lámina 5.5 A, C y D), cuando la composición es de óxidos de manganeso se denominan “manganes” (Andreis, 1981; Lámina 5.5 D), si están compuestos de óxidos de hierro se denominan “ferranes”, y si es una mezcla de óxidos de hierro y arcilla se designan con el nombre de “ferriargilanes” (Andreis, 1981; Lámina 5.5 E y F). Los cutanes compuestos de materia orgánica (Lámina 5.5 B y E) no poseen una denominación particular.

5.2.7- Raíces y rizolitos (moldes de raíces, rizotúbulos, rizoconcreciones y rizohalos)

Las trazas de raíces o rizolitos son las características más comunes en la descripción e interpretación de los paleosuelos (Retallack, 2001). Los rizolitos según la definición original de Klappa (1980) son estructuras organosedimentarias que preservan la actividad de las raíces de las plantas. Los rizolitos fueron reconocidos como producto de la exposición subaérea y la pedogénesis (Sarjeant, 1975; Klappa, 1980). Más recientemente fueron definidos como trazas fósiles que preservan la interacción sustrato-planta y que indican la posición relativa del nivel freático (Retallack, 2001). Algunos investigadores consideran a las trazas de raíces como fósiles y no como trazas fósiles, argumentando que además de ser parte de la planta, éstas no se mueven, no excavan, no cazan y no descansan tal cual son los comportamientos de los animales que producen trazas fósiles (Sarjeant, 1975; Klappa, 1980; Ekdale *et al.*, 1984). Sin embargo las raíces poseen actividad y signos de actividad a través del tiempo (Sarjeant, 1975). Las plantas producen intercambio de minerales, de nutrientes y de agua a través de sus raíces. A su vez el mismo

Cutanes o barnices



A- Cután de composición arcillosa “argillán”, la iluviación se produce a través de la grieta de los *slickensides*.

B- Cután de materia orgánica dentro de un mismo horizonte “A” de gran espesor, la iluviación se produce a través de un *slickensides*.

C- Argillán producido a través de las grietas de una raíz.

D- En flechas blancas se observan argillanes, conjuntamente con “manganes” (flechas negras), estos últimos precipitaron aprovechando las superficies de los *slickensides*.

E- En flechas blancas se distinguen cutanes de materia orgánica y en flechas negras se observan cutanes de óxidos de hierro “ferranes” y “ferriargillanes”, ambos iluviados en las grietas de *slickensides*.

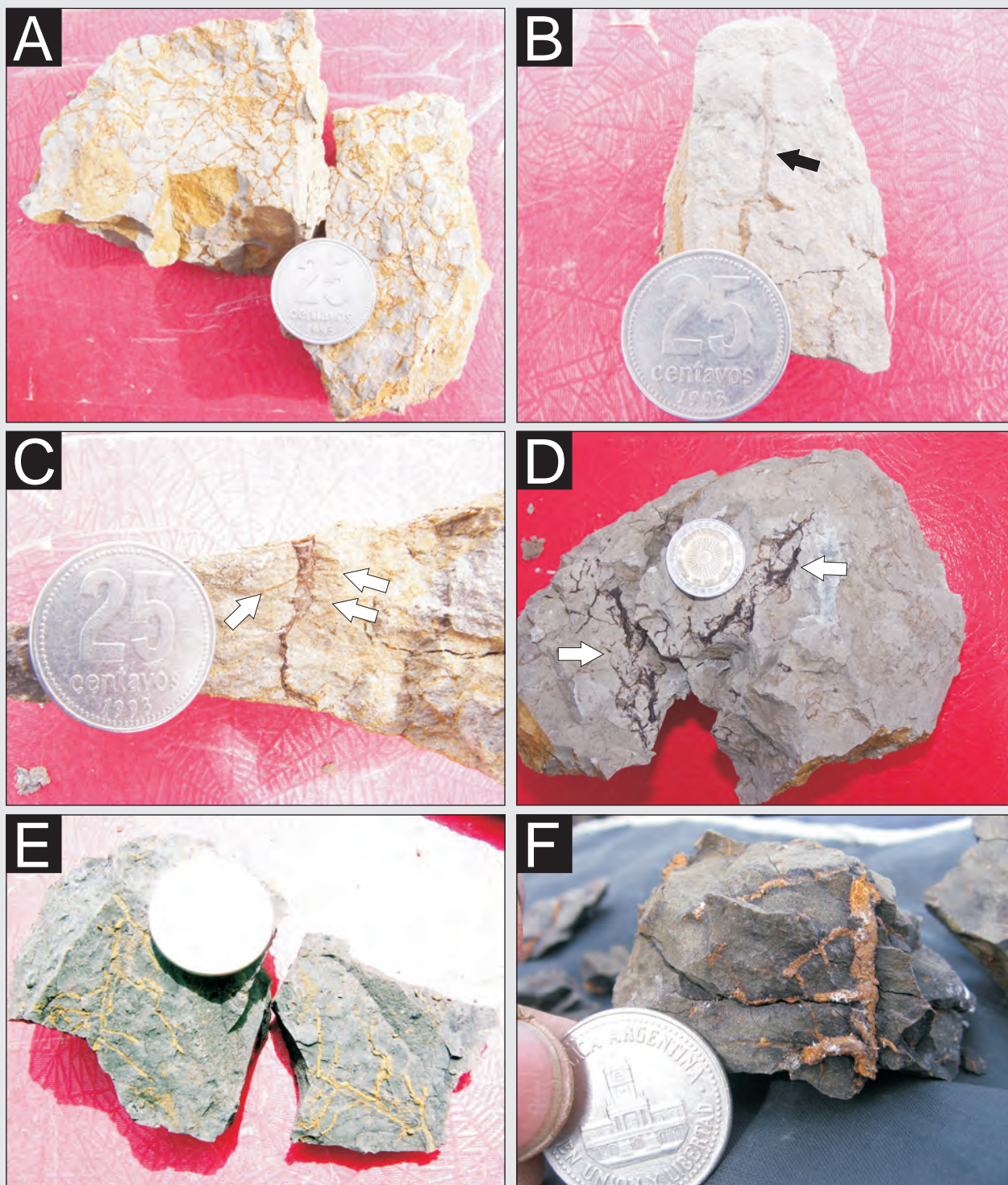
F- Ferranes cubriendo las superficies de un agregado de suelo anguloso (*angular blocky peds*).

crecimiento de las raíces genera cambios en el sustrato. En el presente trabajo se considera que los rizolitos son trazas fósiles, exceptuando cuando se preserva la materia orgánica completamente (es decir la raíz), y siguiendo los criterios de Ekdale *et al.* (1984) se los considera como una raíz fósil. Este criterio no es compartido por otros investigadores que consideran que con o sin preservación del organismo son trazas fósiles (Kraus y Hasiotis, 2006). Los rizolitos son el material original de las raíces reemplazado mineralógicamente o por impregnación mineralógica que preserva las características anatómicas de las raíces (Klappa, 1980). En este trabajo se utiliza el término **rizolito** siguiendo la terminología de Klappa (1980), para todas las trazas de raíces, exceptuando para aquellas que preservan la raíz carbonizada, denominándolas **raíces fósiles**. Según Klappa (1980), los **moldes de raíces** son raíces que fueron rellenas por sedimento diferente al de la matriz, y los **rizotúbulos** son cilindros cementados alrededor de los moldes de las raíces que se pueden rellenar luego con sedimento. Por su parte las **rizoconcreciones** son acumulaciones en forma de nódulos o concreciones alrededor de raíces vivas o muertas (Klappa, 1980). Por último se adopta el término **rizohalo** (Kraus y Hasiotis, 2006), para describir las zonas deprimidas en óxidos de hierro y manganeso alrededor de las raíces, aún cuando la raíz no esté preservada.

El desarrollo de raíces y rizolitos (moldes de raíces, rizotúbulos, rizoconcreciones y rizohalos) indica la presencia de una rizósfera, definida como el área adyacente al sistema radicular y que se extiende varios milímetros alrededor de las raíces. La rizósfera es la zona donde se produce la interacción entre las raíces, el suelo y los microorganismos (Brady y Weil, 1999, Kraus y Hasiotis, 2006). Las raíces y los microorganismos producen compuestos orgánicos que afectan al hierro y al manganeso en los alrededores de las raíces (Schwertmann y Taylor, 1989), razón por la cual, muchos rizolitos están caracterizados por la presencia de óxidos de hierro y manganeso. A su vez las raíces producen, a través de su crecimiento, canales y grietas que son los conductos de transferencia de agua y de los materiales del suelo. De esta manera las raíces y rizolitos proveen información importante de cómo fue el régimen hidrológico del suelo fósil (Kraus y Hasiotis, 2006). La Formación Mata Amarilla posee una gran variedad de raíces y trazas de raíces fósiles las cuales se describen a continuación:

Rizolitos amarillentos: Son muy abundantes a lo largo de toda la Formación Mata Amarilla (Lámina 5.6 A). Los colores amarillentos- amarronados, según los

Rizolitos



A- Rizolitos amarillentos-amarronados compuestos de óxidos de hierro (gohetita). La gohetita se acumula en las raíces debido a que en ese lugar las condiciones son más oxidantes. **B-** Rizolitos de tipo "pivotantes" de color gris verdoso, se forman en suelos saturados con escasez de oxígeno producto de anegamientos superficiales. **C y D-** Rizoconcreciones de color gris verdoso y gris verdoso oscuro, el anegamiento superficial intenso reduce el contenido de oxígeno, debido a que muere la vegetación y los microorganismos utilizan el $\text{Fe}+3$ para degradar la materia orgánica y lo precipitan como $\text{Fe}+2$ en las oquedades de las raíces rellenándolas y generando las rizoconcreciones. **E y F-** Rizoconcreciones de raíces pivotantes de diferentes características tanto largas y delgadas como gruesas, son de color naranja fuerte (10 YR 8/6) y están compuestas de jarosita, estas rizoconcreciones caracterizan suelos muy pobremente drenados de áreas costeras y estuarios, se los denomina "suelos con potencial de sulfato ácido".

estudios de DRX, indican que el óxido de hierro es goethita, la cual es preponderante sobre la hematita. Esto sugiere una formación en suelos con alto contenido de materia orgánica (Kampf y Schwertmann, 1982; Schwertmann y Taylor, 1989; Kraus y Hasiotis, 2006). La goethita tiende a generarse en suelos que se mantienen húmedos o saturados durante largos períodos (Kraus y Hasiotis, 2006), y se acumula en las raíces debido a que en ese lugar las condiciones son más oxidantes. El crecimiento de las plantas genera una penetración de las raíces en la matriz del suelo, lo cual produce canales o grietas, que permiten la entrada de aire creando zonas de oxidación muy locales. Los rizolitos amarillentos a amarronados son generalmente asociados a zonas pantanosas (*marshes*), donde la vegetación es hidrófila y las plantas transportan oxígeno al sedimento a través de un tejido especializado para dicha tarea, denominado aerénquima (Sundby *et al.*, 2003).

Rizolitos grises a verdosos: Se encuentran a lo largo de toda la Formación ya sea como moldes de raíces, rizotúbulos o como rizoconcreciones (Lámina 5.6 B, C y D). Poseen dimensiones de entre 10 y 60 cm de largo. Están caracterizados por raíces de tipo pivotantes con un eje principal del cual irradian rizolitos adventicios o laterales. Estos colores asociados a trazas de raíces son un rasgo redoximórfico presente en muchos suelos actuales y son una respuesta a fluctuaciones en el grado de saturación (Vepraskas, 1994). Estos rizolitos se forman en suelos saturados en agua con escasez de oxígeno, en donde el hierro es reducido y removilizado de la matriz del suelo (Duchaufour, 1982; Fanning y Fanning, 1989). La reducción del hierro se da en las zonas adyacentes a las raíces, especialmente si las condiciones de anegamiento o gleización son debidas a aguas superficiales (Kraus y Hasiotis, 2006). El anegamiento superficial intenso reduce el contenido de oxígeno, debido a que muere la vegetación y los microorganismos utilizan el Fe^{+3} para degradar la materia orgánica y lo precipitan como Fe^{+2} (Schwertmann y Taylor, 1989). Este proceso se puede dar directamente sobre la superficie de las raíces generando los rizolitos o en la superficie del suelo encharcado. En este último caso la continua reducción incrementa la concentración del Fe^{+2} el cual es precipitado en las oquedades de las raíces rellenándolas y generando las rizoconcreciones.

Rizolitos de Jarosita: éstos se dan en su mayoría en forma de rizoconcreciones, se encuentran en la sección inferior y superior de la Formación Mata Amarilla. Son de color naranja fuerte (10 YR 8/6) y generalmente se encuentran asociadas a intensos moteados de jarosita (Lámina 5.2 E y F). Se

caracterizan por ser de raíces pivotantes de diferentes características tanto largas y delgadas (Lámina 5.6 E) como cortas y gruesas (Lámina 5.6 F). Fueron analizados a través de DRX y en secciones delgadas y son de composición jarosítica, con menores cantidades de sulfuros nativos. La jarosita se forma a partir de la pirita cuando las condiciones de drenaje mejoran, produciendo condiciones oxidantes y la subsiguiente acidez del suelo (Van Breeman, 1975; Miedema *et al.*, 1986; Kraus, 1998). Varios autores han reportado asociaciones de pirita y jarosita en raíces de suelos actuales (Carson *et al.*, 1982; Bush y Sullivan, 1999). Por su parte Hsieh y Yang (1997) descubrieron que la acumulación de la pirita está fuertemente influenciada por la distribución de las raíces. Rizolitos con jarosita y pirita han sido descritos para paleosuelos muy pobremente drenados y con gran preservación de materia orgánica (McSweeney y Fastovsky, 1987; Bockelie, 1994; Kraus, 1998), lo cual está en concordancia con los paleosuelos con jarosita de la Formación Mata Amarilla. La presencia de jarosita confirma que el suelo estuvo inundado o anegado durante casi todo el año, causando condiciones de permanente reducción, con preservación de la materia orgánica, reducción del hierro y precipitación de pirita. Pero es necesario tener un medio con abundante concentración de sulfatos para producir la precipitación de la pirita, es por ello que este tipo de suelos muy pobremente drenados es característico de áreas costeras y estuarios (Van Breeman, 1973; Miedema *et al.*, 1974).

Raíces fósiles (preservadas como material carbonoso): Las raíces fósiles están caracterizadas por la coloración oscura del material carbonoso y generalmente preservan en forma excepcional todas las características de la raíz (Lámina 5.7 A y B). En ocasiones se puede observar los rizoides o raíces laterales de hasta tercer y cuarto orden con claridad (Lámina 5.7 B). La preservación de materia orgánica es controlada o por un rápido enterramiento o por condiciones anóxicas (McCabe y Parrish, 1992). Como las raíces siempre se encuentran debajo de la superficie del suelo, la clave para la preservación de las raíces es el ambiente anóxico resultante de un nivel freático elevado. Generalmente todos los ejemplos de raíces fósiles carbonosas están asociadas a paleosuelos hidromórficos (McSweeney y Fastovsky, 1987; McCarthy *et al.*, 1998).

Rizoconcreciones de manganeso: Las concreciones de óxido de manganeso son muy notorias en afloramiento; poseen formas esféricas a cilíndricas con diámetros promedios de entre 20 a 60 cm y en ocasiones superan los 60 cm (Lámina

Rizolitos y raíces



6.2.8- Trazas fósiles (excavaciones)



A y B- Las raíces fósiles están caracterizadas por la coloración oscura del material carbonoso, suelen preservar en forma excepcional todas las características de la raíz, esta preservación es producida por el ambiente anóxico resultante de un nivel freático elevado. **C-** En flechas blancas se distinguen dos rizoconcretiones de óxido de manganeso, las cuales han sido atribuidas a sistemas radiculares o tocones de árboles *in situ* (Kraus y Hasiotis, 2006). Son de suelos con condiciones de drenaje muy pobres. **D-** Árbol petrificado en posición de vida del bosque petrificado "María Elena", asociado a suelos de gran desarrollo. **E-** Traza de Cf. *Cylindricum* isp., tubo vertical levemente sinuoso de pared lisas y de sección circular. **F-** Traza en forma de prisma, asociada a excavaciones de *Crayfish* (Decapoda: Cambaridae).

5.7 C). El color y el análisis composicional es consistente con una mezcla de óxidos de goethita y de manganeso (principalmente pirolusita) (Kraus, 1999; Kraus y Hasiotis, 2006). Las concreciones de color negro son mucho más ricas en manganeso, mientras que las concreciones de color marrón son más ricas en hierro (Zhang y Karathanasis, 1997). Estas concreciones han sido atribuidas a sistemas radiculares o tocones de árboles *in situ* (Kraus y Hasiotis, 2006). Las acumulaciones de manganeso son características de los suelos con matriz de tonos bajos (gris-verdosos), y generalmente se las asocia a condiciones de drenaje muy pobres con períodos alternantes de reducción y oxidación (Retallack, 2001; Birnie y Paterson 1991; Stiles *et al.*, 2001; Kraus y Hasiotis, 2006).

Árboles *in situ* y pseudotransportados: Los troncos fósiles permeabilizados por soluciones silicatadas se encuentran a lo largo de toda la Formación Mata Amarilla, así como también los hay en Formaciones infra y suprayacentes (Piedra Clavada y La Anita). Sin embargo se da una gran abundancia de troncos pseudotransportados y en posición de vida, en el contacto entre la sección inferior y la media de la Formación Mata Amarilla. Este bosque se denominó “bosque petrificado María Elena” (Zamuner *et al.*, 2004; 2006; Varela *et al.*, 2006). Las raíces de los árboles *in situ* y pseudotransportados poseen adaptaciones características para anclajes en zonas vadosas o anegadas (Lámina 5.7 D). Este rasgo consiste en el crecimiento horizontal de las raíces debido a que el crecimiento vertical se encuentra impedido por la presencia de arcillas expansivas, las cuales a través de los sucesivos periodos de expansión / contracción generan el estrangulamiento de las raíces (Varela *et al.*, 2006). En la sección 5-5 y 5-6 se amplían las descripciones del nivel de paleosuelos de gran espesor (desarrollo) asociados al bosque petrificado “María Elena”.

5.2.8- Trazas (excavaciones)

Las trazas fósiles en los paleosuelos de la Formación Mata Amarilla, son escasas, esto puede deberse a varias razones: 1- A que los ambientes no sean apropiados para la vida de organismos excavadores (sesgo biológico). 2- A que los ambientes no permiten una conservación abundante (sesgo tafonómico). 3- A inexperiencia del observador para distinguirlas (sesgo del observador).

De todas maneras se pudieron distinguir dos tipos de trazas fósiles características que se describen a continuación:

Cf. *Cylindricum* isp.: Es una traza vertical a pseudovertical, recta a sinuosa, la cual no posee ramificaciones, las paredes son lisas a levemente rugosas y en corte transversal posee una sección circular. Estas excavaciones poseen largos de 2,5 cm hasta 8 cm y la sección posee en promedio 0,5 cm de diámetro. El material de relleno es arenoso a limoso y caracteriza a horizontes de paleosuelos arcillosos de tipo “A” y “B” (Lámina 5.7 E). La ausencia de morfologías diagnósticas dificulta la asignación de este tipo de excavación a alguna icnoespecie dentro del icnogénero *Cylindricum* isp. Su orientación y preservación sugiere que las trazas se encontrarían por encima del nivel freático (Hasiotis, 2002), lo cual va en concordancia con su leve coloración amarillenta. *Cylindricum* es similar a las trazas producidas en las planicies de inundación actuales por organismos excavadores como coleópteros, abejas y avispas (*Hymenoptera*), ninfas de cicada (*Hemiptera*), arañas (*Arachnida: Araneae*), y moluscos (Bown y Kraus 1983; Hasiotis, 2002; Smith *et al.*, 2008).

Trazas en forma de prismas asociadas a cangrejos de agua dulce (*crayfish*): Esta trazas con forma de prisma son predominantemente verticales, son rectas a sinuosas, en corte transversal poseen secciones subcilíndricas con bordes redondeados a rectos. Los diámetros son de 1 cm en promedio y longitudes de hasta 10 cm. Hay moteados y rizoconcreciones que se le sobreimprimen y atraviesan la traza continuando dentro de la matriz (Lámina 5.7 F). Son de colores amarillentos indicando condiciones de oxidación, se encuentran generalmente en horizontes superficiales “A” y “B” con características de colores gley. Smith *et al.* (2008) interpretaron este tipo de trazas con forma de prismas como excavaciones de cangrejos de agua dulce o *Crayfish* (Decapoda: Cambaridae). Las paredes de las trazas de *crayfish* generalmente preservan impresiones de partes del cuerpo de los cangrejos o marcas asociadas a comportamiento como marcas de rasguídos, raspaduras, estriaciones y texturas nodosas (Hasiotis y Mitchell, 1993). Trazas fósiles con esas marcas son asignadas al icnogénero *Camborygma* y se diferencian icnoespecies sobre la base de las arquitecturas de las trazas (Hasiotis y Mitchell, 1993).

***Camborygma litonomos*:** La ausencia de estructuras diagnósticas en la mayoría de las trazas de cangrejos de agua dulce o *crayfish* de la Formación Mata Amarilla, no permite asignarle ningún icnogénero o icnoespecie. Sin embargo si se

siguen los criterios de Smith *et al.*, (2008), deberían clasificarse como *Camborygma litonomos* debido a que se encuentran pedogenéticamente modificadas. La preservación excepcional de una traza de cangrejo de agua dulce o *crayfish* la cual se asignó a la icnoespecie de *Camborygma litonomos* en la localidad 8- Bajada de los Orientales (Lámina 5.8) podría indicar que el resto de las trazas de cangrejos de agua dulce correspondería a la misma icnoespecie, la cual es característica de zonas con niveles freáticos someros (Hasiotis y Honey, 2000; ver lámina 5.8). Esto es a su vez reforzado con los demás rasgos edáficos que sugieren un nivel freático elevado.

5.2.9- Agregados de suelo (*peds*)

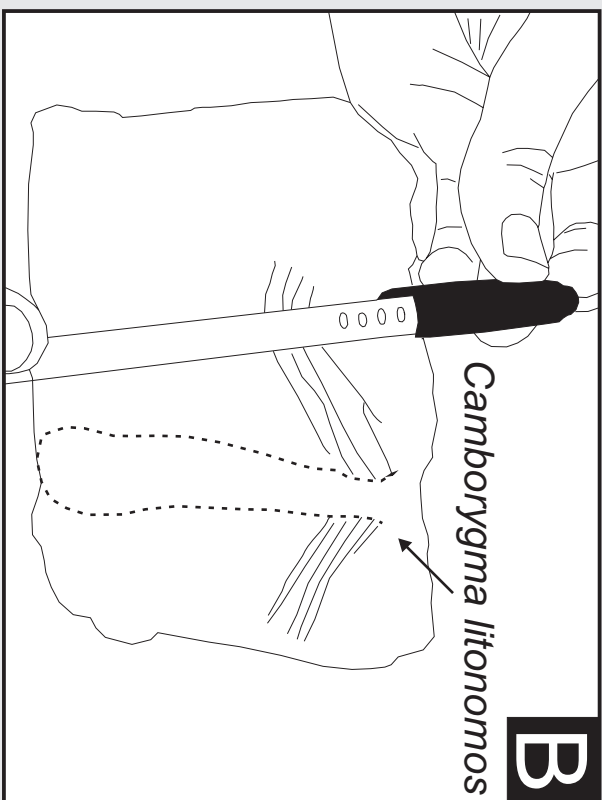
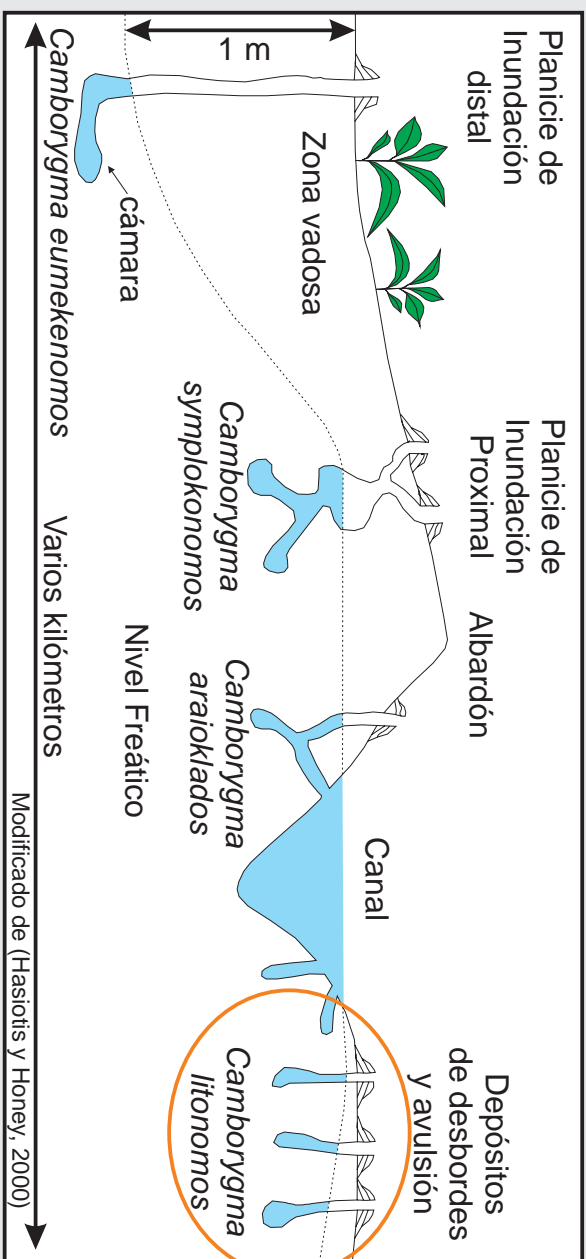
La estructura de un suelo hace referencia a la constitución física del material, manifestada por el tamaño, forma y ordenamiento de las partículas sólidas y los espacios vacíos. La estructura consiste no solamente en la agregación de las partículas primarias en individuos compuestos, sino también en la agregación de éstos en individuos mayores. Todos estos individuos compuestos son unidades naturales y se los denomina agregados de suelo o *peds*. Los agregados de suelo se forman debido a la acción de los procesos pedogenéticos. Esos agregados se separan unos de otros por grietas, cuevas, raíces y otras aberturas del suelo. Pueden ser desagregados fácilmente con la mano si la roca no se encuentra muy litificada (Retallack, 2001). La compactación y las alteraciones posdeposicionales pueden enmascarar a los agregados haciendo dificultoso su reconocimiento. Los agregados de suelo son clasificados de acuerdo a su tamaño, angulosidad y forma (Lámina 5.9). A continuación se describen los principales agregados de suelo o *peds* de los paleosuelos de la Formación Mata Amarilla.

Los agregados de suelos **planares** son de poco espesor pero de gran superficie. Generalmente se forman por rotura de una laminación relíctica en suelos de pobre desarrollo. En ocasiones se desarrollan por lavado y eluviación de materiales de suelo, y caracterizan a los horizontes de tipo “E”.

Los agregados **prismáticos** y **columnares** poseen forma de prismas, con sus dos dimensiones horizontales limitadas y considerablemente menores que la vertical. Son partículas agregadas alrededor de un eje vertical, en donde los columnares se diferencian de los prismáticos porque poseen una cabeza superior redondeada (Lámina 5.9 A). Estos se forman en suelos arcillosos y caracterizan a los horizontes de tipo “B”.

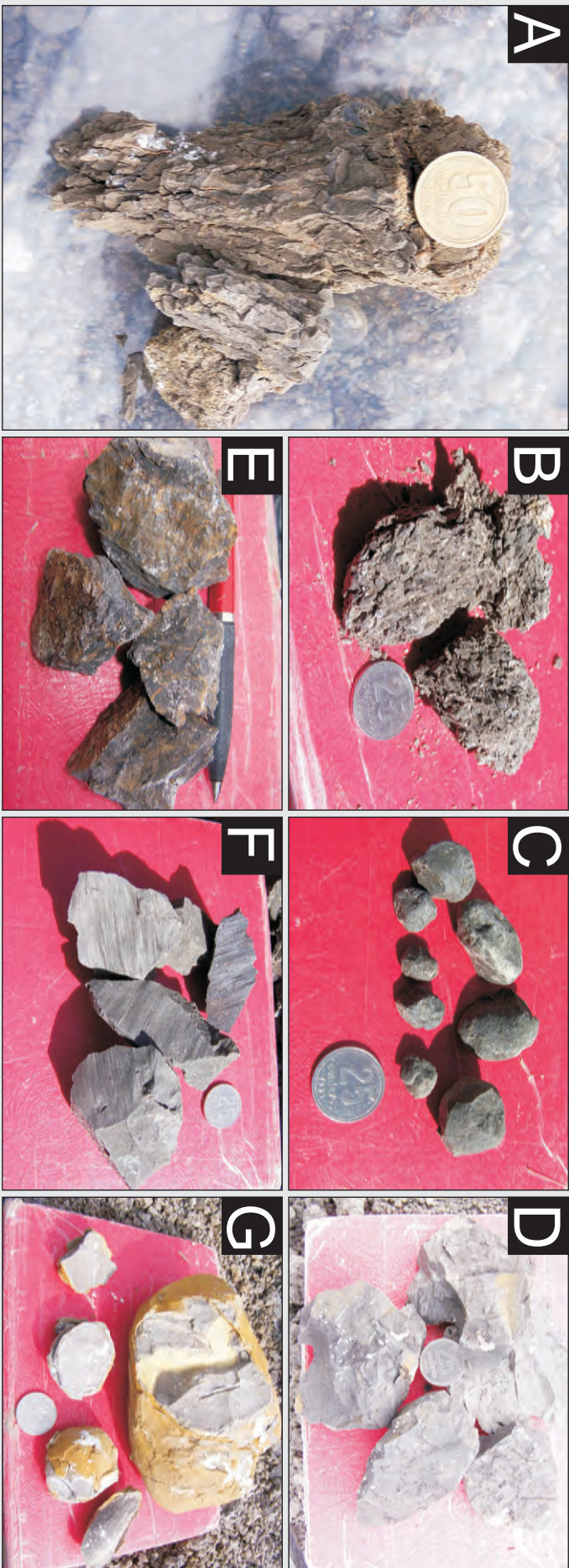
Trazas de cangrejos de agua dulce o Crayfish (*Camborygma litonomos*)

Arquitecturas morfológicas de diferentes icnoespecies de *Camborygma* con respecto a la posición de la planicie de inundación y a la profundidad del nivel freático. Modificado de (Hasiotis y Honey, 2000)



Agregados de suelo (peds)

Lámina 5.9



A- Columnares: poseen forma de prismas, con sus dos dimensiones horizontales limitadas y considerablemente menores que la vertical. Son partículas agregadas alrededor de un eje vertical, se diferencian de los prismáticos debido a que los columnares poseen una cabeza superior redondeada. **B-** Migajosos: son poliedros regulares a esferoides de pequeño tamaño, tienen superficies planas a curvas sin acomodación con los agregados vecinos y poseen mucha porosidad (la cual generalmente es obliterada por arcilla), caracterizan a los horizontes "A". **C-** Granular o Bloques Subredondeados: son poliedros regulares a esferoides con superficies curvas a planas que tienen muy poca o ninguna acomodación a la forma de los agregados vecinos. Generalmente caracterizan a los horizontes superiores del suelo ("A" y "B"). **D, E y F-** Angulosos y Subangulosos: son de forma irregular y no siempre equidimensional. Poseen aristas angulosas, las cuales debido a la litificación muchas veces pueden ser cortantes, generalmente caracterizan a horizontes superficiales y subsuperficiales ("A" y "B") de suelos con arcillas de tipo esmectíticas y están asociados frecuentemente a las superficies de cizallamiento (slickensides), D y E son agregados subangulosos y F angulosos. **G-** Bochones: son agregados regulares a esferoides de gran tamaño, generalmente caracterizan a los horizontes inferiores de suelo "C" y "B/C" generalmente no poseen ninguna acomodación a la forma de los agregados vecinos. **H-** Agregados de suelos preservados como intraclastos pelíticos dentro de las facies de canales fluviales. Esto es debido a que cuando el suelo es erosionado por un agente fluvial, el mismo se va a desagregar naturalmente en los agregados de suelo. Estos poseen una mayor consistencia producto de las precipitaciones de arcilla y óxidos que recubren las paredes, así como también como consecuencia de la generación de concreciones.

Los agregados **angulosos** y **subangulosos** son de forma irregular y no siempre equidimensional. Poseen aristas angulosas, las cuales debido a la litificación muchas veces pueden ser cortantes. Generalmente caracterizan a horizontes superficiales y subsuperficiales (“A” y “B”) de suelos con arcillas de tipo esmectíticas y están asociados frecuentemente a las superficies de cizallamiento (*slickensides*) (Lámina 5.9 D, E y F).

Estructura **granular** o **bloques subredondeados** son poliedros regulares a esferoides con superficies curvas a planas que tienen muy poca o ninguna acomodación a la forma de los agregados vecinos. Caracterizan a las porciones más superiores del suelo, como el horizonte de tipo “A” y ocasionalmente en horizontes de tipo “B” (Lámina 5.9 C).

La estructura **migajosa** se encuentra formada por poliedros regulares a esferoides de pequeño tamaño, de superficies planas a curvas sin acomodación con los agregados vecinos y poseen mucha porosidad (la cual generalmente es obliterada por arcilla, lámina 5.9 B). Estos agregados migajosos son típicos de los horizontes de tipo “A”.

Estructura en forma de **bochones** son agregados regulares a esferoides de gran tamaño, y caracterizan a los horizontes inferiores de suelo “C” y “B/C”. Generalmente no poseen ninguna acomodación a la forma de los agregados vecinos (Lámina 5.9 G).

En ocasiones los agregados de suelos son preservados como intraclastos pelíticos dentro de las facies de canales fluviales. Debido a que cuando el suelo es erosionado por un agente sedimentario, en este caso fluvial, el mismo se va a desagregar naturalmente en los agregados de suelo, ya que los agregados de suelo poseen una mayor consistencia producto de las precipitaciones de arcilla y óxidos que recubren las paredes de los mismos, así como también como consecuencia de la generación de concreciones (Lámina 5.9 H).

5.3- Micromorfología de Paleosuelos

El estudio micromorfológico de los paleosuelos estuvo orientado a incrementar el conocimiento de los procesos formadores del suelo a una escala microscópica. Para el análisis de los paleosuelos en secciones delgadas se siguieron

los criterios de Bullock *et al.* (1985) y Stoops (2001). A continuación se describen los principales rasgo micromorfológicos.

Rizolitos y raíces: Son los rasgos más abundantes dentro de los cortes de los paleosuelos de la Formación Mata Amarilla, generalmente se disponen como microfracturas verticales rellenas de arcilla (Lámina 5.10 A y B). En ocasiones las arcillas que recubren o tapizan las paredes presentan láminas o pulsos de depositación, es decir cutanes de arcilla o “argillanes” (Lámina 5.10 E). Los rizolitos generalmente se acuñan hacia abajo, indicando que las raíces más frecuentes son de tipo pivotantes (Lámina 5.10 C). En ocasiones, junto con la arcilla que tapiza las paredes, hay restos de material carbonoso o incluso la raíz completamente preservada (Lámina 5.10 C y F). Por su parte, con frecuencia se observan trazas de raíz las cuales poseen un centro hueco, caracterizadas por la generación de un halo o rizoconcreción de materia orgánica y óxidos de hierro y manganeso (Lámina 5.10 D).

Restos de tejidos vegetales: Los restos de materia orgánica diseminada son muy frecuentes en todos los cortes de la formación, los cuales poseen formas equidimensionales a alargadas, son de color oscuro a negro con y sin nicoles cruzados (Lámina 5.11 A, B y C). En ocasiones se distinguen fragmentos de tejidos carbonizados en los que se aprecian hasta las paredes celulares (Láminas 5.11 C).

Microestructuras o microagregados: En algunos cortes fue posible la distinción de microbloques o microagregados de suelo subredondeados a angulares, con un grado de pedalidad que va desde moderado a leve y con contactos entre los agregados que varían desde regulares a irregulares (Lámina 5.11 D). Como se puede observar en las microfotografías, este desarrollo de pedalidad genera una porosidad secundaria. En otras ocasiones, los horizontes superficiales de suelo poseen microagregados con estructuras de tipo migajosa o *crumbs*, los cuales poseen un desarrollo moderado a fuerte de la pedalidad (Lámina 5.11 E y F).

Microlickensides: Cuando hay una orientación preferencial de los clastos de la matriz y del *coating* argílico que rodea a los clastos, éstos se encuentran orientados a ángulos opuestos de 90 grados y las arcillas de alta luminiscencia se disponen alrededor de los clastos formando *microlickensides*. Esto es debido a los procesos de expansión y contracción de las arcillas esmectíticas (Lámina 5.12 A y B), que caracterizan a los horizontes “Bss”.

Rizolitos y raíces en cortes delgados

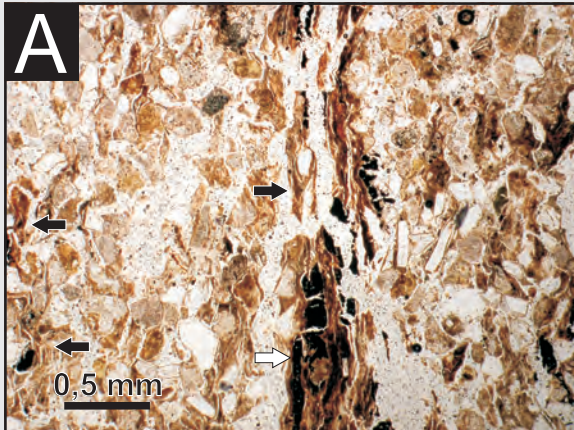
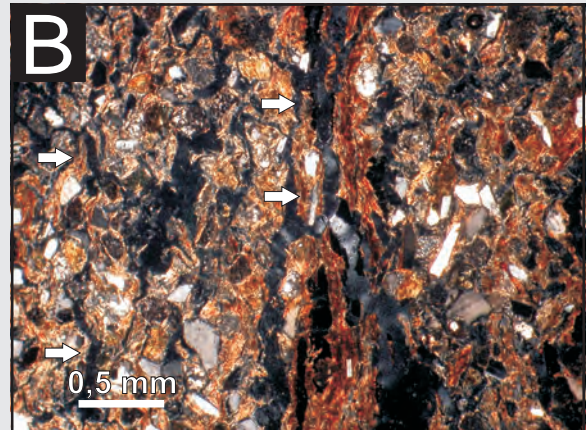


Foto sin nicoles de rizolito con raíz parcialmente conservada (flecha blanca), en flechas negras, se observa la presencia de “cutanes” de arcilla que tapizan las paredes del rizolito.



Idem A- con nicoles cruzados, se observa la disposición vertical de la arcilla en todos los rizolitos del corte delgado (flechas blancas).

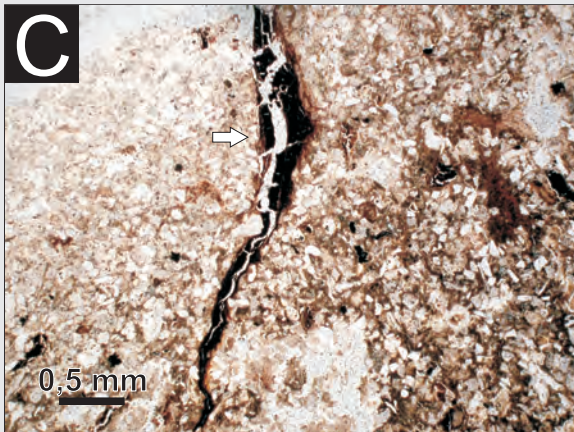


Foto sin analizador de raíz preservada como material carbonoso, se observa cómo va disminuyendo su espesor hacia abajo del corte (raíz de tipo pivotante)

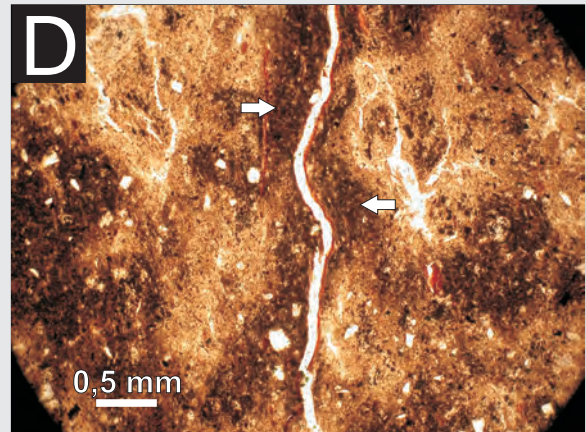


Foto sin nicoles, se observa una traza de raíz hueca en el centro, la cual genera una halo o rizoconcreción de materia orgánica y óxidos de hierro y manganeso (flechas blancas).

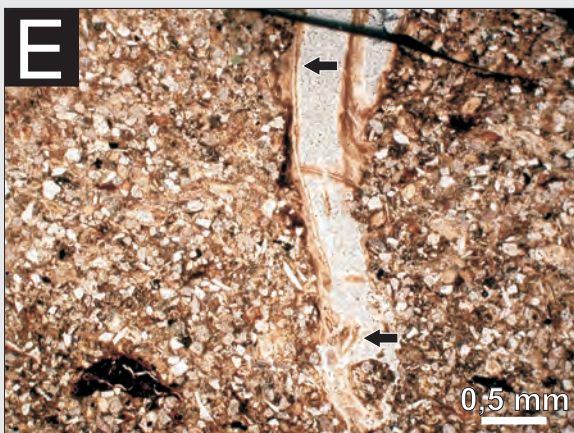
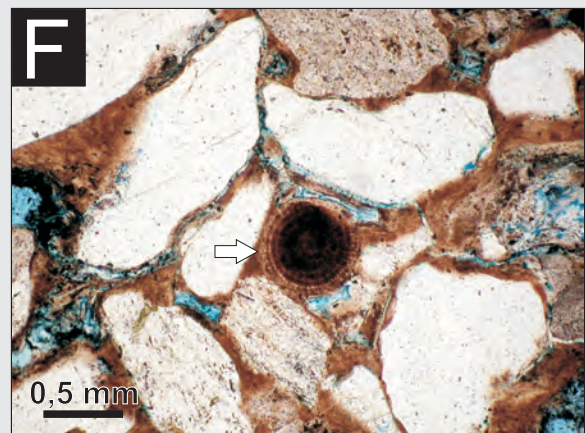


Foto sin nicoles, donde se ve un rizolito con sus paredes tapizadas por cutanes “argillanes” depositados en varios pulsos en flechas negras.



En esta fotografía sin nicoles se observa el corte transversal de una raíz perfectamente conservada, se distinguen todos los tejidos radiculares (flecha blanca).

Restos de tejidos vegetales / Microagregados

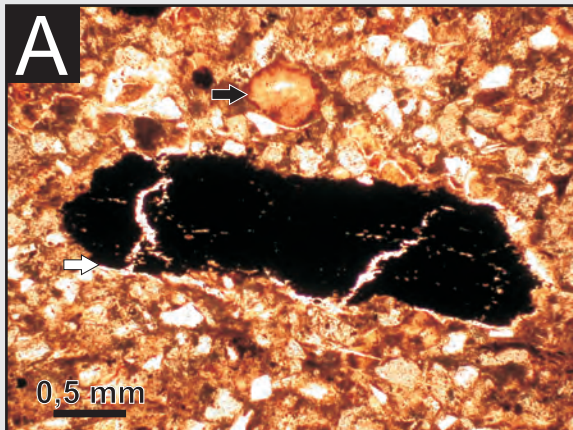
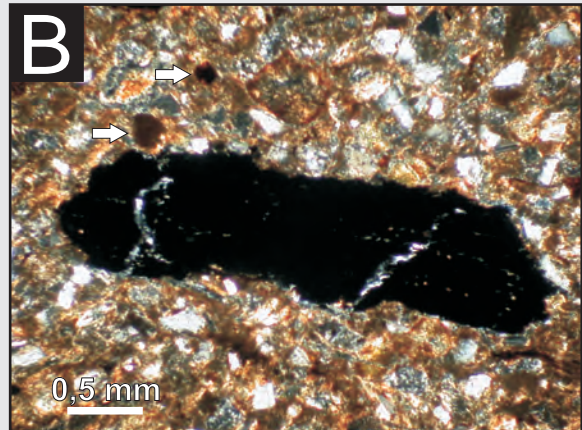


Foto sin nicoles de un resto vegetal que se encuentra fracturado (flecha blanca). La flecha negra marca un rizolito relleno de arcilla.



Idem A- con nicoles cruzados, en flechas blancas se observan fragmentos más pequeños que ya fueron incorporados a la matriz del paleosuelo.

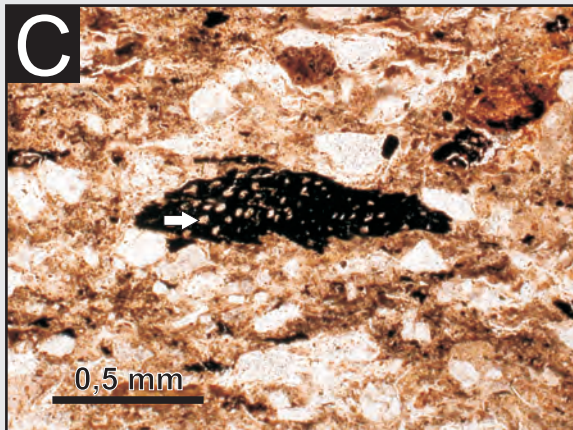


Foto sin analizador de un fragmento vegetal en el cual se pueden distinguir incluso hasta las células vegetales formando el tejido (flecha blanca).

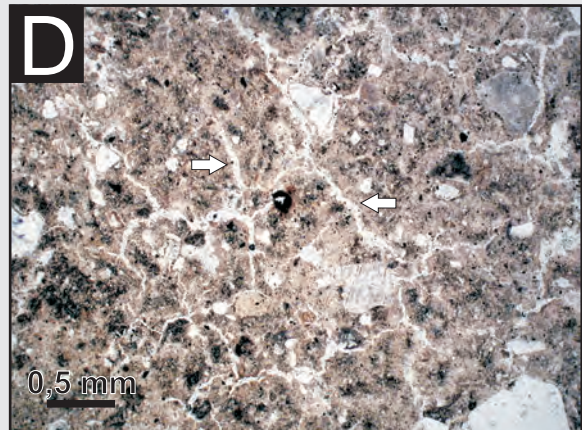


Foto sin nicoles, de microagregados subredondeados a angulares con un grado de pedalidad moderado a leve y de contactos regulares a irregulares (flechas blancas).

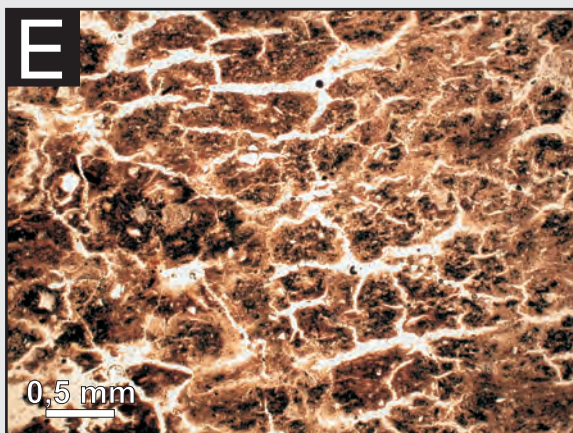
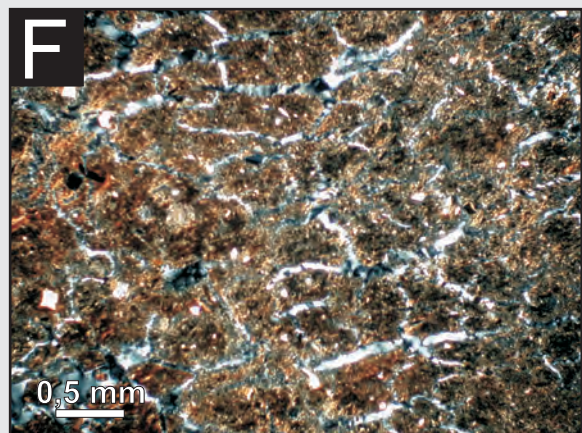


Foto sin nicoles, donde se observan microagregados de suelo con estructuras de tipo migajosa o *crumbs*, poseen un moderado a fuerte desarrollo de pedalidad.



Idem fotografía E-, pero con nicoles cruzados se distingue la forma regular de los contactos entre los agregados de suelo.

Microslickensides / Cutanes de arcilla y *coatings* argílicos

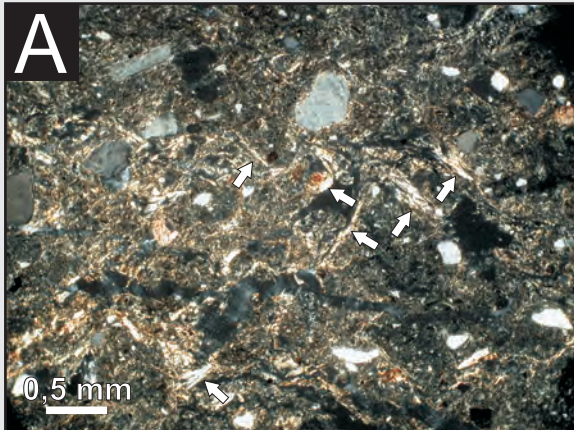


Foto con nicoles de *microslickensides*. En flechas blancas se observan las dos orientaciones preferenciales de la arcilla iluvial. Corresponde a un horizonte "Bss".

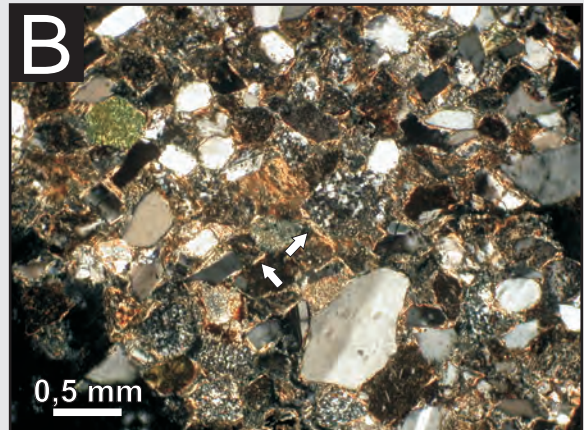


Foto con nicoles de *microslickensides* en la que se observa que son más espesos que los de la foto A, los clastos se encuentran orientados según sus ejes mayores (horizonte "Bss").

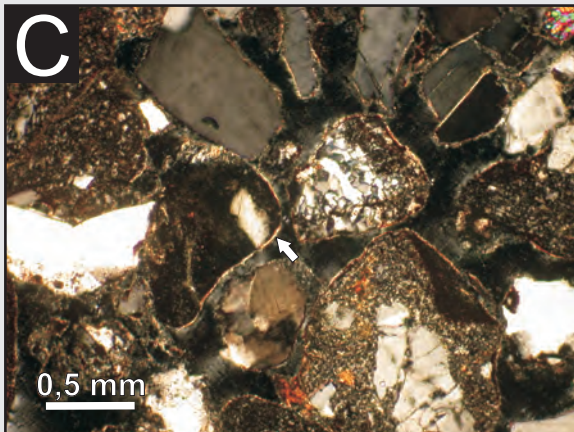


Foto con nicoles, en la cual se observa un delgado *coating* argílico de alta luminosidad, el cual preserva la porosidad primaria.

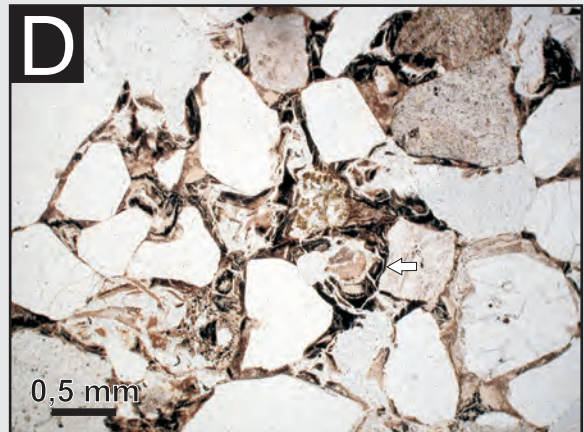


Foto sin nicoles, de cutanes de arcilla y materia orgánica (flecha blanca), en los cuales se observan los diferentes pulsos de iluvación alrededor de una traza de raíz. Corresponde a un horizonte "Bt".

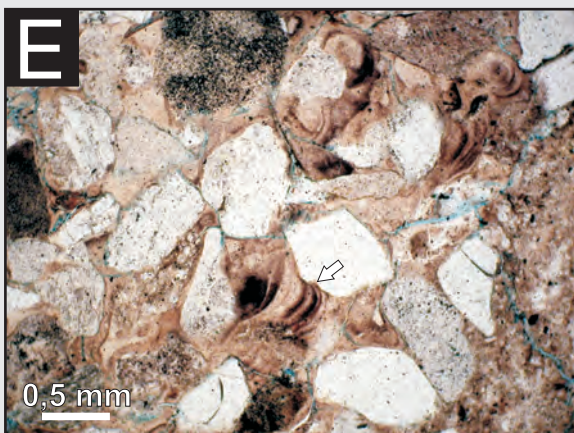
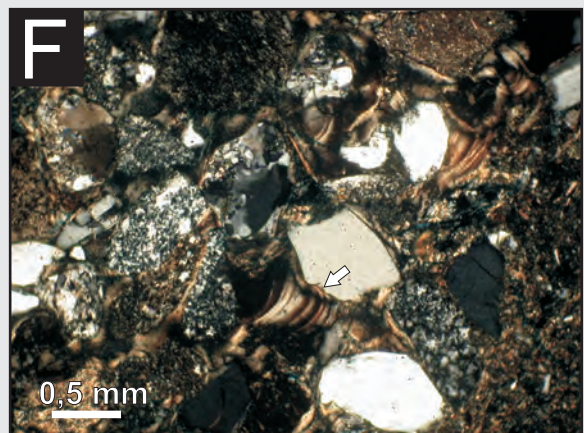


Foto sin nicoles, donde se observan cutanes de arcilla o "argillanes" depositados en múltiples pulsos de iluvación, son característicos de los horizontes "Bt" de Mata Amarilla.



Idem fotografía E-, pero con nicoles cruzados. Se distinguen los diferentes pulsos de iluvación manifestados por las diferentes luminiscencias de las arcillas.

Cutanes de arcilla y *coatings* argílicos: Los cutanes de arcilla o argillanes se presentan como un delgado *coating* argílico de fuerte color de birrefringencia (Lámina 5.12 C), que con el avance de los procesos edáficos pasan a generar capas sucesivas de arcilla iluvial. Estos cutanes de arcilla suelen formarse en las paredes de los huecos de las raíces, en ese caso se denominan cutanes típicos o *typic cutans*. Los cutanes de arcilla usualmente están acompañados de materia orgánica, lo cual les da una coloración más oscura (Lámina 5.12 D). Por otra parte, cuando los cutanes presentan formas asimétricas, representados por múltiples periodos de iluviación, se denominan cutanes crecientes o *crescent cutans* (Lámina 5.12 E y F). Menos frecuentemente, los cutanes se disponen en forma de costras o micropanes. Los cutanes de arcilla caracterizan a los horizontes iluviales de tipo “B” y si el proceso es muy avanzado llevan el sufijo “t”, es decir “Bt”.

Costras y micropanes: Generalmente están compuestos por óxidos de hierro y/o manganeso (Lámina 5.13 A), aunque menos frecuentemente también los hay de arcillas (Lámina 5.13 B). Las costras o micropanes caracterizan a suelos hidromórficos con niveles freáticos elevados (Retallack, 2001). Estas zonas de precipitación de óxidos de hierro y manganeso representan antiguos niveles freáticos, donde cambian abruptamente las condiciones de pH y Eh. En la lámina (5.13 A) se observa como hacia arriba de la costras hay una precipitación de venillas de óxido de hierro producto del efecto de capilaridad de los espacios porales del paleosuelo. Se encuentran en horizontes “Ag” “Bg” e incluso “Cg”. Si bien son diagnósticos no son muy comunes dentro de los paleosuelos de la Formación Mata Amarilla. Por su parte los micropanes de arcilla se encuentran en los horizontes superficiales “Ag” o “Bg”, los cuales generan encharcamientos superficiales debido a la reducción de la infiltración de aguas meteóricas.

Nódulos y concreciones: En su mayoría son nódulos de óxidos de hierro con formas típicas, que generalmente tienen un crecimiento ameboidal y alta pureza (Lámina 5.13 C, D y E), aunque a veces poseen composición mixta entre calcita y arcilla esmectítica. A medida que evoluciona el desarrollo comienzan a generar formas redondeadas (Lámina 5.13 D). Estos nódulos son de pequeño tamaño y se encuentran dispersos en toda la superficie del corte. Son rasgos redoximórficos típicos, los cuales reflejan cambios estacionales o periódicos. Durante las fases húmedas, el Fe y el Mn se reducen y se movilizan, y durante las fases de aireación se oxidan e inmovilizan, formando nódulos.

Costras y micropanes / Nódulos y concreciones

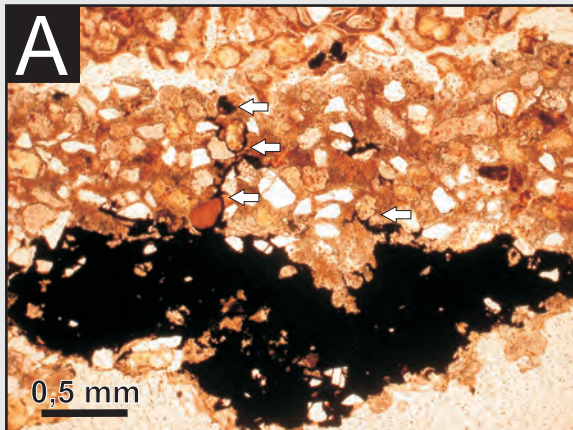


Foto sin nicoles de un micropan o costra de óxido de hierro y manganeso de color negro. Hacia arriba hay precipitación de óxidos en forma de venillas (flecha blanca).

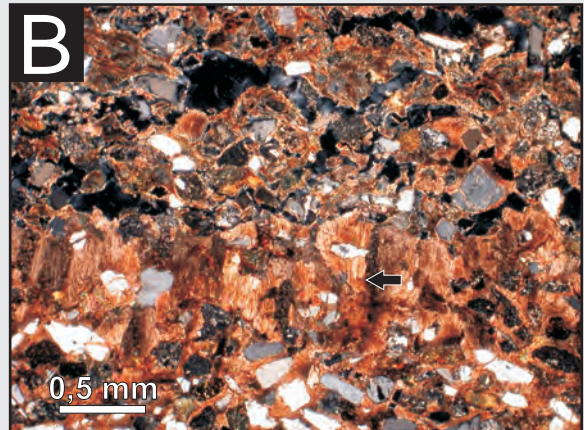


Foto con nicoles cruzados de un micropan de arcilla (flecha negra) el cual genera una barrera para la infiltración de agua hacia los horizontes inferiores. Horizontes "Ag" o "Bg".

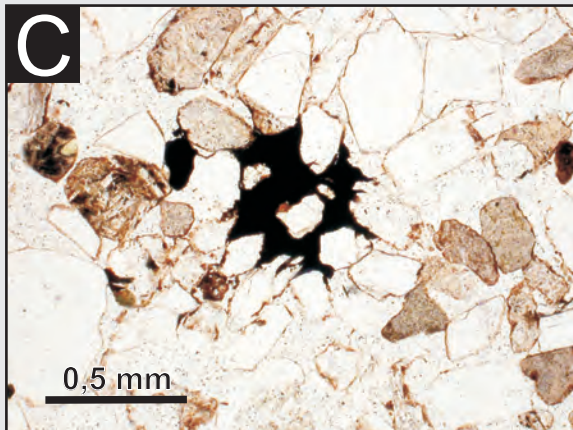


Foto sin analizador de nódulo de óxido de hierro y manganeso típico el cual engloba a los clastos. Se encuentra en un estadio intermedio de desarrollo.

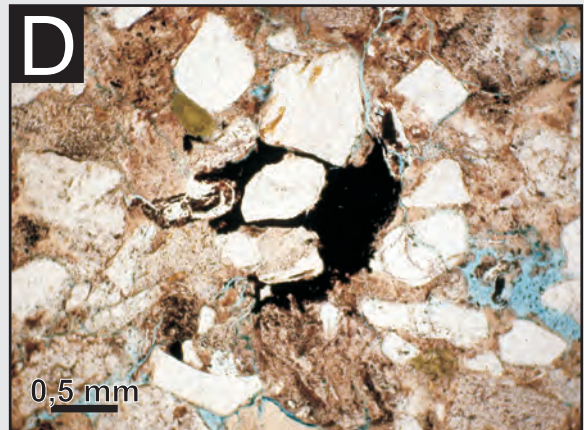


Foto sin nicoles, de un nódulo de hierro y manganeso en un estadio avanzado de desarrollo, es de forma subredondeada.

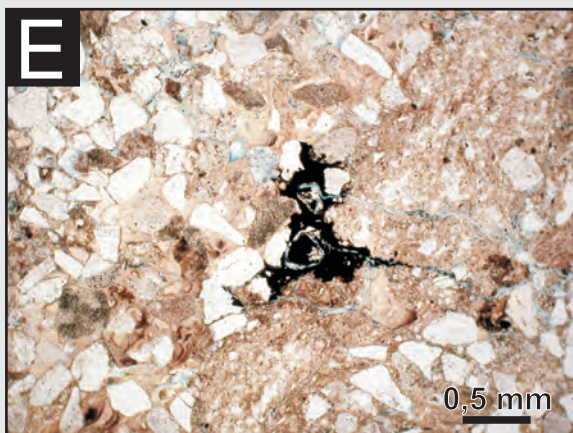


Foto sin nicoles, nódulo de óxido de hierro y manganeso incipiente, de crecimiento ameboidal. Al igual que los anteriores caracterizan a horizontes de tipo gley y llevan el sufijo "g".

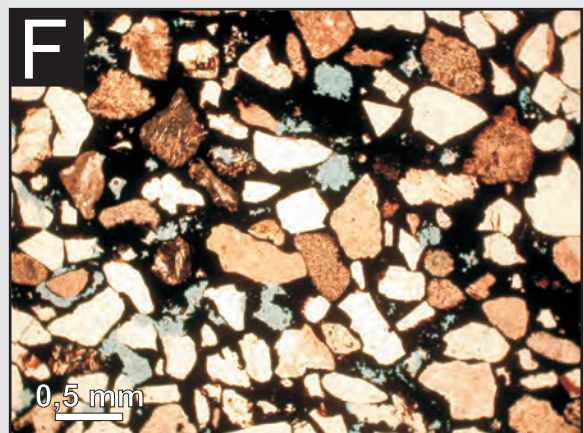


Foto sin nicoles de una concreción de óxido de manganeso, se observa una cementación casi completa del espacio poral.

Por su parte las concreciones de manganeso descritas en la sección 5.2.4, se presentan bajo el microscopio como una impregnación casi total del espacio poral, de un óxido amorfo de color gris oscuro a negro (Lámina 5.13 F). Los nódulos y las concreciones son rasgos redoximórficos y caracterizan a los horizontes de tipo gley los cuales llevan el sufijo “g”.

Cavidades y trazas fósiles: Son muy abundantes las cavidades o huecos “*voids*”, los cuales poseen formas subredondeadas a circulares y en ocasiones se unen unos a otros formando galerías (Lámina 5.14 A). Algunas de estas cavidades se encuentran rellenas por arcillas de alta luminiscencia (Lámina 5.14 B). Suelen ser zonas sujetas a la precipitación de fluidos, generando cementación de óxidos de hierro y manganeso (Lámina 5.14 C) o suelen ser zonas albitizadas es decir con eluviación de óxidos de hierro (Lámina 5.14 D). Son frecuentes las cavidades con formas canalizadas interconectadas, las cuales está tapizadas por materia orgánica (Lámina 5.14 E), que posiblemente sean bioturbaciones, atribuibles a vermes. Por último en la lámina 5.14 F hay una traza compuesta de una pequeña cavidad rellena de *pellets* circulares de materia orgánica. En esta fotografía puede observarse que la cavidad se encuentra compactada con forma ovoidal. El reducido diámetro, la asociación con galerías interconectadas de la misma escala (Lámina 5.14 E), la presencia de materia orgánica tapizando las paredes y el relleno de *pellets*, podría deberse a la actividad de un organismos tipo verme.

En general cuando la bioturbación es muy abundante se genera una sinmixis de la matriz del paleosuelo, esta sinmixis es una de las características micromorfológicas dominantes en toda la Formación Mata Amarilla (Lámina 5.14 B, C y D).

5.4- Clasificación de Paleosuelos

La primera pregunta que se podría formular es la siguiente: ¿Por qué y para qué clasificar a los paleosuelos? La respuesta es, en primer lugar para que todos los científicos puedan identificar fácilmente a qué tipo de suelos se hace referencia y en segundo lugar, y no con ello menos importante, para poder interpretar condiciones paleoclimáticas, paleotopográficas, paleohidrológicas, paleoambientales y paleobiológicas a partir de analogías con suelos actuales (principio de actualismo).

Cavidades y trazas fósiles

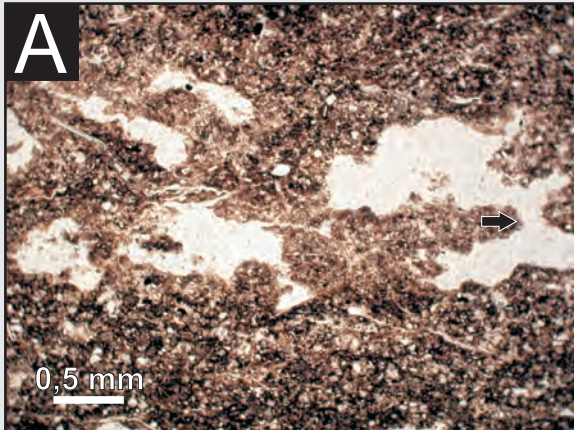


Foto sin nicoles de cavidades sin relleno, de forma irregular, las cuales parecen unirse unas con otras a través de pequeños canales (flecha negra).

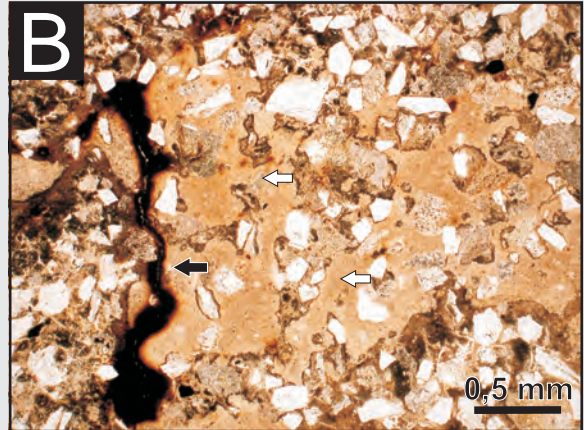


Foto sin nicoles de un cavidad rellena de arcilla de alta luminiscencia (en flecha blancas). En flecha negra se asocia una rizoconcreción de óxido de hierro.

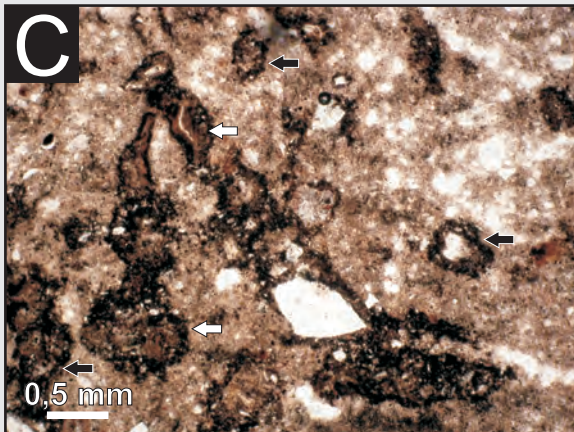


Foto sin analizador de cavidades y canales los cuales se unen formando galerías, hay tanto cortes longitudinales (flechas blancas), como transversales (flechas negras). Poseen cementación de óxidos en los bordes.

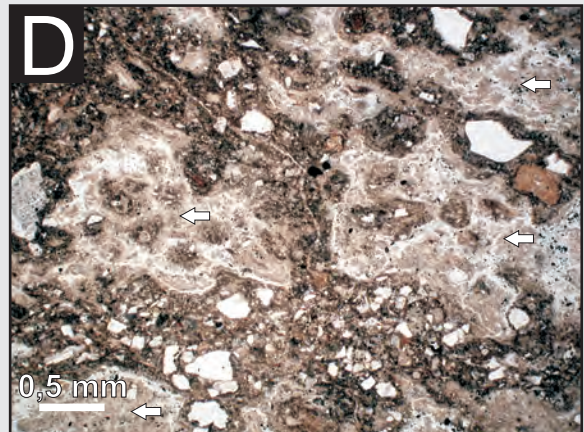


Foto sin nicoles, de cavidades rellenas de arcillas, las cuales están eluviadas, se lavan los óxidos de hierro y manganeso en un proceso denominado albitización. La roca posee un aspecto de mezcla o sinmixis.

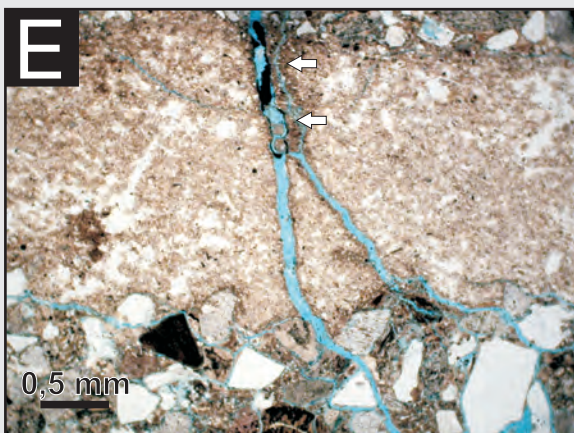


Foto sin nicoles, de un canal interconectado, el cual hacia arriba se encuentra relleno de materia orgánica parcialmente. Posible traza de organismo vermiforme.

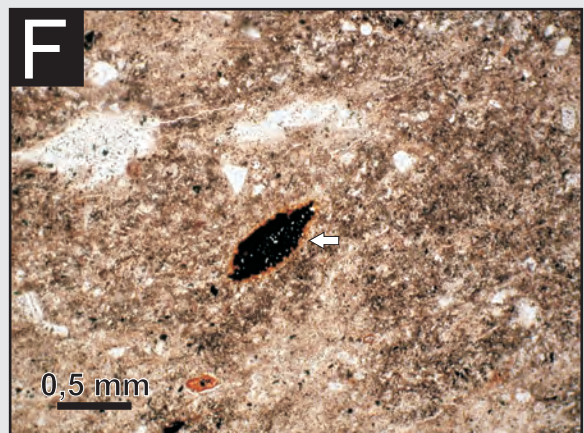


Foto sin nicoles de una traza fósil deformada por compresión, la cual está rellena completamente de pellets de materia orgánica. Posee un contorno de oxidación. Posible traza de verme.

La mayoría de los investigadores de paleosuelos utiliza clasificaciones de suelos actuales en sus trabajos, como la clasificación taxonómica de suelos de Estados Unidos (Soil Survey Staff, 1975; 1998) y la clasificación FAO (Food and Agriculture Organisation, 1974). La clasificación de Duchaufour (1982) también ha sido ampliamente utilizada (Kraus y Aslan, 1993; 1999; Kraus 1997; 1998). Existe asimismo una propuesta de clasificación exclusiva para paleosuelos (Mack *et al.*, 1993) aunque en cierta manera, es una clasificación basada en suelos actuales y en la clasificación FAO. Las clasificaciones del Soil Survey Staff y la de FAO están basadas en los perfiles de suelos y en las características de los mismos. La clasificación del Soil Survey Staff “*Soil Taxonomy*” utiliza a los horizontes de suelo diagnósticos, los cuales son identificados a través de propiedades como: textura, color, cantidad de materia orgánica, presencia de minerales particulares, capacidad de intercambio catiónico y pH. En cambio, clasificaciones como la FAO y la de Duchaufour (1982) son mucho más sencillas (Kraus, 1999). Es más, Duchaufour (1982) reconoce a los suelos hidromórficos como una categoría mayor, y la clasificación de la FAO divide a los Gleysols también como de un orden mayor. De esta manera de acuerdo a las clasificaciones de FAO y Duchaufour todos los paleosuelos de la Formación Mata Amarilla quedarían agrupados dentro de las categorías de Suelos hidromórficos y Gleysols, respectivamente. En cambio en la clasificación del Soil Survey Staff los suelos saturados son subórdenes de los Órdenes de suelo mayores.

En la tabla 5.1, se muestran las posibles equivalencias de los tres sistemas; el de Mack *et al.* (1993) exclusivo para paleosuelos, el del Soil Survey Staff (1998) y el de Duchaufour (1982). Duchaufour (1982) considera que el *Soil taxonomy* y el sistema FAO no le dan el suficiente peso al ambiente en el cual se desarrolla el suelo. Por eso propone su clasificación, la cual está basada en los procesos de formación del suelo y en el ambiente bajo el cual se desarrolla. Basados en esto, muchos autores alientan su utilización (Kraus, 1999). Uno de los problemas del empleo del *Soil Taxonomy* y la clasificación FAO en paleosuelos es que son dependientes de las propiedades y características del suelo y algunas de ellas son difíciles de determinar en los suelos fósiles, como por ejemplo la capacidad de intercambio catiónico. Esto llevó a Mack *et al.* (1993) a proponer su clasificación sólo para paleosuelos. Esta se basa en la presencia de minerales estables y en atributos morfológicos que se preservan en los paleosuelos. La clasificación de Mack *et al.* (1993) posee la ventaja

Tabla 5.1 Comparación de sistemas de clasificación de suelos

Mack <i>et al.</i> (1993)	Soil Survey Staff (1998)	Duchaufour (1982)
Protosoles	Entisoles	I- Suelos de escaso desarrollo
Vertisoles	Inceptisoles	II- Suelos húmicos desaturados
Histosoles	Vertisoles	? III- Suelos calcimagnesianos
Gleysoles	Histosoles	IV- Suelos Isohúmicos
Excluidos de la clasificación	No posee un Orden mayor	V- Vertisoles
Oxisoles	Andisoles	VI- Suelos Brúmicos
Spodosoles	Oxisoles	VII- Suelos podzólicos
Argisoles	Spodosoles	VIII- Suelos hidromórficos
Calcisoles	Alfisoles	IX- Suelos fersialíticos
Gypsoles	Ultisoles	X- Suelos ferruginosos
No posee equivalentes	No posee equivalentes	XI- Suelos ferralíticos
Excluidos de la clasificación	Aridisoles	XII- Suelos sódicos
No posee equivalentes	Mollisoles	
	Gelisoles	

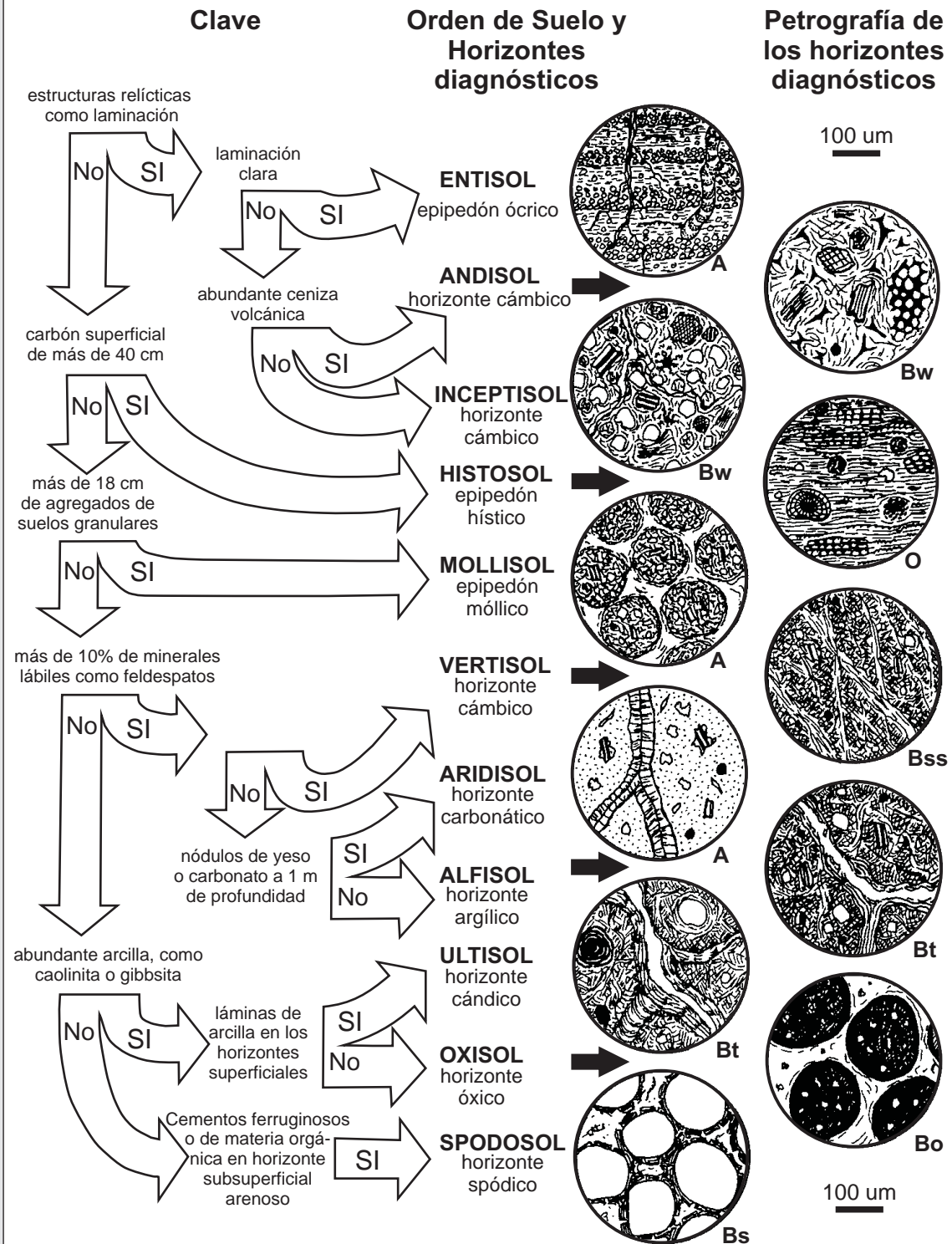
de ser muy sencilla, ya que se basa en las descripciones de las características de campo. Al ser más simple se extiende a todos los geólogos no especializados en pedología. A pesar de esto, el sistema de clasificación fue muy criticado por Retallack (1993). En primer lugar porque la clasificación de Mack *et al.* (1993) está restringida a paleosuelos, con lo cual su utilización no alentaría el trabajo conjunto de pedólogos y paleopedólogos, sino que aumentaría sus diferencias. Y en segundo lugar porque los paleopedólogos utilizan a los suelos modernos para interpretar las condiciones ambientales del pasado (Retallack, 1993). De esta manera, las características de los ambientes en los cuales se desarrolla un suelo no deberían tener peso a la hora de clasificarlos.

Se considera en este trabajo que toda clasificación debe ser descriptiva y debe carecer (dentro de lo posible) de interpretaciones. En concordancia con esto y con los criterios de Retallack (1993), en la presente investigación se utiliza la clasificación *Soil taxonomy* (Soil Service Staff, 1998) y se toman las modificaciones para paleosuelos hechas por Retallack (1993) a la anterior clasificación del Soil Service Staff de 1973 (ver la clave utilizada en la lámina 5.15). A continuación se describen todos los tipos de paleosuelos presentes en la Formación Mata Amarilla.

5.4.1- Histosoles

Todos los tipos de carbones independientemente del espesor de los mismos califican con un horizonte diagnóstico de tipo hístico y deberían clasificarse como histosoles. Un carbón es definido según (Bates y Jackson, 1984) como una “roca que contiene más del 50% del peso y más del 70% del volumen del material carbonoso, formada por la compactación y acumulación de fragmentos vegetales”. Según los requerimientos del Soil Survey Staff (1975, 1998), los histosoles poseen carbones o pelitas carbonosas originadas por un horizonte superficial que se encuentra totalmente anegado y posee acumulación y concentración de plantas y restos vegetales. Mack *et al.* (1993) y Retallack (1993, 2001) eliminaron la condición del espesor requerido para los modernos histosoles, debido a que es muy difícil estimar y/o calcular el espesor del carbón o pelita carbonosa anterior a la compactación y diagénesis. Cabe destacar que los carbones y pelitas carbonosas suelen perder hasta un 70% de su volumen (Van Asselen, 2009). Las pelitas carbonosas laminadas no entran en la clasificación, ya que el material no se produce *in situ*, salvo que exista

Clave para clasificación de paleosuelos



Clave para clasificación de suelos simplificada de (U.S. Soil Taxonomy) para paleosuelos, con énfasis en criterios de campo y petrográficos (datos de Retallack, 1988, 1990, 1991, 1993). Las características petrográficas tomadas de Douglas y Thompson (1985). Modificado de Retallack (1993).

otro tipo de rasgos edáficos como moteados, rizolitos, rizoconcreciones, *slickensides*, etc.

Este tipo de paleosuelos se encuentran en la sección inferior y superior de la Formación Mata Amarilla, asociado a áreas topográficamente deprimidas y de muy baja pendiente, con condiciones de drenaje muy malas, por lo general en zonas cercanas a la costa. Se interpretan como asociados a los ambientes albufericos, estuarinos y a los sistemas fluviales distributarios. Este tipo de suelos está totalmente saturado en agua entre el 75 y el 90% del año (Fanning y Fanning, 1989). Los suelos hísticos de la Formación Mata Amarilla están caracterizados por los epipedones de tipo hísticos de entre 5 y 20 cm en promedio, los cuales generalmente presentan subhorizontes con colores gley (de tonos muy bajos) y abundantes rasgos redoximórficos (moteados y nódulos), así como también *slickensides* y rizolitos. Hay un tipo especial de paleosuelos que se ha incluido dentro de los paleosuelos de tipo hísticos, los cuales poseen características de suelos ácidos y fueron denominados “suelos con potencial de sulfato ácido” por Brinkman y Pons (1973). Este tipo especial de histosoles está caracterizado por la presencia de abundantes moteados y rizoconcreciones de jarosita, que poseen un color anaranjado muy característico (10YR 8/6 y 7/6). La jarosita $[KFe_3(OH)_6(SO_4)_2]$, se forma comúnmente a partir de la pirita cuando las condiciones de drenaje del suelo permiten la oxidación, lo que conlleva a elevar la acidez del suelo (Van Breeman, 1982; Miedema *et al.*, 1974; Kraus, 1998). A los horizontes con abundantes rizoconcreciones y moteados de jarosita se los nombró como horizonte “Gr”. La presencia de jarosita confirma que el suelo estuvo inundado o anegado durante casi todo el año, causando condiciones de permanente reducción, con preservación de la materia orgánica, reducción del hierro y precipitación de pirita. Pero es necesario tener un medio con abundante concentración de sulfatos para producir la precipitación de la pirita, es por ello que este tipo de suelos muy pobremente drenados son característicos de áreas costeras y estuarios (Van Breeman, 1973; Miedema *et al.*, 1974). Los histosoles de la formación Mata Amarilla pueden dividirse en histosoles hidromórficos e histosoles ácidos (Lámina 5.16). Estos a su vez pueden ser simples cuando aparecen en forma aislada, o multihistóricos o apilados cuando son repetitivos (Lámina 5.16).

5.4.2- Vertisoles

Los vertisoles son paleosuelos caracterizados por una homogeneización del perfil de suelo por pedogénesis. El proceso de pedogénesis o pedoturbación dominante es la expansión / contracción de arcillas expansivas. Las principales características de los vertisoles son:

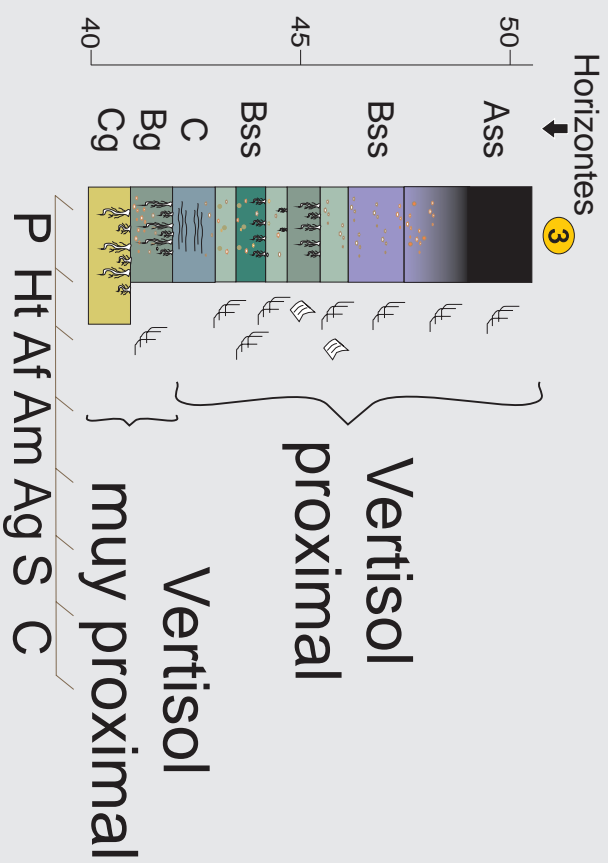
- Agregados de suelo o *peds* angulosos a subangulosos en forma de cuña.
- Estructuras de montículos y depresiones (microrelieve Gilgai).
- *Slickensides* o espejillos de fricción
- Homogeneización del suelo

La presencia de arcillas de tipo expansivas (esmectitas) no es un rasgo condicionante en la definición de vertisoles fósiles, ya que las mismas se pueden transformar a otros minerales durante la diagénesis (ej. illita). En el caso de los paleosuelos de la Formación Mata Amarilla las arcillas son en su totalidad esmectitas, debido a que la diagénesis es muy baja (Capítulo III). Los vertisoles son los paleosuelos más abundantes en la Formación Mata Amarilla, haciéndose presentes en todas sus secciones. Los vertisoles de Mata Amarilla poseen los característicos microrelieves Gilgai (Lámina 5.4), así como también abundantes *slickensides*. Los horizontes con abundantes estructuras de fricción (*slickensides*) llevan el sufijo “ss” (ej. “Ass”; “Bss”; no existen horizontes “Css”). A su vez estos vertisoles poseen importantes rasgos hidromórficos con características de tipo redox. Es decir algunos de los horizontes superficiales experimentaron condiciones alternantes de oxidación y reducción. Esos horizontes de tipo gley, están caracterizados por moteados de coloraciones amarillentas a amarronadas y grises azuladas, dispersos en una matriz de coloración gris verdosa de tonos bajos, conjuntamente acompañan nódulos y concreciones de hierro y manganeso. Estos horizontes con características redox llevan el sufijo “g” (ej. “Ag”; “Bg” y “Cg”). Estos vertisoles son de tipo ácuicos y definen a topografías deprimidas con niveles freáticos elevados y/o áreas con drenaje impedido a ineficiente, estando saturados la mayor parte del año. En la lámina 5.17, se pueden observar los vertisoles correspondientes a una planicie de inundación proximal y una planicie de inundación distal, los términos proximal y distal hacen referencia a la distancia a los paleocanales. A su vez se dividen en muy proximal o muy distal de acuerdo a las condiciones de drenaje, es decir al paleorelieve (Lámina 5.17).

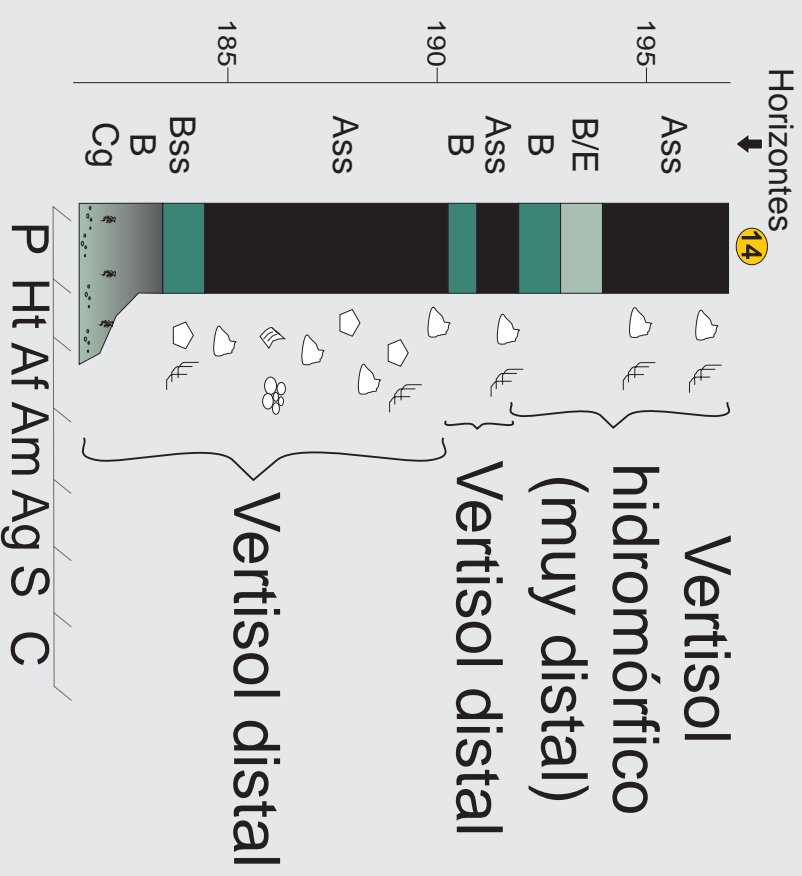
Vertisoles de la Formación Mata Amarilla

Los vertisoles son los paleosuuelos más abundantes y característicos de la Formación Mata Amarilla, se encuentran en todas las secciones y se diferencian de acuerdo a las condiciones de drenaje. Los términos proximal y distal, hacen referencia a la distancia al paleocanal y por consiguiente al paleorelieve.

VERTISOLES PROXIMALES



VERTISOLES DISTALES



REFERENCIAS		
	Slickensides	
	Cutanes	
	Agregados granulateros	
	Agregados subangulosos	
	Agregados angulosos	
	Agregados columnarates	
	Agregados planares	
	Agregados prismáticos	
	Moteados	
	Moteados de jarosita	
	Concreciones de hierro	
	Concreciones de Manganeso	
	Raíces / rizolitos	
	Rizocncreciones de jarosita	
	Brizas vegetales	
	Bioturbación	
	Intradados	
	Troncos <i>in situ</i>	
	Troncos	
	Hojas	
	Dinosaurios	
	Carbon	
	Entrecruzada en artesa	
	Entrecruzada tangencial	
	Entrecruzada planar	
	Ondulas	
	Laminación	
	Laminación pobre	

5.4.3- Alfisoles vérticos

Un alfisol es un suelo que está caracterizado por un horizonte subsuperficial de tipo argílico “Bt”, el cual posee como rasgo característico la presencia de arcilla iluvial, es decir arcilla translocada desde un horizonte superficial de tipo “A” y iluviada en el horizonte “B”. Es necesario aclarar que el espesor del horizonte y la cantidad de arcilla total no son factores condicionantes en la definición de un horizonte argílico. Las evidencias de la presencia de arcilla iluvial son los cutanes o barnices de tipo “argillanes”, así como también los agregados de suelos prismáticos. Los argillanes se pueden distinguir tanto en muestras de mano (Lámina 5.5 A, C y D) como en secciones delgadas, donde se pueden ver como arcillas orientadas rellenando cavidades y canales (Lámina 5.12 D, E y F) y como *coatings* argílicos (Lámina 5.12 C) alrededor de los granos detríticos (argillanes). Los alfisoles son similares a los ultisoles y en la clasificación del Soil Survey Staff (1998) se diferencian sobre la base del pH o “estado ácido-básico”. Retallack (1988; 1993) sugirió que el pH original de un paleosuelo puede ser estimado con la presencia o ausencia de granos lábiles o químicamente inestables, tales como los feldespatos. La presencia de clastos lábiles químicamente inestables indica altos pH o “estado alcalino” (Lámina 5.15), mientras que su ausencia indica bajos pH o “estado ácido-básico”.

Los alfisoles no son muy abundantes en la Formación Mata Amarilla y se encuentran formando parte del espeso nivel de paleosuelos asociado al bosque petrificado María Elena. Este nivel marca el pasaje a la sección media de la formación. Los Alfisoles de Mata Amarilla son Alfisoles vérticos, debido a que poseen abundantes *slickensides*, producto de la composición esmectítica de las arcillas (Lámina 5.18). Así como también poseen rasgos hidromórficos como por ejemplo la presencia de colores gley y de moteados. Se encuentran asociados lateral y verticalmente a los vertisoles (Lámina 5.18).

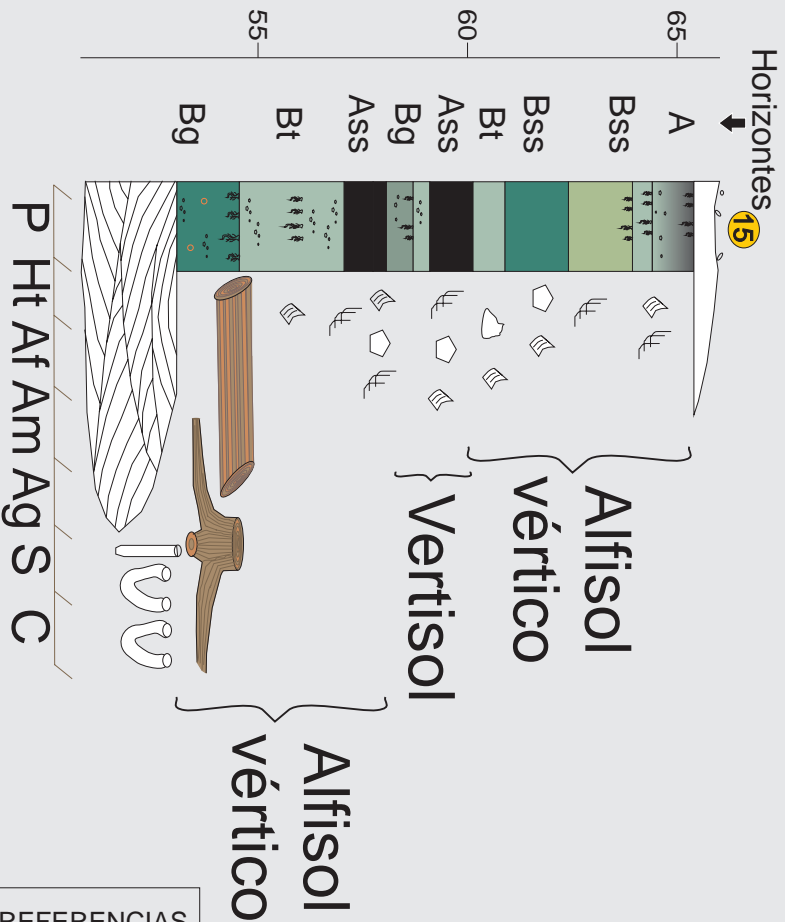
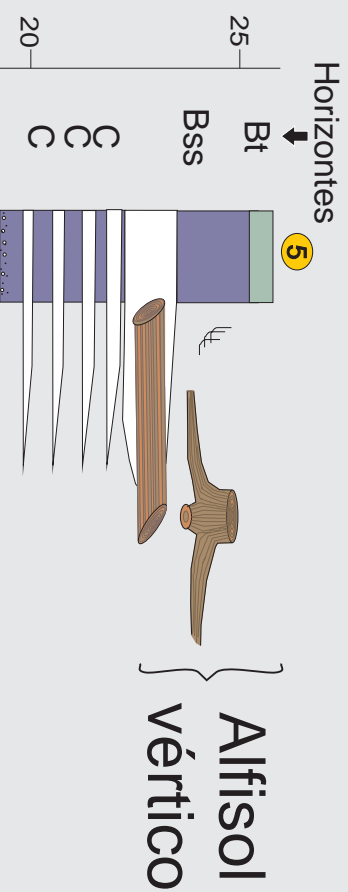
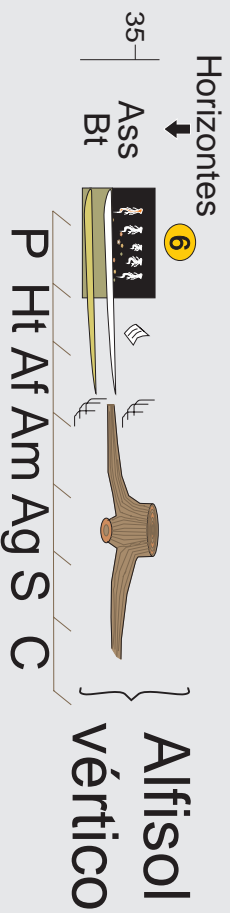
5.4.4- Inceptisoles

Un inceptisol es un suelo incipiente o de escaso desarrollo. No posee una diferenciación notable de horizontes de suelo (perfiles A-C o B-C) y carece de una pedoturbación o pedogénesis muy notoria. Los inceptisoles muestran características de otros órdenes de suelo, pero sin el desarrollo suficiente como para ser

Alfisoles vérticos de la Formación Mata Amarilla

Lámina 5.18

Los alfisoles son suelos muy bien desarrollados y están asociados al bosque petrificado María Elena. Las localidades 6- Estancia La Urbana; 5- Camino a María Elena y 15- Estancia La Blanca poseen árboles en posición de vida (*in situ*).



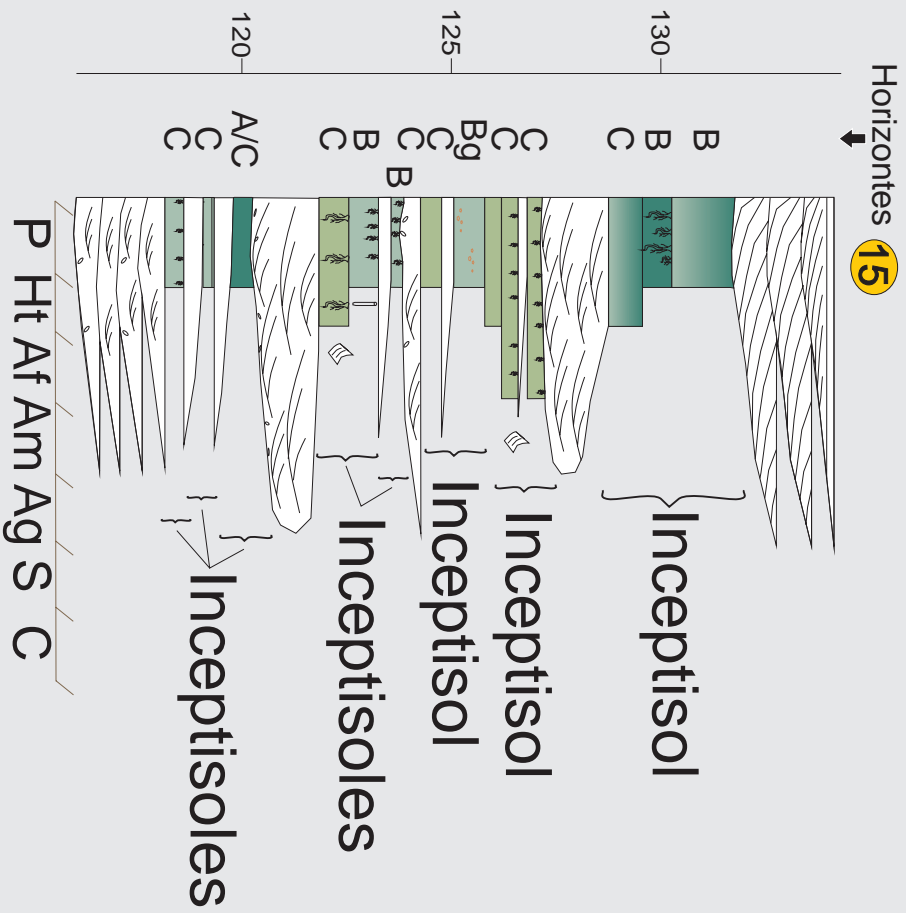
REFERENCIAS		
	Slickensides	
	Cutanes	
	Agregados granulares	
	Agregados subangulosos	
	Agregados angulosos	
	Agregados columnares	
	Agregados planares	
	Agregados prismáticos	
	Moteados	
	Moteados de jarosita	
	Concreciones de hierro	
	Concreciones de Manganeso	
	Raíces / rizolitos	
	Rizoconcreciones de jarosita	
	Brizas vegetales	
	Bioturbación	
	Intraclastos	
	Troncos <i>in situ</i>	
	Troncos	
	Hojas	
	Dinosaurios	
	Carbon	
	Entrecruzada en artesa	
	Entrecruzada tangencial	
	Entrecruzada planar	
	Onduladas	
	Laminación	
	Laminación pobre	

diagnósticas. Se los suele denominar horizontes de tipo cámbicos “Bw” (Lámina 5.15), aunque en el presente trabajo no se utiliza el sufijo “w” debido a que es dificultoso determinarlo en suelos fósiles. Los inceptisoles de la Formación Mata Amarilla poseen rizolitos y en ocasiones moteados como rasgos edáficos más frecuentes. El carácter de incipiente desarrollo que poseen los inceptisoles de las planicies de inundación fluviales, como los de Mata Amarilla, puede estar relacionado a dos factores del sistema fluvial. Por un lado los suelos desarrollados sobre albardones, que van a estar sujetos a altas tasas de sedimentación. Después de cada evento de desborde el sistema deposita sedimento y el desarrollo de suelo se interrumpe para volver a comenzar (Lámina 5.19). Y por otra parte, están los inceptisoles relacionados a las avulsiones del sistema fluvial en respuesta a los factores extrínsecos. Las sucesivas avulsiones no permiten que se desarrollen los suelos debido a que continuamente se erosionan parte de los depósitos de la planicie de inundación (Lámina 5.19).

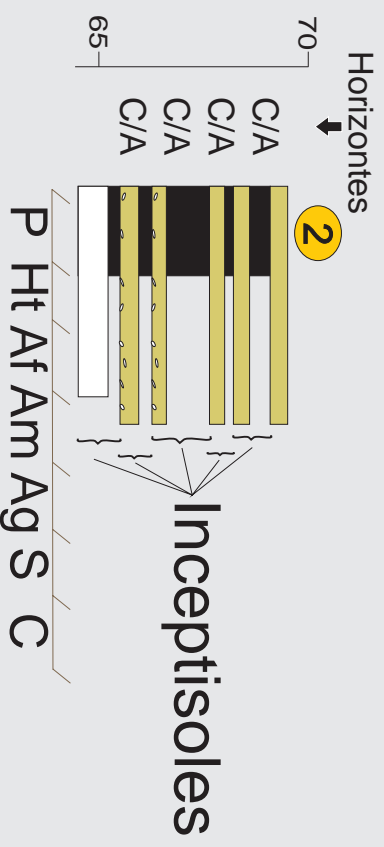
5.5- Tipos de Paleosuelos de acuerdo al grado de desarrollo

Los paleosuelos pueden ser clasificados de acuerdo al grado de desarrollo, el cual depende del balance entre la tasa de acumulación de sedimento y la tasa de pedogénesis (Marriot y Wright, 1993; Wright y Marriot, 1996). Si la erosión es escasa y la sedimentación es rápida y continua se forman los paleosuelos **acumulados** o **apilados** (Lámina 5.20). Estos paleosuelos no poseen gran desarrollo, son inmaduros, con perfiles de suelo apilados los cuales están separados por sedimentos poco edafizados (regolitos) o sedimentos inalterados. Si la tasa de pedogénesis supera a la de sedimentación, se desarrollan perfiles de suelo superpuestos. A estos tipos de paleosuelos se los denomina **compuestos** (Krauss, 1999), y están caracterizados por el desarrollo de más de un horizonte subsuperficial “B” (Lámina 5.20). En cambio si la erosión es insignificante y la sedimentación es esporádica o en pulsos, se forman espesos niveles de paleosuelos **cumulares**. Estos paleosuelos muestran pequeños incrementos de sedimentos acompañados por pedogénesis (Lámina 5.20). En los sistemas fluviales los depósitos de canal tienen pocas evidencias de pedogénesis o a lo sumo muestran desarrollo de paleosuelos de tipo acumulados o apilados (Marriot y Wright, 1993; Kraus y Aslan, 1999; Kraus, 1999). A medida que el canal migra lateralmente se pueden desarrollar paleosuelos

Inceptisoles por avulsión



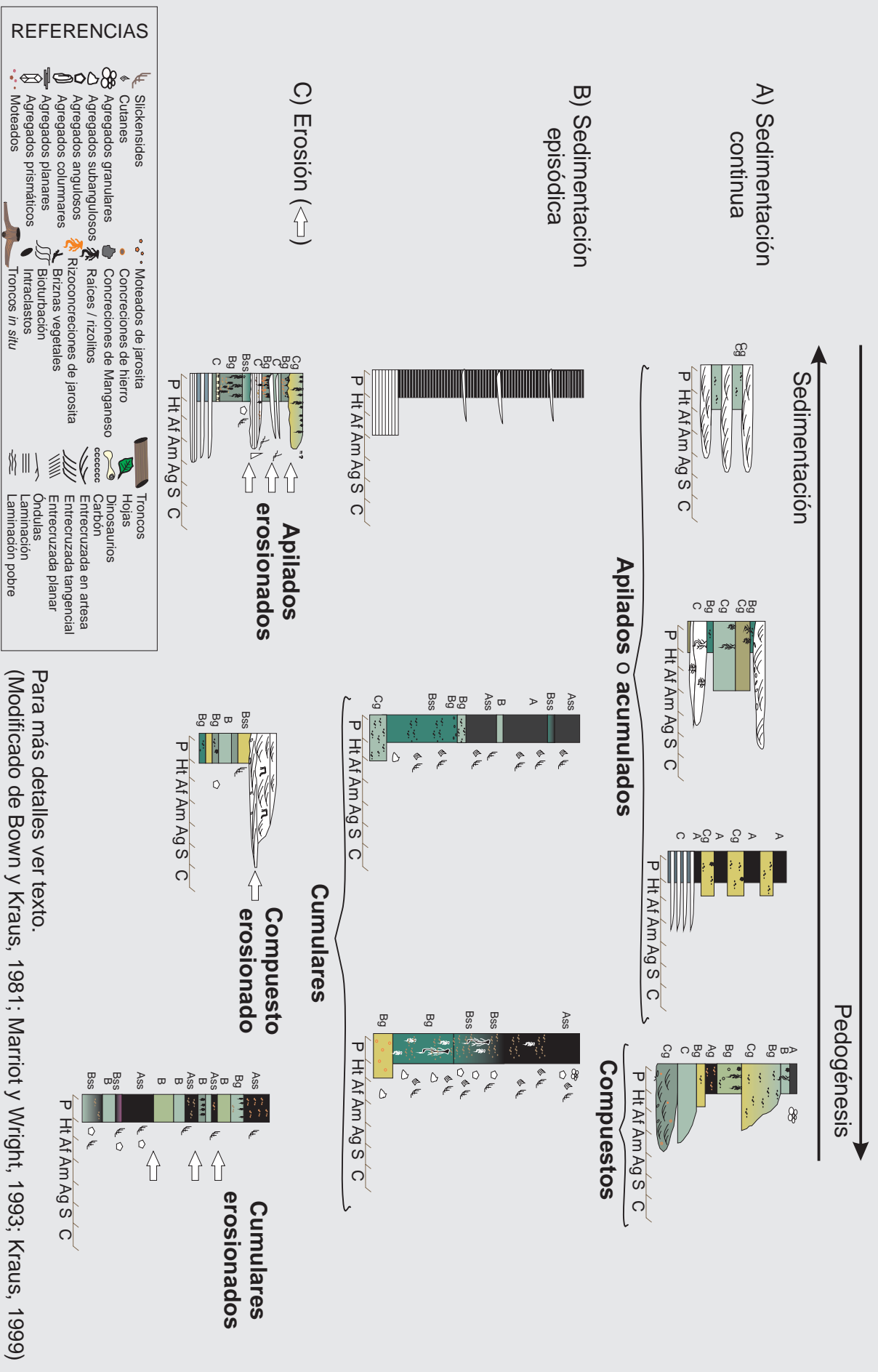
Inceptisoles de albardones



REFERENCIAS

- | | | | | | |
|--|------------------------|--|------------------------------|--|-------------------------|
| | Slickensides | | Moteados de jarosita | | Troncos |
| | Cutanes | | Concreciones de hierro | | Hojas |
| | Agregados granulares | | Concreciones de Manganeso | | Dinosaurios |
| | Agregados subangulosos | | Raíces / rizolitos | | Carbon |
| | Agregados angulosos | | Rizoconcreciones de jarosita | | Entricruzada tangencial |
| | Agregados columnares | | Briznas vegetales | | Entricruzada planar |
| | Agregados planares | | Biocrustación | | Ondulas |
| | Agregados prismáticos | | Troncos <i>in situ</i> | | Laminación |
| | Moteados | | | | Laminación pobre |

Tipos de paleosuelos de acuerdo al grado de desarrollo



REFERENCIAS

- Slickensides
- Cutanes
- Agregados granulares
- Agregados subangulosos
- Agregados angulosos
- Agregados columnares
- Agregados planares
- Agregados prismáticos
- Moleados
- Moleados de jarosita
- Concreciones de hierro
- Concreciones de Manganeso
- Raíces / rizolitos
- Rizococoncreciones de jarosita
- Briznas vegetales
- Bioturbación
- Intraclastos
- Troncos *in situ*
- Troncos
- Hojas
- Dinosaurios
- Carbón
- Entrecruzada tangencial
- Entrecruzada planar
- Ondulas
- Laminación
- Laminación pobre

Para más detalles ver texto.
 (Modificado de Bown y Kraus, 1981; Marriot y Wright, 1993; Kraus, 1999)

compuestos con horizontes “B” de gran desarrollo. En los albardones, la sedimentación es episódica con tasas de sedimentación bajas, comúnmente del orden de 1-10 mm/año (Kraus, 1999), por ello se forman paleosuelos apilados de muy escaso desarrollo (Lámina 5.20), como algunos de los inceptisoles de Mata Amarilla. A su vez, los paleosuelos acumulados o apilados se pueden formar sobre los depósitos de crevasamiento o desborde, debido a que la sedimentación es rápida y continua (Lámina 5.20). Por su parte los suelos cumulares suelen caracterizar las partes distales de las planicies de inundación.

Procesos autocíclicos y alocíclicos que operan en períodos de (10^3 a 10^4 años) pueden producir pausas relativamente grandes en la depositación, así como también en la erosión, las cuales influyen en el desarrollo de suelos. Como ejemplo de un proceso autocíclico se puede generar una avulsión en un sistema fluvial.

El cambio de la posición del canal puede terminar o interrumpir la pausa de sedimentación en parte de la planicie de inundación (la parte más distal). Las pausas de depositación en las planicies distales son del orden de 10^3 años, el cual es el tiempo entre sucesivos períodos de avulsión (Bridge y Leeder, 1979). En estos sectores se va a generar un suelo de gran desarrollo.

En la Formación Mata Amarilla las avulsiones producen tres tipos de paleosuelos. 1- Paleosuelos de buen desarrollo de tipo cumulares, los cuales se formaron en las planicies de inundación distales. 2- Paleosuelos compuestos de desarrollo moderado, los cuales se ubicaban en la parte media de las planicies de inundación. Y 3- Suelos apilados o acumulados pobremente desarrollados, los cuales se formaron en las planicies de inundación proximales, muy cerca de los canales principales (Lámina 5.20). Las secuencias de paleosuelos de Mata Amarilla muestran abundantes cambios desde suelos con desarrollo pobre a suelos con buen desarrollo, y viceversa. Sin embargo, estos cambios no necesitan necesariamente de factores alocíclicos para su generación, ya que como se indicó anteriormente factores propios de los sistemas fluviales pueden producir estos arreglos (factores autocíclicos).

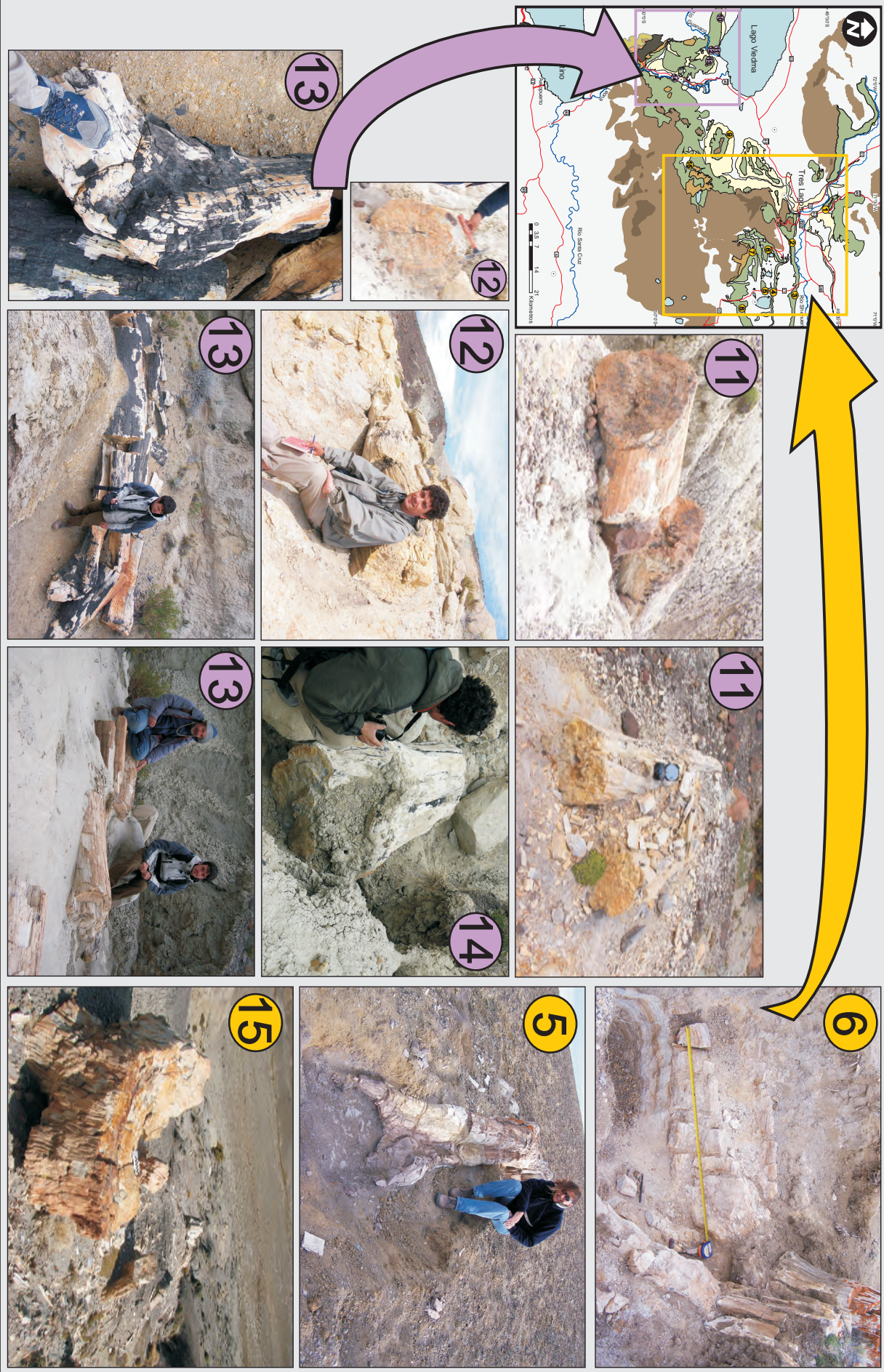
Otro tipo de paleosuelo de acuerdo al desarrollo es el **paleosuelo asociado a discontinuidades** o **hiatus**. Las discontinuidades representan hiatus que pueden ser desde menos de 1 millón de años hasta decenas de millones de años. Estos paleosuelos se forman durante períodos de estabilización del paisaje. En muchos casos paleosuelos de gran desarrollo y de una gran extensión areal (de carácter regional) marcan la presencia de discontinuidades y un período de no depositación.

La formación de discontinuidades es controlada por factores alocíclicos tales como (eustacia, clima y tectónica). Estos procesos actúan en intervalos de 10^5 a 10^7 años (Summerfield, 1991). Por lo cual, los paleosuelos cobraron importancia a la hora de identificar secuencias y límites de secuencias en las sucesiones sedimentarias (Wright y Marriot, 1993). Las discontinuidades son generalmente a escala regional, superficies irregulares a lo largo de las cuales los hiatus de tiempo varían considerablemente. En consecuencia los paleosuelos asociados a estas discontinuidades muestran cambios a escala regional, y estos cambios pueden ser utilizados para interpretar variaciones en la topografía o en las tasas de erosión más locales (Kraus, 1999). Este tipo de paleosuelos asociados a una discontinuidad, de gran desarrollo y continuidad areal se da entre la sección inferior y la media de la Formación Mata Amarilla, la cual está asociada al desarrollo del bosque petrificado “María Elena”. Sin embargo se tiene la particularidad que los árboles del bosque petrificado en el Este del área de estudio se encuentran mayormente en posición de vida (Lámina 5.21, en color naranja), mientras que en el sector Oeste del área de estudio, los árboles del bosque petrificado se encuentran pseudotrasportados (ya que preservan los tocones) (Lámina 5.21, en color violeta). Esta característica aparece conjuntamente con una variación de los paleosuelos, dado que en el Este son Alfisoles vérticos y Vertisoles de gran desarrollo, mientras que en el Oeste son Vertisoles de un desarrollo relativamente menor. Las unidades sedimentarias correspondientes a los canales fluviales del comienzo de la sección media de la Formación Mata Amarilla son fajas de canales complejas en el Este y canales arenosos en manto en el Oeste. Con lo cual se interpreta que durante la discontinuidad del bosque petrificado María Elena, en el Este de ésta porción de la Cuenca hubo una estabilidad sin una erosión muy marcada, mientras que en el Oeste la estabilidad fue acompañada de una erosión importante. Los por que de estas diferencias de preservación serán analizados en la próximas secciones 5.7 y 5.8, sobre cambios laterales y verticales en los paleosuelos.

5.6- Interpretaciones paleoclimáticas

Los paleosuelos son utilizados para interpretar y estimar regímenes paleoclimáticos, esto incluye paleoprecipitaciones medias anuales (PMA) y paleotemperaturas medias anuales (TMA). Las condiciones climáticas que reinaron

Paleosuelos asociados a la discontinuidad del Bosque petrificado María Elena



en el pasado pueden ser interpretadas clasificando a los paleosuelos y usando análogos modernos, o identificando propiedades pedogenéticas que tengan significado climático. Hay numerosos trabajos sobre paleosuelos en los cuales a partir de análogos modernos se hacen interpretaciones paleoclimáticas. Por ejemplo Mack (1992) utilizó paleosuelos aluviales para interpretar el cambio climático entre el Cretácico Inferior y el Cretácico Superior en Nuevo Méjico. De esta manera clasificó a los paleosuelos de coloración rojiza y con horizontes cálcicos como aridisoles, a los cuales atribuyó condiciones paleoclimáticas áridas a semiáridas. Y a los paleosuelos sin horizontes cálcicos y de colores grisáceos, como inceptisoles y alfisoles, sugiriendo condiciones paleoclimáticas húmedas a subhúmedas. En forma similar Bestland (1997) y Kraus y Riggins (2007) utilizaron los paleosuelos para explicar cambios paleoclimáticos a través de los límites Eoceno-Oligoceno y Paleoceno-Eoceno respectivamente. Mack y James (1994) en un intento de unificar las interpretaciones paleoclimáticas generaron un mapa de paleosuelos de escala global, siguiendo como análogo al “Mapa de suelos del Mundo” (FAO, 1974), el cual conecta los suelos modernos con zonas climáticas particulares. Utilizando la clasificación de Mack et al. (1993) (ver tabla 5.1), estos autores sugirieron que los paleosuelos altamente lavados o meteorizados, tales como los oxisoles y argisoles (alfisoles y ultisoles, según *soil taxonomy*) deberían caracterizar condiciones paleoclimáticas húmedas ecuatoriales, con altas temperaturas medias anuales (TMA) y altas precipitaciones medias anuales (PMA) y con muy leves variaciones estacionales. Los argisoles (alfisoles y ultisoles), spodosoles y gleysoles son paleosuelos aptos para formarse en zonas húmedas, con PMA > 1000 mm, de latitudes medias tropicales, con estacionalidad. Y por último los calcisoles indican aridez y PMA < 1000 mm, y se corresponden con zonas paleoclimáticas subtropicales. Sin embargo esta aproximación de Mack y James (1994) que parece tan lógica, no es apropiada para paleosuelos formados con anterioridad al desarrollo de las plantas vasculares, y debería utilizarse con cuidado también para paleosuelos anteriores al período de radiación de las angiospermas. La mineralogía del grupo de las arcillas en los paleosuelos también se utilizó para interpretar cambios climáticos. Robert y Kennett (1994) encontraron que en la Antártida las arcillas mostraban un fuerte incremento en el porcentaje de esmectita (y un decrecimiento de la illita) durante el Paleoceno tardío. Este cambio en la composición de las arcillas se corresponde con el óptimo térmico del Paleoceno tardío. Estos autores concluyen que

el incremento en esmectita es el resultado de la meteorización química producto de temperaturas más cálidas, conjuntamente con mayores precipitaciones medias anuales. En Mata Amarilla los paleosuelos siempre se encuentran dominados por esmectita en proporciones mayores al 85% (Capítulo III). Siguiendo los criterios de Robert y Kennett (1994) los paleosuelos de Mata Amarilla corresponden a climas cálidos con altas precipitaciones medias anuales.

Los paleosuelos de la Formación Mata Amarilla como se vio en el apartado 5.4, fueron clasificados como Histosoles, Vertisoles, Alfisoles e Inceptisoles, los cuales poseen características compatibles con climas tropicales húmedos y estacionales. Las precipitaciones medias anuales fueron mayores a los mil milímetros por año (PMA > 1000 mm) pero las mismas no estaban distribuidas homogéneamente a lo largo del año. Esto se interpreta a partir de numerosos rasgos pedogenéticos que denotan estacionalidad como son los moteados amarillentos, los nódulos y concreciones de hierro y manganeso, y la presencia de *slickensides* y microrelieves de tipo Gilgai. Por su parte las temperaturas medias anuales serían de 20 °C aproximadamente, ya que éstas son las TMA donde se desarrolla actualmente este tipo de suelos. Estas condiciones paleoclimáticas están en concordancia con el comienzo del período de “*greenhouse*” del Cenomaniano, el cual perdura durante todo el Cretácico superior y gran parte del Paleógeno. Estas condiciones de óptimo climático permitieron la radiación de las angiospermas entre el Albiano superior y el Cenomaniano. Los paleosuelos de Mata Amarilla poseen rasgos pedogenéticos muy abundantes y muy bien conservados, por lo cual fue posible realizar las interpretaciones paleoclimáticas.

5.7- Cambios laterales en los paleosuelos

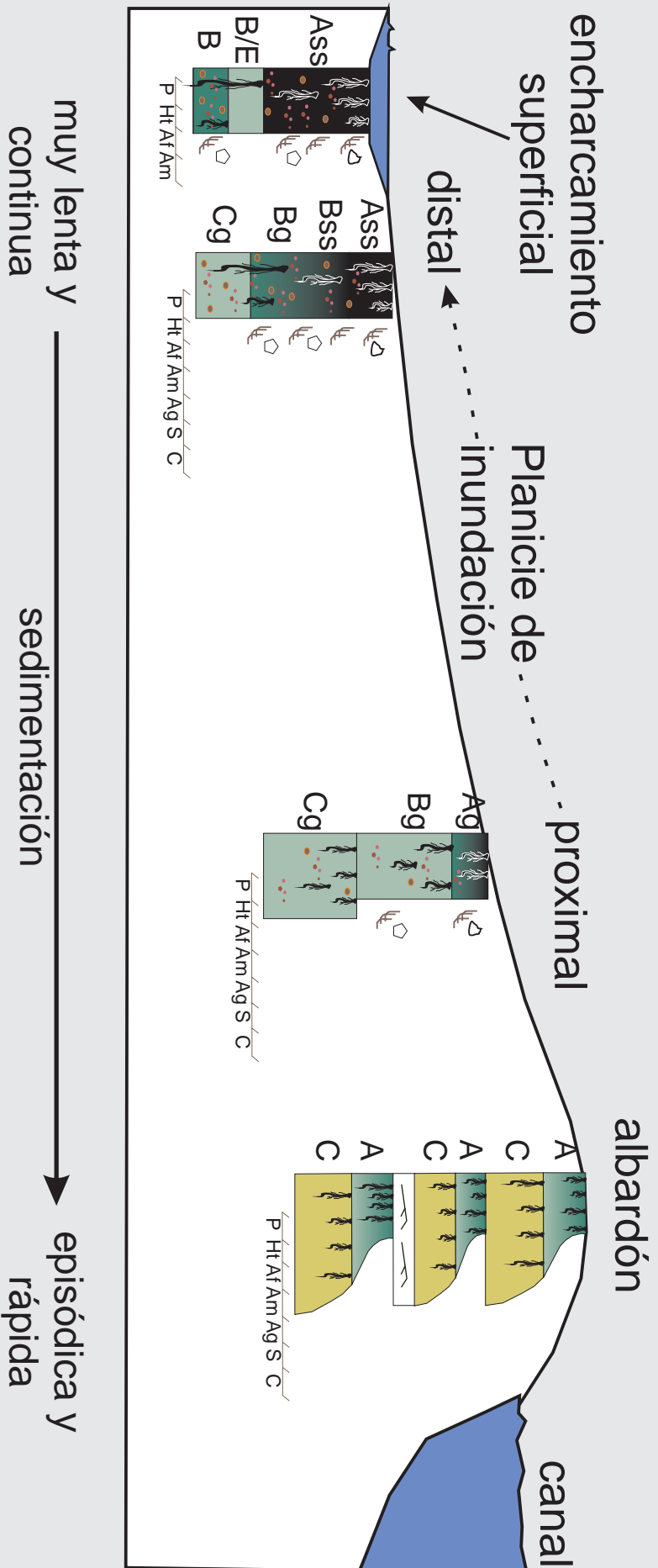
Las asociaciones entre el paleorelieve y los paleosuelos ha sido un tema de interés entre los sedimentólogos (Bown y Kraus, 1987; Kraus, 1987; 1997; Kraus y Aslan, 1999; Varela *et al.*, 2006). Las catenas o series de suelo son una asociación frecuente entre los paleosuelos y el paleopaisaje en el que se desarrollaron, como por ejemplo, los paleosuelos próximos a los canales y los de las planicies de inundación. En una catena o serie, los suelos mejor drenados se forman en los márgenes de los canales (albardones y depósitos de crevasamiento); esto se debe a que éstos se encuentran en una posición elevada con respecto a las planicies de inundación

aledañas. A su vez están compuestos de sedimentos más gruesos (arenas finas y limos) los cuales son más permeables que los depósitos de planicie (Lámina 5.22). Los paleosuelos de la Formación Mata Amarilla muestran fuertes evidencias de oxidación en las facies cercanas al canal y los horizontes superficiales poseen materia orgánica dispersa (Lámina 5.22). En cambio los paleosuelos alejados del canal presentan colores grises a verde oliva con horizontes de tipo gley “Bg” y “Cg” ya que se encuentran cercanos o bajo el nivel freático y mayormente sujetos a condiciones reductoras (Duchaufour, 1982; Kraus y Aslan, 1999) (Láminas 5.13 A y 6.12). A medida que nos alejamos del canal, los suelos se vuelven en forma progresiva más pobremente drenados, debido a que la posición topográfica es más baja y la tasa de sedimentación es menor y el sedimento es de grano más fino, y por ende menos permeable (Kraus y Aslan, 1999; Varela *et al.*, 2006). Las condiciones de anegamiento favorecen la acumulación y preservación de la materia orgánica en los horizontes “Ag” y conjuntamente se desarrolla, por lo general, un espeso horizonte de tipo gley “Bg” con abundantes rasgos redoximórficos. Las fluctuaciones en el nivel freático o en las condiciones de anegamiento superficial generan *slickensides* y microrelieves de tipo Gilgai, en los paleosuelos con arcillas esmectíticas. Si las condiciones de anegamiento superficial son prolongadas se pueden desarrollar horizontes subsuperficiales eluviales o álbicos “B/E” o “E” (Lámina 5.22).

Las paleocatenas han sido descriptas para rocas del Paleógeno (Fatovsky y McSweeney, 1987), para depósitos de planicies deltaicas del Jurásico (Arndorff, 1993) y para el Cretácico (Varela *et al.*, 2006). Una paleocatena está formada por diferentes pedofacies, las cuales varían de acuerdo a las diferentes topografías sobre las que se desarrollan.

Las pedofacies son el producto de cambios laterales en el grado de desarrollo pedogenético con respecto a la distancia al paleocanal (Bown y Kraus, 1987). Estos autores observaron paleosuelos con escaso desarrollo en los márgenes de los canales, mientras que, a medida que se alejaban de las facies de canal notaron un incremento en el desarrollo de los paleosuelos. Estos cambios fueron en principio atribuidos a la diferencia de las tasas de aporte de sedimento, las cuales disminuyen con la distancia al canal (Guccione, 1993). Las pedofacies han sido descriptas también para coronas (Platt y Keller, 1992), sobre la base del grado de desarrollo de los paleosuelos y la proporción de arena. Paleosuelos pobremente desarrollados (con estadio I de Platt y

Variaciones laterales en los vertisoles de Mata Amarilla



Modificado de Kraus & Aslan (1999)

Keller, 1992) fueron descriptos en las facies interpretadas como de canales meandrosos y depósitos de crevasamiento. Mientras que las coronas que no poseían arena fueron interpretaron como planicies de inundación distales a los canales. En éstas, los paleosuelos poseían un mayor desarrollo (estadios II y III de Platt y Keller, 1992), tal cual lo predice el modelo de pedofacies. Aunque el modelo de pedofacies ha sido reconocido en abundantes sucesiones fósiles, éste fue discutido por Wright (1992), debido a que no explica satisfactoriamente todas las sucesiones laterales en las planicies de inundación. Kraus (1997) y Kraus y Aslan (1999) discuten las limitaciones del modelo de pedofacies y lo mejoran. En concordancia con North (1996), sugieren que el modelo es apropiado para espesas sucesiones agradacionales dominadas por suelos compuestos y cumulares. Sin embargo, en otros ambientes sedimentarios también se observan cambios de acuerdo a las diferentes posiciones topográficas en los que se encuentren.

Las pedofacies de una catena son producidas por variaciones en la topografía y el tamaño de grano del material parental relacionados a la posición en el paleopaisaje. Estudios en suelos modernos muestran que hay diferencias composicionales relacionadas al tamaño de grano, y a su vez, éstas condicionan el desarrollo de los suelos. En los sistemas fluviales, las arenas y limos gruesos se acumulan generalmente en los márgenes de los canales (albardones y depósitos de crevasamiento) y tienden a estar dominados por cuarzo, feldespato y fragmentos líticos. En contraposición, las arcillas y limos finos se acumulan frecuentemente en las planicies de inundación y composicionalmente consisten de minerales de grupo de las arcillas tales como esmectita, caolinita, illita y clorita. Aslan y Autin (1998) concluyeron que, en las planicies del Río Mississippi, los ambientes deposicionales controlaron la química de los suelos y los procesos de meteorización. En forma similar a esto, Varela *et al.* (2006) encontraron que para el nivel de paleosuelos asociados al bosque petrificado María Elena, los ambientes depositacionales controlaron el desarrollo de los suelos, así como también controlaron su geoquímica (Lámina 5.23). De esta manera en los paleosuelos ubicados en la planicie de inundación distal se tienen rasgos de mayor madurez, asociados a un decrecimiento de la tasa de sedimentación a medida que nos alejamos del paleocanal. La paleocatena o paleoserie presenta un decrecimiento en el tamaño de grano, en la paleotopografía y en consecuencia, las condiciones de drenaje del paleosuelo empeoran. Con respecto a la mineralogía y geoquímica se observó que disminuye la

cantidad de caolinita a medida que nos alejamos del paleocanal. Esto se debe a que al haber condiciones de drenaje impedido en las planicies de inundación, los iones altamente solubles como el sodio y el potasio, que forman parte de las arcillas esmectíticas, se concentran y no se lavan, es decir no son removidos por soluciones. Pero en las facies de albardones y depósitos de crevasamiento hay mejores condiciones de drenaje debido a paleotopografías más elevadas y a la presencia de sedimentos más gruesos y más permeables. Estas mejoras en las condiciones de drenaje permiten el escurrimiento superficial y subsuperficial. Los iones de Na^+ y K^+ son puestos en solución y lavados, induciendo de esta manera, a la formación de caolinita en detrimento de la esmectita. Cabe destacar que si bien hay presencia de caolinita en los paleosuelos cercanos a los paleocanales, ésta siempre es menor que la esmectita, con lo cual las condiciones de drenaje eran mejores, pero nunca bien drenados.

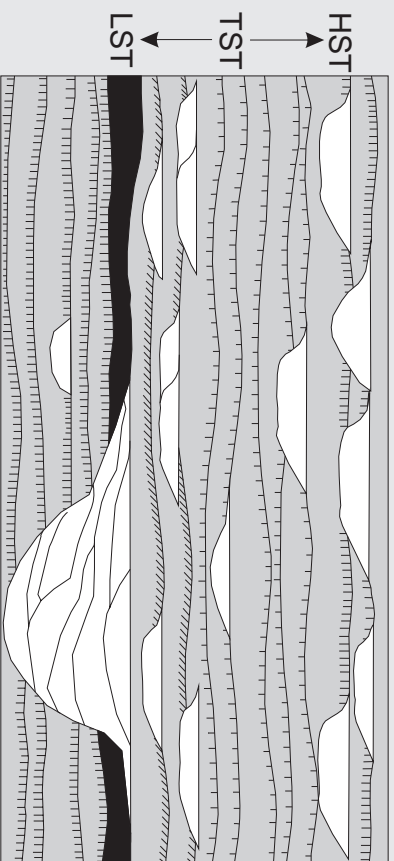
5.8- Cambios verticales en los paleosuelos

A finales del siglo pasado varios autores hicieron hincapié en la importancia de los paleosuelos en la estratigrafía secuencial, tanto desde el modelado (Wright y Marriot, 1993) como en trabajos de campo (Aitken y Flint, 1996; McCarthy y Plint, 1998). Wright y Marriot (1993) desarrollaron un modelo en el cual predicen como sería el grado de madurez y las condiciones de drenaje de los suelos de una planicie costera durante los diferentes estadios de un ciclo eustático. Este modelo sugiere que durante la caída del nivel del mar o período de mar bajo, se generan suelos maduros y bien drenados sobre las terrazas fluviales ya que la caída del nivel de base de los sistemas fluviales genera valles incisos y las planicies de inundación no reciben aporte de sedimento (Lámina 5.24 A). Cuando el nivel del mar comienza a subir, se desarrollan suelos hidromórficos debido al ascenso del nivel de base. A medida que el nivel del mar continúa su ascenso, se incrementa la tasa de creación espacio de acomodación y la sedimentación en la planicie de inundación es rápida (alta tasa de sedimentación), dejando como producto paleosuelos de pobre desarrollo (inmaduros). Más tarde durante el comienzo del estadio de mar alto, la tasa de agradación comienza a disminuir, es decir disminuye la tasa de creación de espacio de acomodación. Esto permite un incremento en la madurez de los suelos. Finalmente cuando el estadio de mar alto está en su apogeo o clímax, el espacio de

Paleosuelos en un esquema estratigráfico secuencial

A

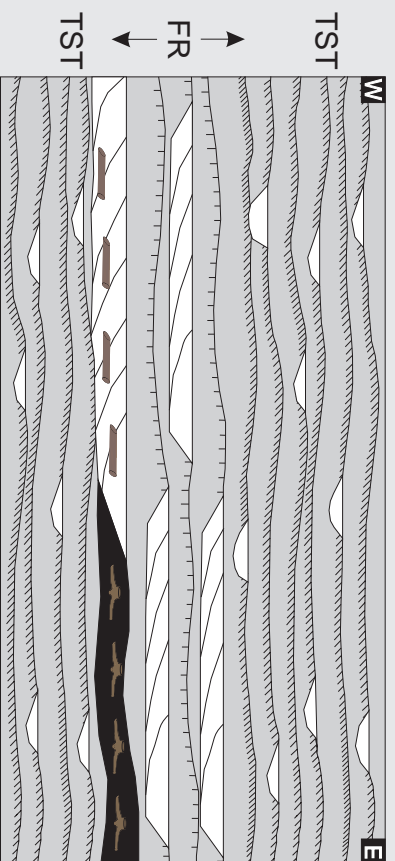
Modelo estratigráfico secuencial teórico y su relación con el desarrollo de paleosuelos. Según, Wright y Marriot (1993)



LST: Cortejo de mar bajo
 TST: Cortejo transgresivo
 HST: Cortejo de mar alto

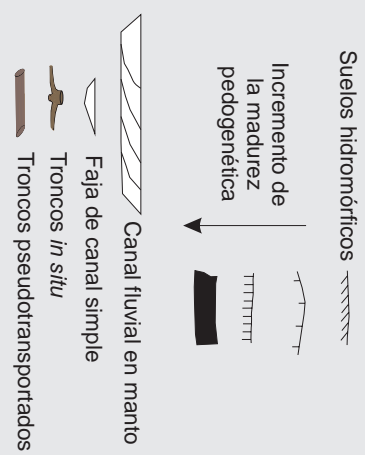
B

Modelo estratigráfico secuencial de afloramiento de la Formación Mata Amarilla y su relación con el desarrollo de paleosuelos



TST: Cortejo transgresivo
 FR: Regresión forzada (sensu Catuneanu et al., 2009)

histosoles de tipo ácidos y vertisoles
 vertisoles e inceptsosoles
 alfisoles vérticos y vertisoles
 histosoles de tipo ácidos y vertisoles



acomodación es bajo y se forman suelos maduros. A pesar de ello el potencial de preservación de estos suelos es muy bajo, porque la tasa de agradación es muy baja y los sistemas fluviales retrabajarían las planicies de inundación (es decir la preservación va a depender del perfil de equilibrio del río). Una característica del modelo de Wright y Marriot (1993) es que al contrario de otros modelos de estratigrafía secuencial, éste predice que las altas tasas de agradación son características de los sistemas transgresivos y bajas tasas de agradación son características de los cortejos de mar alto, donde la creación de espacio de acomodación es baja. Consecuentemente postulan que en los cortejos transgresivos va a haber abundantes depósitos de desborde con paleosuelos inmaduros o de pobre desarrollo, y en los cortejos de mar alto disminuyen los depósitos de desborde y los paleosuelos poseen buen desarrollo (tienen mayor madurez). Pero en contraste con el modelo teórico algunos estudios de campo (Legarreta y Uliana, 1991), muestran que el cortejo de mar alto es dominado por depósitos de desborde, más que en el cortejo transgresivo, y que los paleosuelos son más frecuentes en los estadios de mar alto. Shanley y MacCabe (1994) sugieren que esta discrepancia entre el modelo teórico y los estudios de campo se debe a que el modelo de Wright y Marriot (1993) no tiene en cuenta la posición de los cortejos sedimentarios dentro de la cuenca ni la importancia de reconocer los equivalentes continentales de los niveles marinos condensados *“takes no account to the basinal position of system tracts nor the importance of recognition of the landward equivalent of marine condensed intervals”*.

Aunque las fluctuaciones del nivel del mar ejercen un control importante en los sistemas fluviales costeros, algunos investigadores postulan que los efectos netamente eustáticos no se extienden más de 150 km de la línea de costa (Shanley y MacCabe, 1994, North, 1996). En los sistemas fluviales alejados de la costa o en cuencas cerradas, los cambios climáticos y la tectónica ejercen un mayor control sobre los sistemas fluviales (Blum, 1994; Blum y Valastro, 1994) y el desarrollo de los paleosuelos responde a esos cambios más que a las fluctuaciones puramente eustáticas. Por otra parte cabe destacar que no todos los sistemas fluviales van a responder a las variaciones eustáticas de igual manera. Esto se debe a que los ríos están sujetos a variaciones externas (variaciones del nivel de base) modificando su perfil de equilibrio (Quirck, 1996; Schumm, 1986; 1993). El perfil de equilibrio de un río queda definido como el nivel teórico a partir del cual el río no deposita ni

erosiona. Todos los sistemas fluviales tienden al equilibrio, por ello van a responder a las variaciones externas cambiando su perfil de equilibrio. Los ríos pueden modificar su perfil de equilibrio mediante sedimentación o agradación, por erosión de su lecho, o si la variación del nivel de base no es muy abrupta, por cambios en los parámetros de los canales (Schumm, 1986; 1993). De esta manera podemos llegar a tener depositación o agradación durante una caída del nivel del mar dependiendo de cómo sean el perfil de equilibrio del sistema fluvial y la magnitud de la caída eustática. Todos los modelos clásicos de estratigrafía secuencial en sistemas continentales y su relación con los paleosuelos indican la presencia de valles incisos (Wright y Marriot, 1993; Shanley y McCabe, 1994); sin embargo en la Formación Mata Amarilla no hay presencia de incisiones marcadas. Esto en parte se debe a que los valles incisos o incisos caracterizan a fuertes caídas eustáticas durante los estadios fríos o de “*Icehouse*”, como los del Cuaternario (Blum, 1994; Blum, 2009). Por su parte, durante los periodos de óptimos térmicos o de “*Greenhouse*”, los cambios eustáticos a escala global no son muy marcados.

Fielding *et al.* (2009) proponen que la presencia de canales en manto de gran continuidad lateral en el Cretácico de la región de los Book Cliff, representan fuertes caídas del nivel de base, las cuales podrían estar relacionadas a caídas relativas del nivel del mar durante el “*greenhouse*” del Cretácico superior. En concordancia con Fielding *et al.* (2009) la presencia de un nivel de paleosuelos de amplio desarrollo asociado al bosque petrificado María Elena con árboles en posición de vida en el Este y transportados en el Oeste, indicaría que esta superficie representa desde el punto de vista estratigráfico secuencial una regresión forzada, en el sentido de Catuneanu *et al.* (2009). Esta regresión forzada marca el límite entre la sección inferior y la media de la Formación Mata Amarilla, con lo cual el modelo estratigráfico secuencial de la Formación Mata Amarilla (Lámina 5.24 B) quedaría de la siguiente manera:

Para la sección inferior de la Formación Mata Amarilla la secuencia comienza con un cortejo transgresivo. Cabe aclarar que más hacia el Este estos paleosuelos hidromórficos con canales encapsulados en pelitas (unidad de canales simples de gran escala) se interdigitan con facies estuarinas y una progradación deltaica. Luego viene una regresión forzada (*sensu* Catuneanu *et al.*, 2009), la cual no presenta valles incisos pero si un nivel espeso de paleosuelo y la presencia de canales en manto de gran extensión lateral (unidad de canales en manto gravosos y arenosos) a los cuales

se asocian vertisoles de moderado desarrollo. Por último, nuevamente se da un cortejo transgresivo con canales encapsulados en paleosuelos hidromórficos (unidades de canales simples de gran escala y fajas de canales compuestos). Los factores alocíclicos que controlaron esta variación en los paleosuelos, así como los sistemas fluviales que se le relacionan serán analizados conjuntamente con los depósitos litorales en el capítulo IX.

5.9- Tasas de sedimentación y frecuencias de avulsiones de los sistemas fluviales a partir del estudio de los paleosuelos

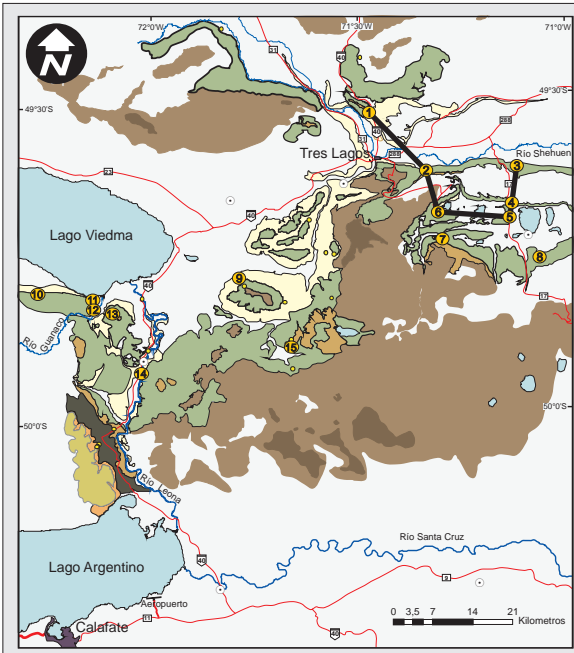
Las tasas de sedimentación son generalmente calculadas dividiendo el espesor de una sucesión por el tiempo estimado de depositación. El grado de desarrollo pedogenético es usado para calcular tasas de acumulación relativa. Los paleosuelos fueron utilizados para comparar y contrastar en forma cuantitativa diferentes tasas de sedimentación en diferentes partes de una misma cuenca (Atkinson, 1986; Platt y Keller, 1992) o a través del tiempo (Kraus y Aslan, 1993; Kraus, 1997 y Kraus y Aslan 1999; Prochnow *et al.*, 2006). Bown y Kraus (1993) sobre la base de criterios morfológicos tales como el espesor de los horizontes “A” y “B”, y el grado de translocación de arcilla, separaron la madurez de los paleosuelos de la Formación Willwood en siete estadios de desarrollo. Estos autores dividieron la secuencia sedimentaria en tramos de 25 m, y a cada tramo le asignaron un estadio de desarrollo según el grado de madurez que presentaban los paleosuelos. Luego estimaron el tiempo relativo que representaba cada tramo de 25 m de acuerdo al estadio de desarrollo de los paleosuelos. Como contaban con edades absolutas en la base y el techo de la secuencia calcularon el período de tiempo de cada intervalo de 25 m. Y de esa manera estimaron las tasas de sedimentación de la secuencia. Sin embargo, el uso de los paleosuelos para estimar tasas de sedimentación relativa sufre de limitaciones. Por ejemplo, es necesario tener datadas por radiometría tanto la base como el techo de la secuencia, así como también deben tenerse algunas edades absolutas o relativas (por ejemplo: edades mamíferos) para contrastar y correlacionar el cálculo realizado por los paleosuelos. En el presente trabajo de la Formación Mata Amarilla, se diferenciaron los horizontes y se interpretaron los paleosuelos en cada una de las localidades. A cada paleosuelo se lo dividió según cada perfil de suelo y se le asignó un grado de madurez de 1 a 7 siguiendo los criterios de Bown y Kraus

(1993). Para esto se tuvo en cuenta el espesor de los horizontes “A” y “B” como así también la intensidad con la que se daban cada uno de los rasgos pedogenéticos. En el lado izquierdo de cada columna sedimentológica, en cada una de las 15 localidades, aparecen los horizontes de suelo con sus respectivos subíndices que marcan sus rasgos característicos (Láminas 5.25; 5.26 y 5.27). A la derecha de dichas columnas se marcaron con rectángulos negros el desarrollo de cada paleosuelo; cuanto más ancho es el rectángulo mayor es la madurez de cada nivel de paleosuelo. A rasgos generales se puede observar el bajo grado de desarrollo que presentan los paleosuelos en la sección inferior de la Formación Mata Amarilla, y el cambio brusco que poseen al nivel de gran desarrollo (madurez) de paleosuelos al comienzo de la sección media, nivel del Bosque Petrificado María Elena. En el resto de la sección media y la sección superior los paleosuelos poseen una madurez moderada a buena que se encuentra generalmente entre los rangos de 3 y 5 de desarrollo.

En forma conjunta se determinaron y marcaron cada una de las avulsiones del sistema fluvial con una flecha blanca (Láminas 5.25; 5.26 y 5.27). Las avulsiones se interpretaron a través de la sedimentología (**avulsiones notorias**) y a través de la madurez de los paleosuelos. Cuando los paleosuelos mostraban un fuerte “reseteo” o interrupción, es decir un cambio notorio en el grado de desarrollo de suelos producto de la depositación eventual de material parental, se interpretó como un acercamiento del canal fluvial producto de una avulsión. A este tipo de avulsiones se las denominó **avulsiones crípticas**.

Las láminas 5.25; 5.26 y 5.27 se correlacionaron de acuerdo a cada una de las secciones de la Formación Mata Amarilla. En una primera vista, podemos observar el incremento en el espesor de la secuencia sedimentaria de Norte a Sur. El perfil ubicado más al Norte (localidad 1) posee un espesor total de la Formación Mata Amarilla de 127 m. mientras que el perfil ubicado en la parte más austral (localidad 14) posee un espesor de 352 m. Las tasas de sedimentación se calcularon dividiendo el espesor de la formación por el intervalo de tiempo en el cual se depositó. Este intervalo de tiempo no está datado radimétricamente pero por posición en secuencia la base de la formación se encontraría en el Albiano más superior (~ 100 Ma) y el techo estaría en el Santoniano (83,5 Ma), con lo cual el intervalo que abarcaría toda la formación es de 16,5 Ma. De esta manera la tasa de sedimentación en la localidad más austral (14) sería de 0,021 mm/año. En cambio para la localidad 1, ubicada más al Norte, la tasa de sedimentación sería de 0,008 mm/ año.

Paleosuelos de Mata Amarilla corte W-E en la parte Norte del área de estudio



REFERENCIAS					
	Insectos		Carbón		Entrecruzada en artesa
	Dipnoos		Conglomerados		Entrecruzada tangencial
	Placas de tortugas		Areniscas		Entrecruzada planar
	Peces		Heterolíticos		Entrecruzada de bajo ángulo
	Hojas		Limolitas		Slickensides
	Bivalvos articulados		Fangolitas		Cutanes
	Gastrópodos		Yeso		Agregados granulares
	Corales		Tobas		Agregados subangulosos
	Dientes de tiburón		Coquinas		Agregados angulosos
	Conchostracos		Areniscas bioclásticas		Agregados columnares
	Dinosaurios		Bioturbación		Agregados planares
	Plesiosaurios		Intraclastos		Agregados prismáticos
	Raíces / rizolitos		Lentes pelíticos		Moteados
	Brizas vegetales		Óndulas		Moteados de jarosita
	Thalassinoides sp		Laminación ondulítica		Concreciones de hierro
	Planolites sp		Laminación		Concreciones de Manganeso
	Skolithos sp		Laminación pobre		Pelitas friables
	Troncos in situ				Paleocrietas
	Troncos				

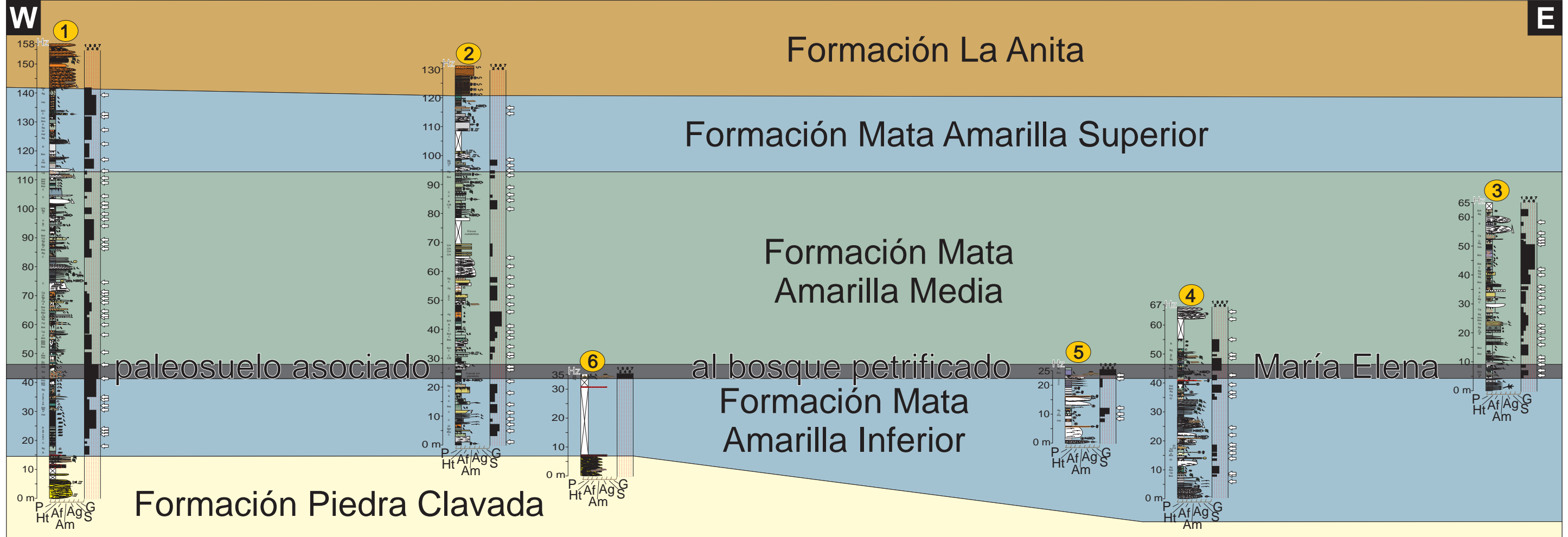
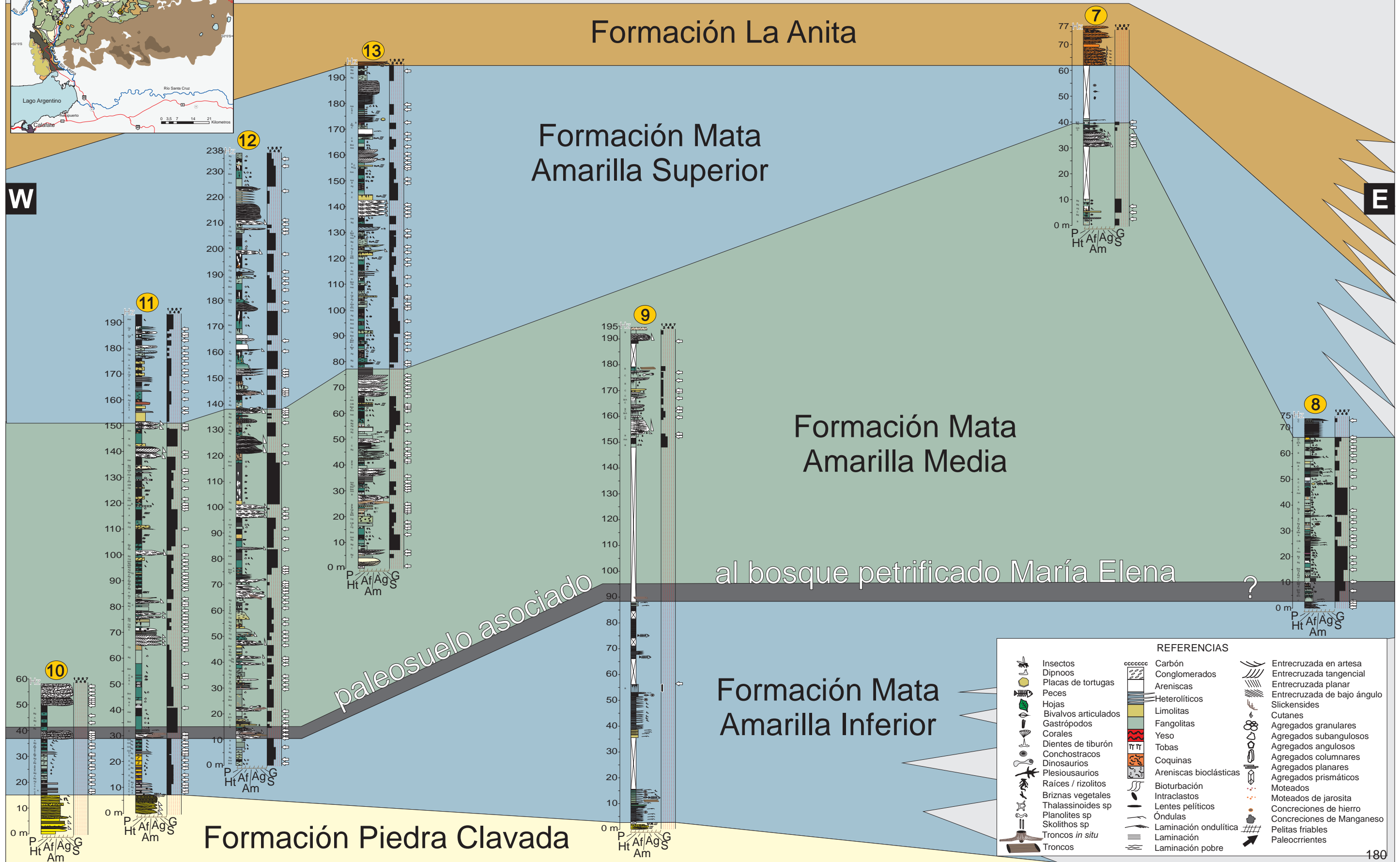
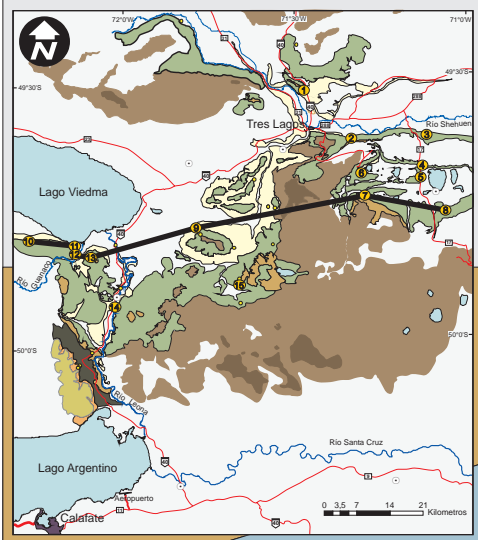


Lámina 5.25

Paleosuelos de Mata Amarilla corte W-E en la parte media del área de estudio

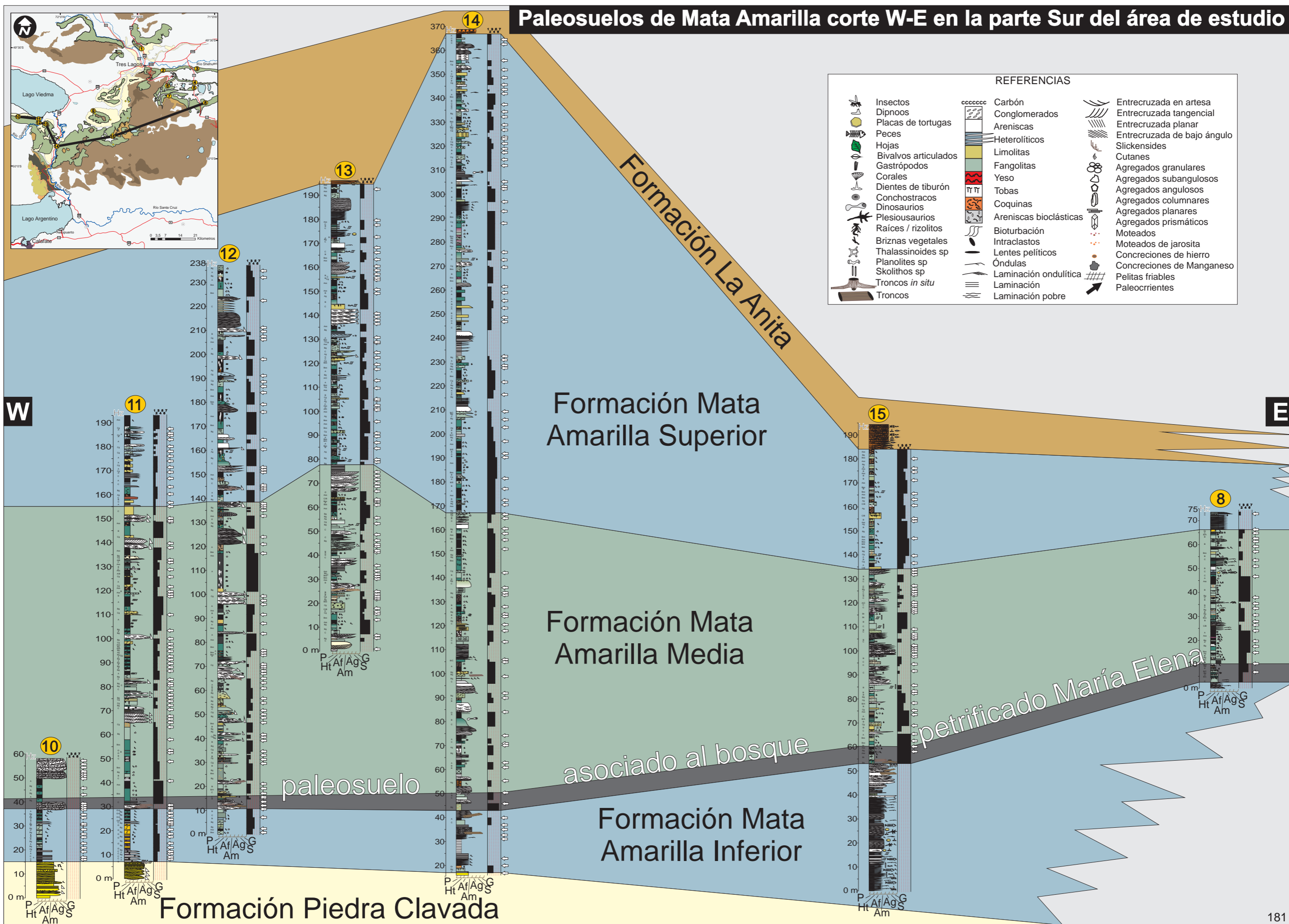
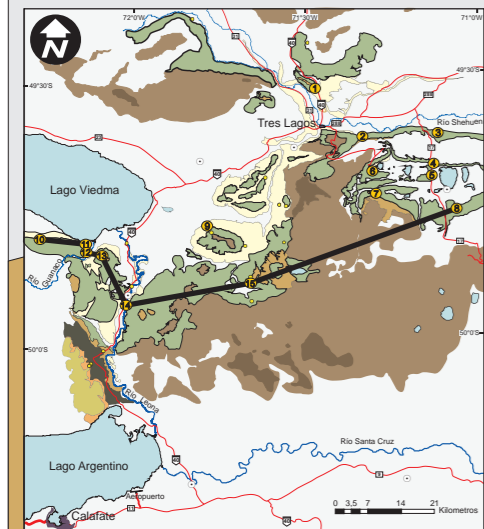


al bosque petrificado María Elena

REFERENCIAS					
	Insectos		Carbón		Entrecruzada en artesa
	Dipnoos		Conglomerados		Entrecruzada tangencial
	Placas de tortugas		Areniscas		Entrecruzada planar
	Peces		Heterolíticos		Entrecruzada de bajo ángulo
	Hojas		Limolitas		Slickensides
	Bivalvos articulados		Fangolitas		Cutanes
	Gastrópodos		Tobas		Agregados granulares
	Corales		Coquinas		Agregados subangulosos
	Dientes de tiburón		Areniscas bioclásticas		Agregados angulosos
	Conchostracos		Bioturbación		Agregados columnares
	Dinosaurios		Intraclastos		Agregados planares
	Plesiosaurios		Moteados de jarosita		Agregados prismáticos
	Raíces / rizolitos		Concreciones de hierro		Moteados
	Briznas vegetales		Concreciones de Manganeseo		Pelitas friables
	Thalassinoides sp		Paleocrietas		
	Planolites sp				
	Skolithos sp				
	Troncos <i>in situ</i>				
	Troncos				
			Laminación ondulítica		
			Laminación		
			Laminación pobre		

Lámina 5.26

Paleosuelos de Mata Amarilla corte W-E en la parte Sur del área de estudio



REFERENCIAS

	Insectos		Carbón		Entrecruzada en artesa
	Dipnoos		Conglomerados		Entrecruzada tangencial
	Placas de tortugas		Areniscas		Entrecruzada planar
	Peces		Heterolíticos		Entrecruzada de bajo ángulo
	Hojas		Limolitas		Slickensides
	Bivalvos articulados		Fangolitas		Cutanes
	Gastrópodos		Yeso		Agregados granulares
	Corales		Tobas		Agregados subangulosos
	Dientes de tiburón		Coquinas		Agregados angulosos
	Conchostracos		Areniscas bioclásticas		Agregados columnares
	Dinosaurios		Bioturbación		Agregados planares
	Plesiosaurios		Intraclastos		Agregados prismáticos
	Raíces / rizolitos		Lentes pelíticos		Moteados
	Briznas vegetales		Óndulas		Moteados de jarosita
	Thalassinoides sp		Laminación ondulítica		Concreciones de hierro
	Planolites sp		Laminación		Concreciones de Manganeso
	Skolithos sp		Laminación pobre		Pelitas friables
	Troncos in situ				Paleocrietas
	Troncos				

paleosuelo

asociado al bosque

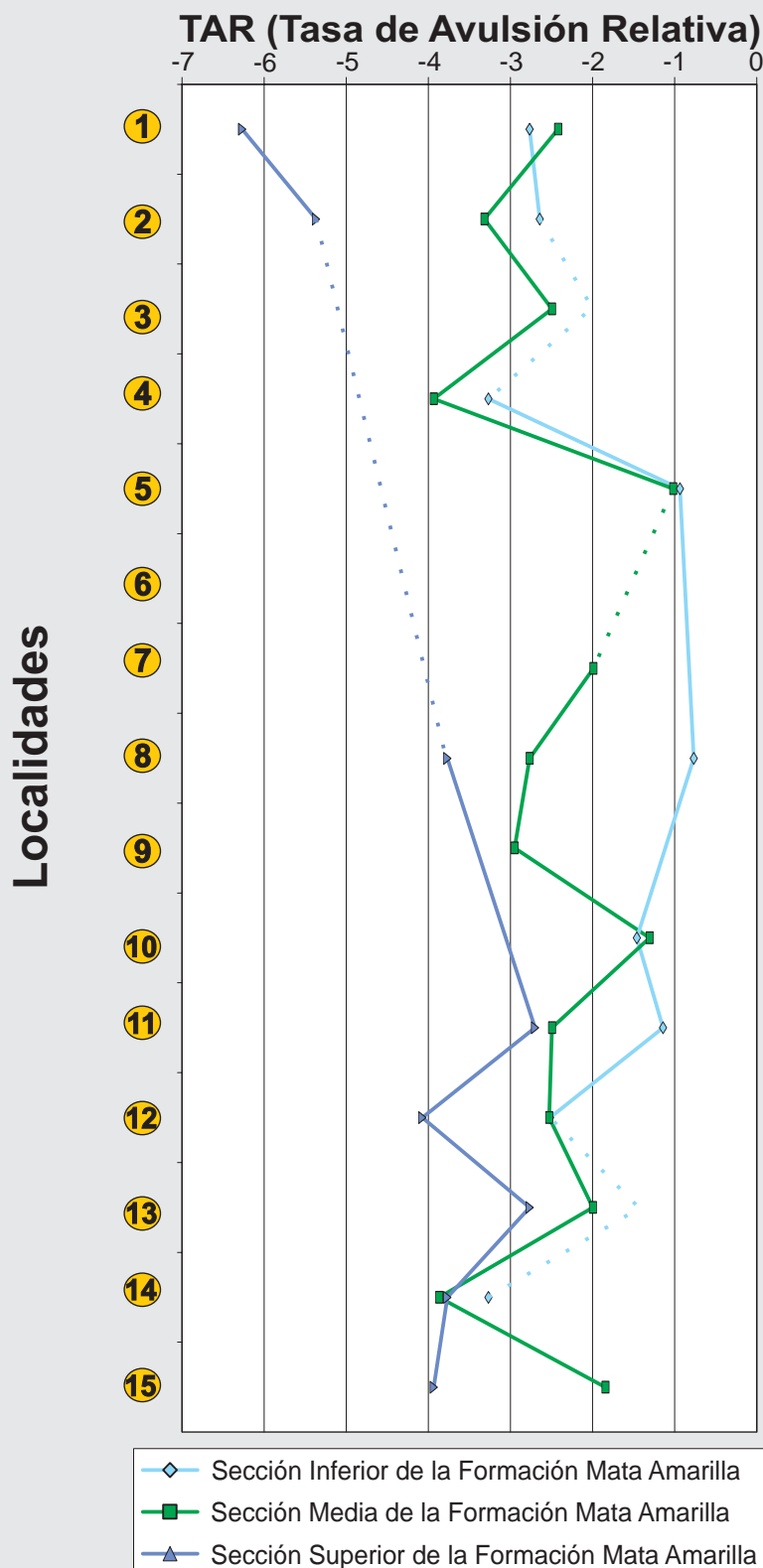
petrificado María Elena

Las variaciones en los espesores sedimentarios tienen un correlato en las frecuencias de avulsiones, en la localidad 1 se detectaron 38 avulsiones, mientras que en la localidad 14, las avulsiones totales detectadas fueron 83. Por su parte se realizó una cuantificación de las avulsiones para cada una de las secciones de la formación en cada una de las localidades estudiadas.

Así se midió el espesor de cada una de las secciones y se lo dividió por el número de avulsiones presentes, obteniéndose un número negativo adimensional al que se denominó **Tasa de Avulsión Relativa** [TAR = - (espesor / N° de avulsiones)].

Mediante la utilización de una planilla de cálculo se realizó un ploteo de los valores de TAR para cada sección en cada localidad (Lámina 5.28). Como se puede observar en la lámina, las frecuencias de avulsión son mayores en la sección inferior de la Formación Mata Amarilla, disminuyen en la sección media y disminuyen más aún en la sección superior, aunque esta última no cuente con datos en todas las localidades debido a la falta de afloramientos.

Tasas de avulsiones relativas (TAR) de Mata Amarilla



En este gráfico se muestran los valores de TAR (tasa de avulsión relativa) los cuales se calculan dividiendo los espesores de cada una de las secciones de la Formación Mata Amarilla por el número de avulsiones presentes en cada sección. $TAR = - (\text{espesor} / N^{\circ} \text{ de avulsiones})$.

En el eje de las Y se muestran cada una de las localidades del área de estudio. Como se puede observar las frecuencias de avulsiones son mayores en la sección inferior, disminuyen en la sección media y disminuyen más aún en la sección superior, aunque esta última no cuente con datos en todas las localidades debido a la falta de afloramientos.