



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

DEGRADACIÓN DEL SUELO POR ACTIVIDADES PECUARIAS  
EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS TUXTLAS, VERACRUZ

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGO

P R E S E N T A :

MIGUEL HERNÁNDEZ ALVA

ASESOR:

DR. PAVEL KRASILNIKOV VLADIMIROVICH



FACULTAD DE  
CIENCIAS

2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mi madre, y a mis hermanos y hermanas  
de sangre, nación y corazón*

*Quiero agradecer a:*

*A mi hermano Adrián por el soporte otorgado para la realización del presente sueño.*

*A mis tres grandes amigos Horacio, Rocío y Ramces, que con su invaluable apoyo y ayuda hicieron posible la realización de este sueño, sin ellos hubiese sido imposible de lograr.*

*A Nirani, por su apoyo incondicional, comprensión y horas dedicadas a escuchar a este gran loco sin remedio.*

*A todos mis amigas y amigos de generación y de otras generaciones de la Facultad de Ciencias: Dayenari, Daniela, Hilda, Claudia, Daya, Guillermo M., Jorge, Karla, Candy, Abraham, Sergio, Pablo, Jimena, Hugo, Juan Pablo, Alberto Díaz, Alberto Romo, Silvia, Jesús, Alejandra, Xochitl, Guillermo Lacy, Carlos Durán, Carlos Daniel, Cristóbal, Vania, Oliver, Dulce, Víctor y a todos aquellos que están, estuvieron y ahora no están conmigo.*

*A mis inseparables amigos de Universum: Michel, Adriana, Isabel, Diana, Josué, Fabiola, Lucía, Gazde, Lucía, Uriel, Israel, J. J., Miriam, Miguel Monroy, Karla, Ana, Verónica, Hapus, los demás inseparables y a los jefes.*

*A la M. en C. Elizabeth y M. en C. Ma. del Socorro del Laboratorio de Edafología “Nicolás Aguilera” de la Facultad de Ciencias.*

*A Biól. Jaime Díaz, Biól. Yasmín Rivera, Dra. Ernestina Vallejo y Dr. Sergey Sedov del Laboratorio de Edafología, Instituto de Geología.*

*A la Dra. Pilar Ortega y M. en C. Mónica Rangel del Microcosmos Edáfico del Instituto de Geología por las enseñanzas que me dejan y el apoyo técnico otorgado en dos años de trabajo.*

*A mis amigos: Horacio, Vicente, Neri, Felipe, Betzy, Rosa, Mónica, Bárbara, Joaquín, Octavio, Wendy, Isabel, Marisela, Marisela, Dalía, Fernando y al Dr. Víctor Chávez del Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales del Jardín Botánico por su tiempo y vivencias compartidas que fueron y son de gran importancia en mi formación como persona y como científico.*

*A amigos y compañeros: Dr. Antonio Zainos, Manuel, Luís, Rogelio, Liliana y Dr. Romo del Instituto de Fisiología Celular, UNAM.*

*A mis maestros de la carrera, a quienes debo mucho de mis conocimientos y quienes forjaron en mí la pasión por la investigación científica.*

*A Brisa por su apoyo y cariño que siempre me acompañan.  
Tú sabes lo importante que eres para mí*

*Especial agradecimiento a:*

*La Dirección General de Apoyo al Personal Académico, DGAPA, por su apoyo a través del proyecto PAPIIT número IN216906-3.*

*A mis asesores: Dr. Pavel Krasilnikov y Dra. Norma García Calderón por confiar en mí para la realización de este trabajo.*

*Todo el personal de la Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas, por su apoyo durante las salidas a campo y la gran ayuda otorgada para hacer posible este estudio.*

*A Domingo Sinaca y Gregorio Hernández por permitir la realización de este estudio en sus respectivas propiedades.*

*A mis sinodales Dra. Ma. del Socorro Lozano, M. en C. Ana Claudia Sánchez y M. en C. Iván Castellanos.*

## ÍNDICE

|  | <i>Página</i> |
|--|---------------|
| RESUMEN.....   | 1             |
| ABSTRACT.....  | 2             |
| INTRODUCCIÓN.....  | 3             |
| Planteamiento del problema.....                            | 6             |
| Antecedentes.....  | 7             |
| Justificación.....   | 14            |
| OBJETIVOS E HIPOTESIS.....                                 | 15            |
| Objetivo general.....                                      | 15            |
| Objetivos particulares.....                                | 15            |
| Hipótesis.....   | 15            |
| MATERIALES Y MÉTODOS.....                                  | 16            |
| Descripción de la Zona.....                                | 16            |
| 1. Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas.....                 | 16            |
| 2. Zona de Estudio.....                                    | 17            |
| Planeación, Muestreo y Técnicas.....                       | 19            |
| 1. Trabajo de gabinete.....                                | 19            |
| 2. Trabajo de campo.....                                   | 21            |
| 3. Trabajo de laboratorio.....                             | 21            |
| 4. Determinación de Índices de Calidad del Suelo, FCC..... | 24            |
| 5. Análisis Estadísticos.....                              | 28            |
| RESULTADOS.....  | 29            |
| Descripción de Perfiles.....                               | 29            |
| Determinación de Índices de Calidad del suelo.....         | 65            |
| Análisis de muestras superficiales.....                    | 67            |
| DISCUSIÓN.....   | 72            |
| CONCLUSIONES.....  | 87            |
| APÉNDICE.....  | 89            |
| LITERATURA CITADA.....                                     | 105           |

## ÍNDICE DE CUADROS

| #  | <i>Descripción</i>  | <i>Página</i> |
|----|---|---------------|
| 1  | Pruebas químicas y físicas realizadas a las muestras de edafológicas.....             | 22            |
| 2  | Categorías del Sistema FCC, Ver. 4.....   | 25            |
| 3  | Descripción del perfil y pruebas físicas del Andosol vítrico, SAP-M, sitio 1.....     | 31            |
| 4  | Pruebas físicas y químicas del Andosol vítrico, SAP-M, sitio 1.....                   | 31            |
| 5  | Porcentajes de vidrio volcánico, del Andosol vítrico de la SAP-M, sitio 1.....        | 35            |
| 6  | Descripción del Horizonte Orgánico del Andosol vítrico de la SAP-M, sitio 1.....      | 36            |
| 7  | Propiedades químicas y físicas del Andosol vítrico de la SAP-M, sitio 1.....          | 36            |
| 8  | Descripción del perfil y pruebas físicas del Andosol vítrico del PA-8, sitio 1.....   | 40            |
| 9  | Pruebas físicas y químicas del Andosol vítrico, PA-8, sitio 1.....                    | 40            |
| 10 | Porcentajes de vidrio volcánico, del Andosol vítrico del PA-8, sitio 1.....           | 41            |
| 11 | Propiedades químicas y físicas del perfil de Andosol vítrico del PA-8, sitio 1.....   | 44            |
| 12 | Descripción del perfil y pruebas físicas del Andosol vítrico de la SS, sitio 2.....   | 48            |
| 13 | Pruebas físicas y químicas del Andosol vítrico de la SS, sitio 2.....                 | 48            |
| 14 | Porcentajes de vidrio volcánico del Andosol vítrico de la SS, sitio 2.....            | 52            |
| 15 | Descripción de Horizonte Orgánico, del Andosol vítrico de la SS, sitio 2.....         | 53            |
| 16 | Propiedades químicas y físicas del Andosol vítrico de la SS, sitio 2.....             | 53            |
| 17 | Descripción del perfil y pruebas físicas del Andosol vítrico del PA-15, sitio 2.....  | 58            |
| 18 | Pruebas físicas y químicas del Andosol vítrico del PA-15, sitio 2.....                | 58            |
| 19 | Porcentajes de vidrio volcánico del Andosol vítrico del PA-15, sitio 2.....           | 62            |
| 20 | Propiedades químicas y físicas del Andosol vítrico del PA-15, sitio 2.....            | 63            |
| 21 | Índices de Calidad del suelo obtenidos por el sistema FCC.....                        | 65            |
| 22 | Índices Externos de Calidad del suelo analizados con la prueba ROC ( $P < 0.01$ ).... | 67            |
| 23 | Clasificación del Índice von Post.....  | 97            |
| 24 | Ejemplo de cálculo del Índice MWD.....  | 103           |



## ÍNDICE DE FIGURAS

| #      | Descripción  | Página |
|--------|--|--------|
| I      | Dinámica de conversión, dinámica en potreros e impactos en el suelo.....       | 4      |
| II     | Mapa de la zona de estudio.....  | 20     |
| III    | Perfil de Andosol vítrico de SAP-M, Sitio 1.....                               | 30     |
| IV     | Microfotografías <i>Horizonte A</i> .....                                      | 32     |
| V      | Microfotografías <i>Horizonte 2A</i> .....                                     | 33     |
| VI     | Microfotografías <i>Horizonte 2Bw</i> .....                                    | 34     |
| VII    | Microfotografías.....  | 35     |
| VIII   | Perfil de Andosol vítrico de PA-8, Sitio 1.....                                | 39     |
| IX     | Microfotografías <i>Horizonte Ap</i> .....                                     | 41     |
| X      | Microfotografías <i>Horizonte 2Bw</i> .....                                    | 42     |
| XI     | Microfotografías.....  | 43     |
| XII    | Perfil de Andosol vítrico, SS, Sitio 1.....                                    | 47     |
| XIII   | Microfotografías <i>Horizonte O</i> .....                                      | 49     |
| XIV    | Microfotografías <i>Horizonte A</i> .....                                      | 50     |
| XV     | Microfotografías <i>Horizonte BwI</i> .....                                    | 51     |
| XVI    | Microfotografías.....  | 51     |
| XVII   | Perfil de Andosol vítrico del PA-15, Sitio 1.....                              | 57     |
| XVIII  | Microfotografías <i>Horizonte Ap</i> .....                                     | 59     |
| XIX    | Microfotografías <i>Horizonte A2</i> .....                                     | 60     |
| XX     | Microfotografías <i>Horizonte BwI</i> .....                                    | 61     |
| XXI    | Microfotografías.....  | 62     |
| XXII   | Resistividad superficial.....  | 68     |
| XXIII  | CIC superficial.....   | 69     |
| XXIV   | SB superficial.....  | 69     |
| XXV    | Cationes Intercambiables en la capa superficial, Andosol vítrico, sitio 1..... | 70     |
| XXVI   | Cationes Intercambiables en la capa superficial, Andosol vítrico, sitio 2..... | 70     |
| XXVII  | Porcentaje de Carbono en la capa superficial.....                              | 71     |
| XXVIII | Correlación entre el Índice MWD y el Porcentaje de Carbono.....                | 71     |
| XXIX   | Tasa de Infiltración Instantánea a un minuto.....                              | 72     |

**Hernández-Alva, M. 2008. Degradación del suelo por actividades pecuarias en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, Veracruz. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 108 p.**

## **RESUMEN**

Actualmente, las Selvas Tropicales Húmedas de México están siendo deforestadas a una velocidad sin precedente, principalmente para el establecimiento de regiones ganaderas o pecuarias. La Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas es uno de los sitios más afectados por este proceso de cambio de uso de suelo y al mismo tiempo, es una de las Zonas Prioritarias de Conservación en México. El objetivo de este trabajo es determinar el grado de degradación de los suelos por su cambio de uso de forestal a pastizal. Para esto, se compararon diferentes propiedades físicas y químicas de los suelos de dos sitios al norte de la Reserva, a través del sistema FCC (Fertility Capability Soil Classification) y se utilizaron tres índices de calidad externos (Tasa de Infiltración, Penetrabilidad, y Estabilidad de Agregados). Las secuencias de usos de suelo que se compararon fueron selva madura-pastizal (sitio 1) y selva secundaria-pastizal (sitio 2).

Los suelos de ambos sitios presentaron un desarrollo incipiente a partir de materiales volcánicos ricos en minerales intemperizables y fueron clasificados como: Andosoles Víttricos. El sitio 1 fue localizado aproximadamente a 1.5 km de la costa y el suelo mostró una notable influencia del *brisa marina* que ha generado aportes considerables de Na y minerales de origen metamórfico; ese sitio presentó los niveles más bajos de C orgánico y cationes; el pH<5.5 ha provocado toxicidad por Al y Mn y se encontró que el proceso de lavado de bases es más pronunciado que en el sitio 2. En tanto que, el sitio 2, fue localizado aproximadamente a 9 km de la costa y el suelo se caracterizó por una gran riqueza de C orgánico y cationes; no mostró deficiencias de nutrientes ni toxicidad por Al debido al pH>5.5. Los Índices de Calidad del sistema FCC indicaron que no existe degradación física o química de los suelos de la zona de estudio e incluso se podría decir que la instalación de los pastizales produce mejoras en la fertilidad de los suelos más que degradación. Por la Tasa de Infiltración es posible que los problemas de deterioro de los suelos sean más físicos que químicos y estos escapen a lo que puede analizar el sistema FCC.

Los Índices de Calidad mostraron que los pastizales tienden a ser más ricos en bases y carbono orgánico. En el sitio 2, en la selva secundaria se observaron mejorías en las propiedades físicas y químicas comparadas con las del pastizal. No fueron encontradas evidencias de compactación por el pisoteo del ganado dentro de los pastizales, sin embargo, se presentó una reducción de Tasa de Infiltración >70% con respecto a las zonas forestales. El Índice MWD fue ligeramente más alto en los pastizales (menor estabilidad) pero sin diferencias significativas con respecto a las zonas forestales y existió una tendencia a disminuir el valor de este índice con el incremento del contenido de Carbono orgánico, afectando directamente la estabilidad de los agregados de forma positiva.

Los valores altos de humedad, cationes y C orgánico presentes en la zona de selva secundaria del sitio 2 pueden ser tomados en cuenta para proponer a la especie pionera *Cecropia obtusifolia* como mejorador de suelos en zonas perturbadas.

**Hernández-Alva, M. 2008. Degradación del suelo por actividades pecuarias en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, Veracruz. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 108 p.**

## **ABSTRACT**

Nowadays, tropical rain forest deforestation in Mexico has no historical precedent, the land-use change is mainly for establishing pasture-lands. The Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas is one of the most affected areas by land-use change process and at the same time is one of the Priority Zones of Conservation in Mexico. The goal of this work was to assess the degree of degradation of soil due land-use change of forest into pastures. Methodology includes comparison between several physical and chemical features of the soil in two representative sites at the north of the Reserva. Fertility Capability Soil Classification System (FCC) was used with other three Soil Quality Indicators (Infiltration Rate, Penetrability and Aggregate Stability). Compared land use sequences were mature tropical rain forest-pasture (site 1) and secondary forest (site 2).

Soils of both two sites showed an incipient development from volcanic ashes rich in minerals and were classified as vitric Andosols. The site 1, was located ~ 1.5 km of the coast and it had low concentrations of organic carbon and cations (Na, K, Ca and Mg). pH < 5.5 related to Al toxicity. It showed *marine spray* influence due Na and mineral evidences and showed a leaching process stronger than site 2. While site 2, located ~ 9 km of the coast was the most fertile with high concentrations of organic carbon and cations, pH > 5.5 and no toxicity evidences were found. FCC Soil Quality Indicators found no physical or chemical degradation of soils, but physical and chemical features seem to indicate that pasture installation can bring improvements to the soil instead degradation. Maybe, soils had more physical degradation than chemical, due infiltration rate, but this escape to the capability of the FCC system.

Soil Quality Indicators showed that pasturelands can be more fertile due cations and organic carbon concentrations. In the site 2, secondary forest was better than pasture due high organic carbon contents, lower bulk density and higher moisture content. No evidences of compaction through cattle trampling was found, nevertheless, it was found that infiltration rate dropped > 70% in pastures from mature and secondary forest levels. The MWD Index was higher in both pasture (less stability) but no significant differences were found compared with mature forest and secondary forest. The correlation between MWD index and organic carbon percentage showed that if the organic carbon increases, then the MWD index decreases, affecting directly the aggregate stability positively.

The increase of organic carbon, cations and moisture content found in the secondary forest (site 2) can be taken for suggesting to *Cecropia obtusifolia* as a plant capable to improve soil conditions in disturbed zones.

# INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 40 años, la deforestación de las selvas tropicales húmedas en México ha logrado acabar con más del 95% de la superficie original, con una tasa anual que oscila entre el 2 y 4% (Dirzo y García, 1992; Durand y Lazos, 2004). Siendo los estados de Veracruz, Chiapas y Tabasco, los más afectados (Estrada y Coates-Estrada, 2000). La conversión de las selvas tropicales húmedas es principalmente para el establecimiento de nuevas zonas de agricultura y ganadería siguiendo el proceso común de *roza-tumba y quema* (Durand y Lazos, 2004).

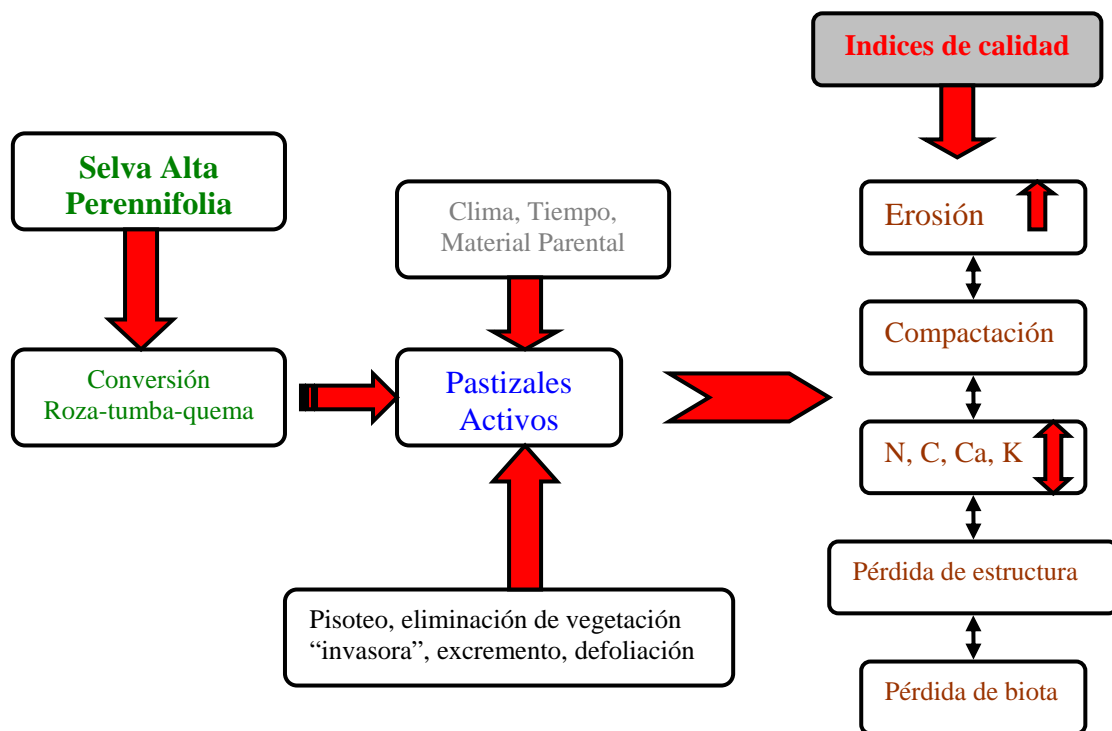
A menudo, las tierras cultivadas por dos o cuatro ciclos de maíz son abandonadas o convertidas a pastizales de especies nativas o introducidas (González Soriano *et al.*, 1997). La secuencia de cambio de uso de suelo está determinada por las condiciones edáficas, climáticas y económicas imperantes en el tiempo y lugar determinados, ocasionando diferentes respuestas en el ambiente (Figura I), entre ellas la pérdida de biodiversidad y degradación del suelo (González Soriano *et al.*, 1997).

Las actividades de un pastizal tropical activo incluyen: la defoliación de los pastos, pisoteo, depositación de estiércol, el chapeo o corte de vegetación secundaria o invasora y en algunos casos la aplicación de fertilizantes, herbicidas e insecticidas. La combinación de ambas tiene repercusiones en las propiedades físicas y químicas del suelo en cuestión (Figura I). Teniendo diferentes respuestas y capacidad de recuperación en función del tipo de suelo, los impactos serán reflejados en la calidad de los mismos.

La calidad del suelo, se define como las funciones del suelo para otorgar de nutrientes y otras condiciones fisico-químicas necesarias para el crecimiento de las plantas, promover y sostener la producción de cultivos, proveer de hábitats a los organismos del suelo, disminuir la

contaminación ambiental, resistir la degradación y mantener o mejorar la salud animal y humana (Mulugeta, 2004).

La degradación de los suelos es el proceso de deterioro progresivo de las variables biológicas (flora y fauna), físicas y químicas (humedad, cationes, microclimáticas, entre otras) de los mismos (Figura I), conduciendo a la declinación de la productividad y al rendimiento no sustentable (Mulugeta, 2004).



**Figura I.** Dinámica de conversión, dinámica en potreros e impactos en el suelo (Hernández-Alva, M. 2008).

Así, la Degradación de la Calidad del Suelo puede ser medida a través de propiedades sensibles al cambio en los primeros 30 cm de suelo mineral, esas propiedades son conocidas como Índices de

Calidad, tales como la Cantidad de Materia Orgánica, Porcentaje de Carbono, Compactación, pH, Cationes, Infiltración, entre otras. (Sánchez *et al.*, 2003).

La forma común de evaluar la degradación de los suelos se hace tomando en cuenta un sitio forestal bien conservado para estudiar si sus propiedades cambian o no en función de otros sitios con diferentes usos de suelo, pero es importante determinar primero que ambos sitios cuenten con el mismo tipo de suelo para evitar errores de interpretación.

La evaluación de los índices de calidad de los suelos de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas ante el acelerado cambio de uso de suelo es de gran utilidad para determinar el grado de impacto que tienen las actividades pecuarias o ganaderas en ese elemento vital del ecosistema y este conocimiento tiene como fin hacer un mejor uso del mismo y a su vez la conservación.

## **Planteamiento del problema**

En los últimos 30 años, la conversión de zonas originalmente ocupadas por selvas altas perennifolias hacia pastizales o zonas de cultivo ha sido un fenómeno predominante en la ahora Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas. A últimas fechas, las áreas deforestadas tienen como destino principal el convertirse en pastizales de mediana o poca productividad (a menudo 0.5 cabezas/ha). Sin embargo, aún cuando se trate de zonas de poca productividad, no deben descartarse efectos adversos en los suelos.

Considerando que la zona es oficialmente un Área Natural Protegida y una de las Zonas Prioritarias de Conservación, es necesario contar con un amplio conocimiento de los procesos naturales e inducidos que ocurren ahí. Dado que en la actualidad, no existen muchos estudios sobre los impactos que genera la ganadería en las propiedades físicas y químicas de los suelos de la zona, el presente trabajo pretende realizar un análisis de ambos tipos de propiedades en 2 sitios representativos de la región norte de la Reserva, para aportar información útil que permita un mejor entendimiento y manejo de uno de los recursos más importantes del ecosistema terrestre más diverso del planeta, la selva alta perennifolia.

## **Antecedentes**

Los cambios que ocurren en suelo a partir de la conversión de las selvas tropicales húmedas a pastizales han sido estudiados durante las últimas décadas debido a la gran velocidad a la que está ocurriendo dicho proceso, a los efectos adversos que este tiene sobre la biodiversidad del planeta y sobre la economía de las zonas involucradas (Dirzo y García, 1992; Durand y Lazos, 2004; Álvarez-Sánchez y Naranjo-García, 2003). Sin embargo, en los últimos años muchos de los estudios se han realizado también con el interés de cuantificar los aportes de gases de efecto invernadero que se liberan a la atmósfera y que a su vez están involucrados en el Calentamiento Global (Conant *et al.*, 2001).

La mayoría de los estudios coinciden en que la cantidad de Carbono orgánico en suelo es una de las propiedades más sensibles al cambio de uso, debido a la gran influencia que tiene sobre la fertilidad y salud de los suelos, por lo que no es raro encontrar que esta es una de las variables más estudiadas (Conant *et al.*, 2001; Feller y Beare, 1997). Otras propiedades estudiadas de igual importancia y a veces menos sensibles son la Saturación de Bases (Numata *et al.*, 2007), Capacidad de Intercambio Catiónico (Numata *et al.*, (2007; Mulugeta, 2004), Compactación (Batey y McKenzie, 2006), Densidad Aparente (García-Oliva *et al.*, 1999) y en algunos estudios también se han incluido análisis para evaluar la Estabilidad de Agregados (García-Oliva *et al.*, 1999; Greenwood y Mckenzie, 2001) y la Tasa de Infiltración (Zimmermann *et al.*, 2006), por ser propiedades que afectan o se ven afectadas directamente por las otras propiedades arriba mencionadas y por tener profundos efectos en el funcionamiento y salud del suelo.

Hasta ahora se ha mencionado que el cambio de uso de suelo puede ocasionar algunos efectos adversos sobre las propiedades de los mismos, pero la magnitud y la dirección de los cambios puede ser dividida en tres diferentes clases: 1) cambios negativos o degradación, 2) sin



cambios o no significativos y 3) cambios positivos o mejorantes. A continuación se documentan estas categorías:

#### 1) Cambios negativos o degradación

Son aquellos que se traducen en la disminución de Porcentaje de Carbono orgánico, Bases Intercambiables, Capacidad de Intercambio Catiónico, Porosidad, Tasa de Infiltración y Estabilidad de los Agregados (Mulugeta, 2004; García-Oliva *et al.*, 1999). Pero también se incluye el aumento en la Densidad Aparente y en la Compactación. Ejemplos de este tipo de cambios son los que encontramos en un estudio realizado en un bosque tropical deciduo de México, donde García-Oliva *et al.*, (1999), reporta que la conversión a pastizales trae consigo un decremento de 28 al 31% de Carbono orgánico en los primeros 5 cm de suelo transcurridos 10 años desde la conversión. Dicho decremento se relacionó con la también disminución en la estabilidad de los agregados en capas superficiales.

En otro estudio, Templer *et al.*, (2005), estudiaron el efecto del cambio de uso en suelos calcáreos arcillosos de la Republica Dominicana y reportan mayores concentraciones de cationes en bosques testigos (bosques subtropicales mesófilos), seguidos por los pastizales abandonados y sitios con sucesión secundaria, y por último los pastizales activos con los valores cinco veces más bajos que los abandonados. El pH, Humedad y la materia orgánica fueron más altos en el bosque que en los sitios de vegetación secundaria, agricultura y pastizales. Finalmente, la Densidad Aparente aumentó significativamente en sitios de agricultura comparados con los sitios forestales. No encontraron diferencias significativas entre el bosque maduro y el secundario en cationes ni actividad microbiana, pero sí en el potencial de denitrificación que fue más bajo en el bosque maduro. Con los datos de materia orgánica predijeron que serían necesarios 9 años posteriores al abandono de los pastizales para que éstos recobraran los almacenes de carbono de un bosque maduro.

## 2) Sin cambios o no significativos

Son aquellos casos en que el cambio de uso de suelo no ocasiona grandes cambios en ninguna propiedad o donde los análisis estadísticos no muestran diferencias significativas, muy a menudo por la alta variabilidad de las muestras tomadas (Mulugeta, 2004).

Un ejemplo lo da el estudio en Los Tuxtlas realizado por Hughes *et al.*, (1999), ya que concluyen que los almacenes de C, N y S en el suelo no cambian significativamente con el tipo de uso, ni con el tiempo de uso transcurrido (3 a 45 años), situación que se ve reflejada en ninguna diferencia significativa en los valores de Densidad Aparente. En contraste, la conversión a pastizales o agricultura conduce a la pérdida del 95% del total de la biomasa vegetal sobre el suelo, presente principalmente en el componente arbóreo.

En su otro artículo de la misma zona, Hughes *et al.*, (2000), concluyen que los almacenes de carbono en suelo de diferentes etapas de sucesión secundaria y en pastizales no cambian significativamente aún después de grandes periodos de tiempo de uso y abandono (1 a 30 años y 0.5 a 50 años, respectivamente). También que la biomasa sobre el suelo en sitios de pastizales se recupera rápidamente después del abandono, tomándole a la vegetación secundaria aproximadamente 73 años para alcanzar la biomasa semejante a un bosque maduro. Finalmente, indica que el poco o nulo impacto del tipo de uso sobre los suelos se debe a las propiedades intrínsecas de los mismos suelos, que previamente fueron clasificados como Andosoles vítricos.

## 3) Cambios positivos o mejorantes

Son más comunes en pastizales del trópico y son aquellos que se reportan como incrementos en los valores de propiedades como Carbono orgánico, cationes y decrementos en la acidez, pero contradictoriamente suelen estar acompañados por incrementos en la Densidad Aparente e incluso por disminución en Porosidad (Mulugeta, 2004; Reiners *et al.*, 1994). Tal como lo

reportan Reiners *et al.*, (1994), quienes estudiaron Inceptisoles y Ultisoles de selva alta perennifolia en Costa Rica y encontraron que el cambio de uso de suelo se ve reflejado en una pérdida de 50% del carbono forestal, aunque no se encontraron diferencias significativas entre usos de suelo por la alta variabilidad de las muestras y al poco tiempo de uso, los niveles de carbono en pastizal alcanzaron o superaron los del bosque maduro aún después de 36 años. Sin embargo, cuando los pastizales fueron abandonados y se secundarizaron hubo un aumento significativo de carbono por la alta productividad y depositación de hojarasca de las comunidades secundarias. Detectaron decrementos en los niveles de nitrógeno disponible en pastizales, decrementos en la Acidez Extractable, aumento de Fe extractable, K intercambiable en el horizonte A y en la saturación de bases en el horizonte B subyacente. La Capacidad de Intercambio Cationico efectiva fue más alta en el bosque por efecto de la gran acidez, no obstante por las bases más altas los pastizales resultaron ser más fértiles. En lo que se refiere a la Densidad Aparente, reportan aumentos y la consecuente disminución de porosidad en pastizales por efecto del pisoteo del ganado.

Por su parte, Islam y Weil (2000) en un estudio realizado con Acrisoles encontraron que los contenidos de Carbono orgánico de los pastizales fueron más altos que en bosques maduros, en una zona de bosque tropical deciduo de Bangladesh. Concluyen que el establecimiento de los pastos y vegetación herbácea mejora los contenidos de carbono y la estabilidad estructural de los suelos por el efecto mecánico de tipo agregativo o aglomerante por parte de las raíces e hifas de hongos asociados simbióticamente a las raíces de las plantas, y a la acumulación de polisacáridos y cementantes (exudados radicales del pasto) que también ayudan a la estructura del suelo para ser más resistente.

También, Conant *et al.*, (2001), reportan que los pastizales tienden a presentar una gran cantidad de materia orgánica, lo que supone una gran fuente de nutrientes para las plantas,

incrementando la agregación del suelo, limita la erosión y también incrementa la Capacidad de Intercambio Catiónico y retención de Humedad. Estos autores explican que en pastizales tropicales es muy común que los almacenes de carbono alcancen niveles superiores a los forestales y que las grandes pérdidas de carbono en suelo se deben a la naturaleza misma de los suelos, al mal manejo o sobreexplotación y a la pobreza inicial de carbono en las capas superficiales. De tal forma que, la parte más afectada del ecosistema es la biomasa sobre el suelo, a menudo eliminada por completo durante la conversión.

Greenwood y Mckenzie (2001), reportan que la instalación de pastizales acarrea incrementos en los valores de materia orgánica en el suelo (por restos vegetales y eventual depositación de excrementos del ganado), Biomasa Microbiana, Estabilidad de Agregados por acción mecánica de las raíces e hifas asociadas y que incluso ayuda a mantener alta la Tasa de Infiltración. También reportan que el efecto de la Compactación a menudo no se refleja en la medición de la Densidad Aparente, y que a su vez la Compactación es mayor cuando el pisoteo ocurre con el suelo húmedo o saturado, afectando a su vez la Estabilidad de los Agregados, creando dispersión de las partículas. Estos autores mencionan que en pastizales sobrepastoreados la compactación es más severa y la Tasa de Infiltración disminuye de 25 a 50% comparando con zonas no pastoreadas. Finalmente, comentan que la disminución de la Infiltración lleva eventualmente a la pérdida de suelo por erosión, a la pérdida de nutrientes y al decremento de agua disponible para las plantas, aunque se ha visto que la Tasa de Infiltración puede recuperarse en un periodo de 6 meses o en 2.5 años si se deja al pastizal sin actividad.

Houghton y Goodale (2004), encontraron que los niveles de Carbono orgánico en el suelo posterior al clareo descienden de 25 a 30% en zonas de cultivo y aumentan un promedio de 10% en pastizales, aún a un metro de profundidad. Tales resultados se deben a que en zonas cultivadas, la labranza de la capa superficial destruye la estructura del suelo someténdola a

erosión predominantemente hídrica y dejando a la materia orgánica expuesta a la acción destructiva de microorganismos. Estos últimos procesos normalmente se ven atenuados en pastizales por la ausencia de labranza y cobertura casi total por el follaje de los pastos, que al descomponerse o ser depositados en forma de excremento, aumentan el carbono en el suelo. Los autores mencionan, que siempre inmediatamente después del aclareo por roza-tumba-quema hay una caída de los almacenes de carbono en el suelo y una posterior recuperación cuando los pastos se establecen en el lugar. Esto se debe a que en las etapas tempranas del establecimiento de los pastos, la cobertura es escasa y la erosión arrastra muchas partículas de los horizontes superficiales hacia otras zonas de baja pendiente. Finalmente, comentan que la recuperación de los almacenes de carbono en el suelo dependerá del tipo de suelo, del clima, de la intensidad del uso y de las especies de pastos utilizadas.

En un estudio muy particular procedente de Brasil, Numata *et al.*, (2007), reportan incrementos post-clareo de pH, Ca, K y Saturación de Bases y reducción de acidez en cronosecuencias de pastizales instalados sobre Alfisoles, Ultisoles y Oxisoles. Aunque con el incremento de la edad de los pastizales se presentaron decrementos en pH, Ca, y Saturación de Bases, sobre todo en Ultisoles. Resalta una respuesta temporal diferencial con cada tipo de suelo, es decir, en los Alfisoles más ricos en nutrientes el cambio fue más significativo y en los Oxisoles más pobres los cambios fueron poco significativos en función de la edad del pastizal. La dinámica del Al fue poco sensible al cambio de uso de suelo en los Alfisoles; en los Oxisoles y Ultisoles ricos en Al, la reducción fue más drástica. Reportan Oxisoles forestales más ácidos y más pobres en bases, mientras que los Alfisoles y Ultisoles tuvieron más cationes, saturación de bases y pH más altos. No se registraron cambios significativos en Carbono orgánico y Mg y no se encontró relación clara con el tipo de suelo ni con la edad del pastizal. Finalmente, la Densidad Aparente incrementó rápidamente en Alfisoles post-clareo sin cambios significativos con la edad

de los pastizales, mientras que en Oxisoles y Ultisoles el incremento en la densidad después del clareo y con la edad fue gradual.

Todos estos resultados muestran una gran variabilidad de respuestas en los suelos, principalmente favorecidas por su tipo y sus propiedades intrínsecas que pueden otorgarle a sí mismo los mecanismos para resistir el impacto de la conversión y las actividades pecuarias subsecuentes. También y de manera contraria, estas propiedades pueden favorecer su recuperación (Greenwood y Mckenzie, 2001) en casos de impactos severos, o en sentido contrario, incrementar la degradación e incluso pueden impedir la recuperación natural de los suelos en cuestión.

## **Justificación**

El aporte de información cuantitativa acerca de la calidad de los suelos con uso pecuario y forestal, puede permitir obtener conclusiones acerca de si en realidad existe una degradación de suelos dentro de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas. La degradación de los suelos en general no puede ser entendida de manera integral desde análisis superficiales del mismo, sino que debe complementarse con análisis de perfiles de suelo para tener una idea de qué es lo que está pasando con la dinámica en el subsuelo que pueda afectar al crecimiento y desarrollo de las plantas del lugar. Desde este punto de vista de un análisis integral de los perfiles de suelo en conjunto con los análisis superficiales se podrían vislumbrar estrategias que permitan a largo plazo desarrollar planes de restauración o rehabilitación en los casos de que sean necesarios. En el caso de los suelos de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, la mayoría de los trabajos realizados tienen como sitio común los suelos del predio perteneciente a la Estación de Biología Tropical de la UNAM. Sin embargo, es poca la información hasta ahora generada que indique el estado de conservación o degradación de los suelos fuera de dicho predio.

Es importante resaltar que aunque existe abundante información acerca de los efectos del cambio de uso de suelo en el trópico, estos datos son muy variables y dependen en gran medida del tipo de suelo de que se trate. Por lo que no se pueden extrapolar para el caso de los suelos de la Reserva de Los Tuxtlas, lo que hace absolutamente necesario la realización de este tipo de estudios en específico para la zona, si es que se pretende comprender lo que está ocurriendo con los suelos convertidos a favor de un desarrollo sustentable.

# OBJETIVOS E HIPOTESIS

El objetivo general que se pretende cubrir con el presente trabajo es determinar el grado de degradación de los suelos, provocado por el cambio de uso de suelo de forestal a pecuario en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, Veracruz, México.

Los objetivos particulares derivados del anterior son los siguientes:

1. Realizar la clasificación de los suelos en el sitio de estudio.
2. Estimar los Índices de Calidad de suelos que actualmente tienen uso ganadero o pecuario y uso forestal.
3. Comparar los Índices de Calidad de ambos usos de suelo, en dos sitios dentro de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, Veracruz.

Las Hipótesis que se pretenden probar con este trabajo son:

1. Debido a la proximidad entre la parcela con uso pecuario y la de uso forestal, se espera que los suelos tengan el mismo origen, y por lo tanto, la misma clasificación.
2. Se espera que los Índices de Calidad del suelo sean una guía que manifieste el estado de degradación y conservación de este recurso. Y finalmente,
3. Se espera que los índices de Calidad del suelo sean sustancialmente mayores en la parcela forestal que en la de uso pecuario.



# MATERIALES Y MÉTODOS

## Descripción de la Zona

### *1. Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas*

La Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, se localiza en la porción sur del estado de Veracruz, aproximadamente con las coordenadas: 18° 05' 48''-18° 41' 27'' de latitud norte y 94° 35' 24''-95° 23' 16'' de longitud oeste y cuenta con una superficie de 155 mil 122 hectáreas (González Soriano *et al.*, 1997).

En el interior de Los Tuxtlas, se encuentra una población aproximada de 335, 315 habitantes en los ocho municipios que abarca la Reserva de la Biosfera. En su mayoría, los habitantes ejercen algún tipo presión sobre los recursos de la Reserva, ya sea tradicional o comercial (Ficha Técnica de la Sierra de Los Tuxtlas-Laguna del Ostión, Regiones Terrestres Prioritarias de México, CONABIO (Consultado en [www.conabio.gob.mx](http://www.conabio.gob.mx), 2005).

El 45% de la población se concentra principalmente en los municipios de Santiago Tuxtla, San Andrés Tuxtla y Catemaco. El 85% de las actividades productivas realizadas corresponden a la agricultura y ganadería, 13% a la prestación de servicios de la población y el resto de las actividades son de industria como la tabacalera y la refresquera (2%) (Ficha Técnica de la Sierra de Los Tuxtlas-Laguna del Ostión, Regiones Terrestres Prioritarias de México, CONABIO (Consultado en [www.conabio.gob.mx](http://www.conabio.gob.mx), 2005).

En Los Tuxtlas, actualmente se encuentran establecidos una gran cantidad de terrenos con uso ganadero o pecuario, con producción de ganado porcino y vacuno. El tipo de ganado vacuno que se encuentra en la zona es el cebú, y se encuentran de forma libre dentro de potreros bien definidos y de propiedad ejidal o privada (González Soriano *et al.*, 1997).

El ganado es de mediana o baja calidad (en lo que se refiere a los productos derivados como carne y otros), con poco o mediano uso de tecnología y maquinaria de producción y mediana o baja importancia en el estado, en cuanto a número de cabezas por hectárea (INEGI, 1997).

## *2. Zona de Estudio*

El área de estudio se encuentra comprendida entre las coordenadas: 18° 39' - 18° 35' de latitud norte y 95° 05' - 95° 07' de longitud oeste, dentro del municipio de San Andrés Tuxtla (Figura II).

### *2.1 Clima*

El clima predominante es el cálido húmedo (Af(m)) con lluvias todo el año, temperatura media anual de 27°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C, con una precipitación media anual de 4700 mm. La precipitación varía estacionalmente, con ~ 60% de la precipitación anual entre Junio y Octubre. Con una estación seca relativa entre Marzo y Mayo, cuando la lluvia mensual no excede 150 mm. La temperatura media mensual varía entre 32°C (máximo) durante mediados de verano y 16°C (mínimo) durante Diciembre y Enero (Hughes *et al.*, 1999).

### *2.2 Hidrografía*

Los aportes fluviales están dispuestos radialmente, a causa del descenso de agua desde las cimas de los antiguos volcanes de la zona. Por la zona de estudio, corre el río Máquina, y abundantes riachuelos que descargan su caudal en la planicie. Otros cuerpos de agua importantes son las Lagunas Encantada, Azul y El Zacatal que son alimentadas también por abundantes riachuelos temporales y perennes (Martín-Del Pozzo, 1997).

### 2.3 Geomorfología y Geología

Se caracteriza por ser campo monogenético perteneciente a la formación Filisola, con abundantes estructuras volcánicas predominantemente menores a 250 m, con laderas ondulantes de altas y medianas pendientes, aunque el cerro Vigía tiene una altura de 860 m y el San Martín 1680 m. Estas estructuras tuvieron su origen hace unos 800 a 40 mil años y están formadas por depósitos volcánicos, volcanoclásticos y arenas de composición principalmente basáltica. Las rocas son notablemente ricas en Na, K y Ti, por lo que se les considera alcalinas y hay algunos basaltos calialcalinos en las secuencias más antiguas. Aunque el vulcanismo inicio entre 7 y 2.5 millones de años atrás, el cerro Vigía tuvo una la última erupción hace 2.2 millones de años y el volcán San Martín, tuvo una erupción de ceniza y lava en 1664 y una más violenta en 1793 que cubrió varios cientos de kilómetros cuadrados con ceniza y que se encuentran aún en la zona de estudio (Martín-Del Pozzo, 1997).

### 2.4 Vegetación

La vegetación predominante en el área es la Selva Alta Perennifolia (SAP), hasta la fecha se han cuantificado 2,400 especies de plantas vasculares, con 607 géneros representando 143 familias, 26 de las 41 especies de árboles de más de 18 m de altura presentes en selvas del Golfo y del Caribe; unas 30 especies de plantas posiblemente nuevas para la ciencia (González Soriano *et al.*, 1997; Hughes *et al.*, 1999).

También se encuentran diversas comunidades de bosque secundario de diferente edad sucesional, frecuentemente derivados de la tala no controlada en la región. Además de otras 13 asociaciones vegetales (Estrada y Coates-Estrada, 2000).

## 2.5 Edafología

Los suelos predominantes fueron clasificados como Andosoles vítricos mezclados con cenizas volcánicas, bien drenados y de textura gruesa (Hughes *et al.*, 1999).

Sommer-Cervantes *et al.* (2000), identificaron una asociación de suelos por una zonación altitudinal, en la que se encuentran Andosoles-Cambisoles-Regosoles-Lixisoles-Gleysoles. Esta asociación de suelos se debe a las diferencias altitudinales, a las diferencias de precipitación, al drenaje, al contenido de arcillas y a las diferentes variables topográficas en las que se localizan los suelos.

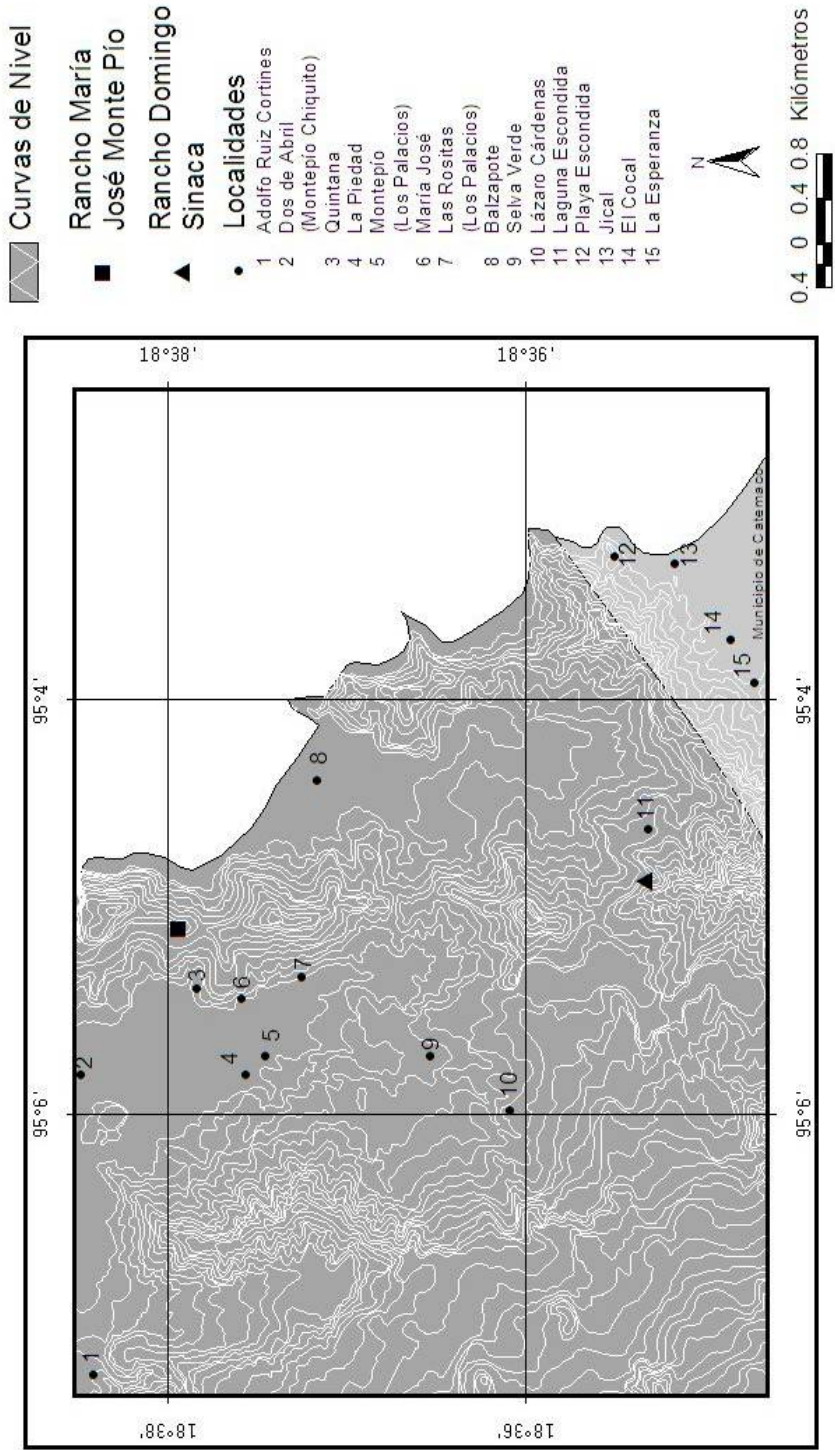
### **Planeación, Muestreo y Técnicas**

#### *1. Trabajo de gabinete*

Se determinó que las unidades de suelos que potencialmente podrían ser más extensas e importantes en los sitios eran: Luvisoles, Andosoles y Fluvisoles. (Carta Edafológica de INEGI (escala 1:250, 000, 1984), fotografías aéreas INEGI (escala 1:75, 000, 1991) y referencias de otros trabajos publicados (Sommer-Cervantes *et al.*, 2000).

Con base en la información de la zona de estudio, se seleccionaron dos zonas que reunieran las siguientes características: Que registraran la misma posición en la pendiente y misma posición en la unidad geomorfológica; que mostraran la misma exposición y orientación hacia la insolación y vientos (barlovento y sotavento) y finalmente, que presentaran usos de suelo ganadero, y a su vez, se identificó la presencia de una zona con la misma unidad de suelo con vegetación natural lo bastante extensa como para que se realizara el levantamiento del perfil en su interior (>2500 m<sup>2</sup>).

# Municipio de San Andrés Tuxtla, Veracruz (Fragmento)



**Figura II.** Mapa de la zona de estudio. (Diseño: Biól. Guillermo Martínez Verduzco)

## 2. Trabajo de campo

Se seleccionó el sitio 1, el cual presentó la secuencia de selva madura-pastizal activo desde hace 8 años, por cumplir con los requerimientos establecidos arriba. En contraste, el sitio 2, contó con la secuencia selva secundaria-pastizal activo desde hace 15 años, y se seleccionó por el interés que representa la generación del conocimiento acerca de la dinámica que existe en la secundarización de pastizales abandonados y el papel que tienen las plantas pioneras en la recuperación de las propiedades edáficas. Por lo que el sitio 2, explica un caso muy específico de secundarización por la dominancia de *Cecropia obtusifolia* en dicha comunidad de vegetación secundaria (~4-6 individuos por m<sup>2</sup>).

Se realizó la caracterización de los perfiles de suelo en campo al inicio de la temporada húmeda (durante la canícula), en julio de 2005. La descripción de las propiedades se realizó según el Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al.*, 1996). Se obtuvieron muestras de suelo de 2.5 a 3 kg por horizonte de cada perfil y cuatro muestras se tomaron con una barrena a una profundidad de 30 cm, los sitios para la toma de estas fueron seleccionadas de forma aleatoria dentro de un cuadrante de 10 x 10 m alrededor de cada perfil y a todas por separado se les colocó en envases de plástico para su transportación. Finalmente, se tomaron 3 muestras de mantillo de 25 x 25 cm de cada sitio forestal, se secaron al aire y se almacenaron en bolsas de plástico.

## 3. Trabajo de laboratorio

A cada una de las muestras (11 de horizontes y 12 de barrenas), se les practicaron un total de 23 análisis edafológicos, de los cuales 10 fueron análisis químicos y 13 fueron análisis físicos. En el Cuadro 1 se detallan las pruebas realizadas:

**Cuadro 1.** Pruebas químicas y físicas realizadas a las muestras de edafológicas de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, Veracruz.

| <b>Prueba</b>  | <b>Método</b>   | <b>Referencia</b>                       |
|--|---|---|
| <i>Químicas</i>  |   |   |
| Acidez Extractable (AE)  | Método de Acidez Extractable                                      | (Van Reeuwijk, 2006)                    |
| Al activo  | Método de Fieldes y Perrot  | (Porta Casanellas <i>et al.</i> , 1999) |
| Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)   | Capacidad de Intercambio Catiónico                                | (Van Reeuwijk, 2006)                    |
| pH   | Método del Potenciómetro  | (Van Reeuwijk, 2006)                    |
| Porcentaje de carbono orgánico (%)   | Porcentaje de Carbono orgánico                                    | (Van Reeuwijk, 2006)                    |
| Porcentaje de Ca y Mg intercambiables  | Método de acetato de amonio y la valoración por absorción atómica | (Van Reeuwijk, 2006)                    |
| Porcentaje de Na y K intercambiables   | Método de acetato de amonio y valoración por flamómetro de flama  | (Van Reeuwijk, 2006)                    |
| Porcentaje de Fe y Al enlazados a materia orgánica ( $Fe_{\text{pifof}}$ y $Al_{\text{pifof}}$ ) | Método del Pirofosfato  | (Van Reeuwijk, 2006)                    |
| Porcentaje de Fe, Al y Si ( $Fe_{\text{ox}}$ , $Al_{\text{ox}}$ , y $Si_{\text{ox}}$ )           | Método del Oxalato Ácido  | (Van Reeuwijk, 2006)                    |
| Porcentaje de Fe "libre" ( $Fe_{\text{dit}}$ )   | Método de Ditionito citrato-Bicarbonato                           | (Van Reeuwijk, 2006)                    |
| <i>Físicas</i>   |   |   |
| Color  | Comparación Tablas Munsell  | (Porta Casanellas <i>et al.</i> , 1999) |
| Composición del horizonte orgánico   | Índices de von Post   | (Nordman, 2005)                         |

**Cuadro 1.** (Continuación) Pruebas químicas y físicas realizadas a las muestras de edafológicas de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, Veracruz.

|                                    |   |   |
|------------------------------------|---|---|
| Cuantificación de Vidrio Volcánico | Observaciones con Microscopio Petrográfico y cálculo de porcentaje de vidrio en 100 partículas (rango: 0.02-0.25 y 0.05-2 mm) | (Cady, 1986)                            |
| Densidad Aparente (DA)             | Método del Cilindro   | (Blake y Hartge, 1986)                  |
| Densidad Real                      | Método del Picnómetro   | (Van Reeuwijk, 2006)                    |
| Estabilidad de agregados (EA)      | Método para evaluar las diferencias en la distribución del tamaño de los agregados secos.                                     | (Kemper y Rosenau, 1986)                |
| Estructura                         | Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo   | (Siebe <i>et al</i> , 1996)             |
| Humedad del suelo (Hum)            | Porcentaje de humedad   | Van Reeuwijk, 2006                      |
| Mesomorfología                     | Descripción de rasgos generales de 30 agregados por horizonte en Microscopio Estereoscópico                                   | (Modificada de Fitzpatrick, 1990)       |
| Tasa de Infiltración (Inf)         | Método del infiltrómetro de dos anillos   | (Bouwer, 1986)                          |
| Porcentaje de Porosidad            | Ecuación de porosidad: $100 \left( \frac{1-DA}{DR} \right)$   | (Porta Casanellas <i>et al.</i> , 1999) |
| Resistividad (Res)                 | Método del Penetrómetro   | (Bradford, 1986)                        |
| Textura                            | Método de la Pipeta   | (Van Reeuwijk, 2006)                    |

La clasificación de los suelos fue hecha por el sistema WRB (World Referente Base) (IUSS Working Group WRB, 2006).



#### 4. Determinación de Índices de Calidad del Suelo, FCC

La determinación de los Índices de la Calidad del suelo se realizó según el sistema Fertility Capability Soil Classification (FCC), Versión 4, para suelos tropicales (Sánchez *et al.*, 2003).

Este método sirve para evaluar la calidad del suelo, basado en propiedades físicas y químicas superficiales cuantitativas y la clasificación del mismo. Este sistema no funciona con propiedades físicas y químicas del suelo que pueden cambiar en menos de un año, pero sí con aquellos que pueden cambiar dinámicamente en una escala de tiempo de décadas de manejo y con aquellos atributos inherentes que no pueden cambiar en menos de un siglo. Los atributos del sistema FCC pueden ser positivos o negativos dependiendo del uso de suelo y de las escalas temporales y espaciales en cuestión (Sánchez *et al.*, 2003).

El sistema FCC puede ser utilizado para identificar atributos relevantes para la producción de plantas y sobre todo para el manejo de ecosistemas en los trópicos, ya que toma en cuenta las propiedades físicas y químicas más importantes y que pueden afectar en crecimiento y desarrollo de las plantas y comunidades animales, así como la productividad y salud de los ecosistemas (Sánchez *et al.*, 2003).

El sistema FCC consiste de dos niveles de categorías. La primer categoría (tipo textural/tipo de sustrato), describe la textura de la superficie del suelo y del subsuelo y es expresado en letras capitales (Por ejemplo, SC, significa superficie de suelo arenosa con horizontes subyacentes de tipo arcilloso). La segunda categoría (modificadores de condición), consiste de 17 modificadores que delimitan condiciones específicas del suelo que afectan el crecimiento de las plantas con límites cuantitativos. Cada modificador de condición es expresado en letras minúsculas. Los superíndices + ó - indican una mayor o menor expresión del modificador (Sánchez *et al.*, 2003).

Ambas categorías son presentadas en el Cuadro 2:

**Cuadro 2.** Categorías del Sistema FCC, Ver. 4 (Sánchez *et al.*, 2003).

| Clase FCC y descripción corta  | Símbolo              | Definiciones y algunas interpretaciones  |
|--|----------------------|--|
| Tipo: el promedio de la capa arable de 0 a 20 cm de prof., cualquiera que sea la más superficial   | <b>S</b>             | Superficie arenosa: mezcla de arena y arenas.  |
|  | <b>L</b>             | Superficie mezclada: <35% de arcilla, pero sin mezcla de arena o arenas.   |
|  | <b>C</b>             | Superficie arcillosa: >35% de arcilla.   |
|  | <b>O</b>             | Suelo orgánico: >12% de C orgánico a una prof. de 50 cm o más (Histosoles y grupos hísticos).  |
| Tipo de sustrato: usado cuando un cambio textural es encontrado en los primeros 50 cm  | <b>S</b>             | Subsuelo arenoso: textura como en tipo.  |
|  | <b>L</b>             | Subsuelo mezclado: textura como en tipo.   |
|  | <b>C</b>             | Subsuelo arcilloso: textura como en tipo.  |
|  | <b>R</b>             | Roca u otra capa dura que restringe el paso de raíces dentro de 50 cm.   |
|  | <b>R<sup>-</sup></b> | Como arriba, pero la capa puede ser preparada, arada o acanalada para incrementar la penetración de las raíces.  |
| Modificadores de la condición: en la capa arable o en los primeros 20 cm, o los más superficiales, a menos que otro distinto sea especificado; agrupado en modificadores relacionados a las propiedades físicas del suelo, reacción del suelo (pH), mineralogía y propiedades biológicas del suelo |                      |  |
| Condición  | Modificador          | Criterio de modificación (si más de uno es usado, serán enlistados en decremento según convenga)   |
| <i>Modificadores relacionados a propiedades físicas</i>  |                      |  |
| Saturación de agua (gley): condición anaeróbica, reducción química, denitrificación; emisiones de NO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub>  | <b>g</b>             | Régimen de humedad del suelo acuico, motas < 2 croma en los 50 cm de suelo para la superficie y debajo de los horizontes A o suelo saturado con agua por >60 días en muchos años.  |
|  | <b>g<sup>+</sup></b> | Saturación por agua prolongada; suelo saturado por agua naturalmente o por riego por >200 días/año sin evidencias de motas indicativas de compuestos de Fe <sup>3+</sup> en los primeros 50 cm de suelo; incluyendo arrozales en los cuales el cultivo puede ser logrado sin buen drenaje; reducción química continua puede resultar en mineralización baja de N en suelo y deficiencias en Zn en cultivos de arroz. |
| Temporada seca prolongada; limita el cultivo durante todo el año, interrumpe ciclos de plagas, Efecto Birch  | <b>d</b>             | Régimen de humedad del suelo xérico o ústico: seco por >60 días/año consecutivos pero húmedo por >180 días/año acumulados en 20-60 cm de prof.   |
|  | <b>d<sup>+</sup></b> | Régimen de humedad del suelo aridico o tórrido: demasiado seco para cultivar sin riego.  |
| Temperaturas del suelo bajas   | <b>t</b>             | Régimen de temperatura del suelo no-iso, cryico o frígido (media anual <8°C), donde las prácticas de manejo pueden ayudar a calentar la superficie para la producción de cereales a corto plazo.   |
|  | <b>t<sup>+</sup></b> | Permafrost con gelisoles en los primeros 50 cm, ningún cultivo posible.  |

**Cuadro 2.** (Continuación) Categorías del Sistema FCC, Ver. 4 (Sánchez *et al.*, 2003).

| Condición   | Modificador  | Criterio de modificación (si más de uno es usado, serán enlistados en decremento según convenga)   |
|---|--|--|
| <i>Modificadores relacionados a propiedades físicas</i>               |  |  |
| Gravas  | $r^+$<br>$r^{++}$<br>$r^{+++}$                       | $r^+$ = 10-35%<br>$r^{++}$ = $\geq 35\%$ (por volumen) de fragmentos de gravas de tamaño grueso (2 a 25 cm de diámetro) en cualquier parte de los primeros 50 cm de suelo<br>$r^{+++}$ más de 15% de afloramiento de roca.   |
| Pendiente   | %  | Rango de porcentaje de pendientes del lugar deseado (Ejem. 0-15%; 15-30%; >30%).   |
| Riesgo de erosión alto  | <b>SC, LC</b><br><b>CR, LC</b><br><b>SR, &gt;30%</b> | Suelos con alta erodibilidad debido a fuerte contraste textural (SC, LC), profundidad superficial (R) o pendiente escarpada (>30%).  |
| <i>Modificadores relacionados a reacción del suelo</i>                |  |  |
| Sulfhídrico (arcillas cat)  | $c$  | pH < 3.5 después de secar, motas de jarosita con hues 2.5Y o más amarillos y cromas de 6 o más en 60 cm dentro de sulfaquents, sulfacuepts, sulfudepts.  |
| Toxicidad de Al para los cultivos más comunes                         | $a$<br><br>$a^-$                                     | Saturación de Al > 60% en 50 cm, o saturación de bases < 33% de CICE (BS <sub>7</sub> ) determinado por la suma de cationes a pH 7 en los primeros 50 cm o la saturación de bases < 14% de CICE (BS <sub>8.2</sub> ) por la suma de cationes a pH 8.2 en 50 cm o pH < 5.5 excepto en suelos orgánicos (O).<br><br>Saturación de Al 10-60% en 50 cm para cultivos extremadamente sensibles a ácidos tales como algodón o alfalfa. |
| Sin mayores limitaciones químicas (incluye modificador formador $h$ ) | <i>Sin símbolo</i>                                   | Saturación de Al < 60% de CICE en los primeros 50 cm y pH entre 5.5 y 7.2.   |
| Calcáreo (reacción básica): común en deficiencias de Fe y Zn          | $b$  | CaCO <sub>3</sub> libre en 50 cm (efervescencia con HCl) o pH > 7.3.   |
| Salinidad   | $s$  | 0.4 S m <sup>-1</sup> de extracto saturado a 25°C a 1m; grupos salids y salicos; solonchaks.   |
| Alcalinidad   | $n$<br><br>$n^-$                                     | Saturación de Na > 15% de CICE en 50 cm; muchos solonetz.<br><br>Saturación de Na 6-15% de CICE en 50 cm, alcalinidad incipiente.  |
| <i>Modificadores relacionados a mineralogía</i>                       |  |  |
| Bajas reservas de nutrientes capitales (deficiencia de K)             | $k$  | Minerales intemperizables < 10% en fracciones de limo y arena en 50 cm, o mineralogía silíceas, o K intercambiable < 0.20 cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> de suelo, o K intercambiable < 2% de la suma de bases, si la suma de las bases es < 10 cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> de suelo.   |

|   |          |   |
|---|----------|---|
| Fijación de P alta por óxidos de Fe y Al (>100 mg kg <sup>-1</sup> de P agregado para alcanzar los niveles adecuados para la prueba de suelo) | <i>i</i> | R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> libre extractable por ditionito: relación de arcilla >0.2, o Fe extractable por ditionito-citrato >4% en horizonte superficial, u oxisoles o grupos óxicos con tipo C, o hue más rojos que 5YR y estructura granular. |
|---|----------|---|

**Cuadro 2.** (Continuación) Categorías del Sistema FCC, Ver. 4 (Sánchez *et al.*, 2003).

| Condición  | Modificador           | Criterio de modificación (si más de uno es usado, serán enlistados en decremento según convenga)  |
|--|-----------------------|---|
| <i>Modificadores relacionados a mineralogía</i>  |                       |   |
|  | <i>i</i>              | Como arriba, pero en suelos que han sido recapitalizados con fertilizantes de P para proveer P a largo plazo para cultivos; >10 mg kg <sup>-1</sup> P para la prueba del Método de Olsen.   |
|  | <i>i</i> <sup>+</sup> | Como arriba, toxicidad potencial por Fe si los suelos son saturados por mucho tiempo ( <i>g</i> <sup>+</sup> ) o las tierras altas adyacentes tienen modificador <i>i</i> .   |
| Amorfos Volcánicos (amorfos por rayos X); alta fijación de P por alofanos (>200 mg kg <sup>-1</sup> de P agregado para alcanzar los niveles adecuados para la prueba de suelo); bajas tasas de mineralización de N | <i>x</i>              | pH >10 (en NaF 1 M) en los primeros 50 cm, o positivo a prueba de campo de NaF, o andosoles o subgrupos ándicos, excepto vitrands o grandes grupos vítricos y subgrupos; otras evidencias indirectas de dominancia de alofano en la fracción arcilla, o retención de P >90% por el Método de Blakemore, 1981.   |
|  | <i>x</i> <sup>-</sup> | Retención de P entre 30 y 90%; fijadores medios de P.   |
| Arcillas expandibles (propiedades vérticas): arcillas muy plásticas y pegajosas, contracción y expansión severas en superficie   | <i>v</i>              | >35% de arcilla y >50% de arcillas expandibles tipo 2:1, o coeficiente de expansibilidad lineal >0.09, o vertisoles o grupos vérticos.  |
| Alto potencial de lavado (baja capacidad de amortiguamiento, baja CICE)  | <i>e</i>              | CICE <4 cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> de suelo, o suma de cationes <7 cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> de suelo a pH 7, por la suma de cationes + Al <sup>3+</sup> + H <sup>+</sup> <10 cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> de suelo a pH 8.2.  |
| <i>Modificadores relacionados a propiedades biológicas (nuevo)</i>   |                       |   |
| Baja saturación de C orgánico (depleción de materia orgánica del suelo, secuestro potencial de C)  | <i>m</i>              | Saturación de C orgánico total <80% en la superficie comparado con un sitio cercano no perturbado o productivo del mismo tipo de suelo que equivale a 100%, o saturación de C orgánico superficial <80% extractable con 333 Mm de KMnO <sub>4</sub> comparado con un sitio cercano no perturbado o productivo del mismo suelo, el cual es igual a 100%. |

## 5. Análisis Estadísticos

Todos análisis físicos y químicos de los horizontes de ambos sitios fueron hechos por triplicado, excepto para los casos de los Horizontes Bw2 del sitio 2, donde se decidió sólo realizar la prueba de pH por tratarse de la zona de roca madre. Para los análisis físicos y químicos de las muestras de barrenas, se eligieron aleatoriamente 3 de las 4 muestras con las que se contaba y a cada una se le practicó cada uno de los análisis previamente mencionados ( $n=3$ ).

Las datos de Porcentaje de Carbono orgánico (% C), Capacidad de Intercambio Catiónico Efectivo (CICE), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), Saturación de bases (SB), Cationes Intercambiables (K, Na, Ca y Mg) y Acidez Extractable (AE), del horizonte superficial de cada perfil y las respectivas barrenas ( $n=3+3=6$ ), fueron analizados por la Prueba Estadística *ROC*, con el software MATLAB 6.5 para comparar diferencias entre medias. Los valores de Porcentaje de  $Fe_{\text{pirof}}$ ,  $Al_{\text{pirof}}$ , y  $Fe_{\text{dit}}$  ( $n=4$ ), Resistividad ( $n=8$ ), Tasa de Infiltración ( $n=10$ ) y los Índices de Estabilidad de Agregados (MWD,  $n=3$ ), también fueron analizados utilizando las Prueba Estadística *ROC* para comparar diferencias entre medias, pero es importante indicar que estos valores cuentan con una asimetría con respecto a los demás, lo que imposibilitó su análisis mediante otras pruebas estadísticas, principalmente de tipo paramétrico como ANOVA y Análisis de Regresión Múltiple. La prueba *ROC*, es de tipo no-paramétrico y fue elegida por ajustarse a datos no-simétricos como los que se analizaron, por la rapidez de la prueba y por su fácil manejo.

Adicionalmente, otras variables como el Índice de Estabilidad de los Agregados (MWD), Tasa de Infiltración Instantánea a un minuto y la Penetrabilidad fueron tomadas en cuenta como Índices Externos para evaluar también si existían evidencias que indicaran degradación, ya que la FCC no toma en cuenta este tipo de variables cruciales para este tipo de estudios.

# RESULTADOS

## *Descripción de Perfiles*

### 1.1 Descripción del suelo en Selva Alta Perennifolia Madura (SAP-M), Sitio 1

#### *1.1.1 Descripción geomorfológica*

**Grado de pendiente:** 30% aproximadamente.

**Exposición:** noreste.

**Complejidad de la pendiente:** muy irregular y llena de pequeñas lomas con gran cantidad de rocas ígneas extrusivas de gran tamaño (basaltos poco vesiculados y con gran cantidad de Fe).

**Forma de la pendiente:** pendiente cóncava con gran cantidad de lomas.

**Posición del perfil en la pendiente:** pie de monte medio.

**Componente geomorfológico:** ladera noreste de montaña.

**Microrelieve:** pendiente con pequeñas lomas y abundante pedregosidad superficial.

**Patrón del drenaje:** drenaje deficiente, laminar y concentrado en pequeños fluvios de alta pedregosidad.

**Encharcamiento:** superficial y dentro del perfil.

**Profundidad del manto freático:** poco profundo, menos de 2 m.

**Material parental:** ceniza volcánica, sedimentos de partes altas, saprolita (riolita intemperizada) y bloques de basaltos rojizos (rocas de más de 400 y hasta 1000 mm de diámetro).

**Erosión:** hídrica, clase uno (pérdida de menos del 25% del espesor del horizonte A o E)

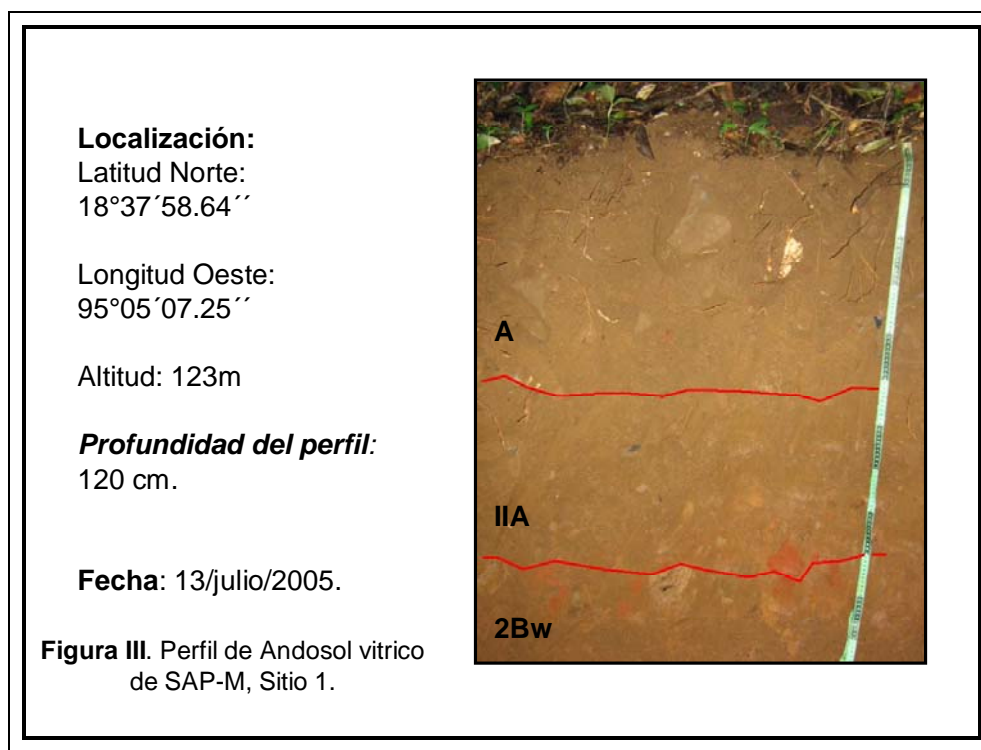
**Vegetación:** Selva Alta Perennifolia con un dosel muy cerrado y con poco disturbio, existe la presencia de un fluvio cerca del perfil con un aporte importante de agua a la planicie, presencia de palmas como *Chamaedora* spp. y *Astrocaryum mexicanum*, entre otras..

**Pedregosidad superficial:** Mucha pedregosidad con bloques de roca ígnea de gran tamaño y cantos pequeños poco o bien redondeados.

**Facilidad de excavación del perfil:** muy difícil, por la constante aparición de rocas de gran tamaño.

**NOTA:** El perfil (de 120 cm) se encontró en un interfluvio aproximadamente a la mitad de la elevación dentro de una zona de selva alta perennifolia madura, con abundante mantillo y poca luminosidad. Se encontraron claros escurrimientos de agua por las cuatro paredes del perfil, el perfil se encharcó rápidamente. Se decidió detener la excavación debido a la dificultad para seguir cavando y a la presencia de cierta continuidad en las características del horizonte 2Bw, el cuál no tiene presencia de raíces más que de tamaño grueso y que funcionan como sostén de los grandes árboles de la zona.

En la Figura III, se aprecia la vista general del perfil correspondiente a SAP-M, con los horizontes correspondientes (límites marcados con líneas rojas) y la profundidad de referencia.



En el Cuadro 3, se resume la descripción física del perfil de Andosol vítrico, SAP-M, sitio 1.

### 1.1.2 Descripción del perfil

**Cuadro 3.** Descripción del perfil y pruebas físicas del Andosol vítrico, SAP-M, sitio 1.

| Horizonte       | Profundidad (cm) | Limite de horizonte  | Estructura  | Adhesividad           | Raíces   | Poros  |
|-----------------|------------------|--|---|-----------------------|--|--|
| A               | 0-52             | <b>Contraste:</b> difuso.<br><b>Forma:</b> ondulada.                     | <b>Tipo:</b> subangular.<br><b>Clase:</b> finos a medianos.<br><b>Grado:</b> moderado.            | Ligeramente plástico. | <b>Tamaño:</b> medianos y finas.<br><b>Clase:</b> muchas.                                  | <b>Tamaño:</b> muy fino y mediano.<br><b>Clase:</b> abundantes.<br><b>Distribución:</b> expeds e inpeds.<br><b>Orden:</b> tubulares. |
| 2A              | 52-90            | <b>Contraste:</b> difuso.<br><b>Forma:</b> ondulada.                     | <b>Tipo:</b> subangular.<br><b>Clase:</b> finos a medianos.<br><b>Grado:</b> moderado.            | Muy plástico.         | <b>Tamaño:</b> finas, medianos y gruesas.<br><b>Clase:</b> muchas, excepto de las gruesas. | <b>Tamaño:</b> fino a mediano.<br><b>Clase:</b> comunes.<br><b>Distribución:</b> expeds e inpeds.<br><b>Orden:</b> tubulares.        |
| 2B <sub>w</sub> | 90-120+          | <b>Contraste:</b> ligeramente claro a difuso.<br><b>Forma:</b> ondulada. | <b>Tipo:</b> subangular en bloques.<br><b>Clase:</b> finos a medianos.<br><b>Grado:</b> moderado. | Muy plástico.         | <b>Tamaño:</b> gruesas y algunas pocas medianos.<br><b>Clase:</b> escasas.                 | <b>Tamaño:</b> mediano.<br><b>Clase:</b> pocos.<br><b>Distribución:</b> expeds.<br><b>Orden:</b> tubulares.                          |

Por su parte, en el Cuadro 4, se muestran las principales pruebas físicas y químicas aplicadas al Andosol vítrico de la SAP-M, sitio 1.

**Cuadro 4.** Pruebas físicas y químicas del Andosol vítrico, SAP-M, sitio 1.

| Horizonte       | Reacciones   | Color  |
|-----------------|--|--|
| A               | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:</b> efervescencia inmediata.<br><b>NaF:</b> ++  | <b>Seco:</b> 7.5YR 3.5/3.5<br><b>Húmedo:</b> 7.5YR3.5/2  |
| 2A              | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:</b> efervescencia inmediata.<br><b>NaF:</b> +++ | <b>Seco Matriz:</b> 7.5YR4/4; <b>Seco Manchas:</b> 7.5YR5/5<br><b>Húmedo:</b> 7.5YR4/4   |
| 2B <sub>w</sub> | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:</b> efervescencia inmediata.<br><b>NaF:</b> +++ | <b>Seco Matriz:</b> 7.5YR4/6; <b>Seco fragmentos de roca:</b> 10R4/8<br><b>Húmedo Matriz:</b> 7.5YR4/4<br><b>Húmedo fragmentos de roca:</b> 10R3/6 |

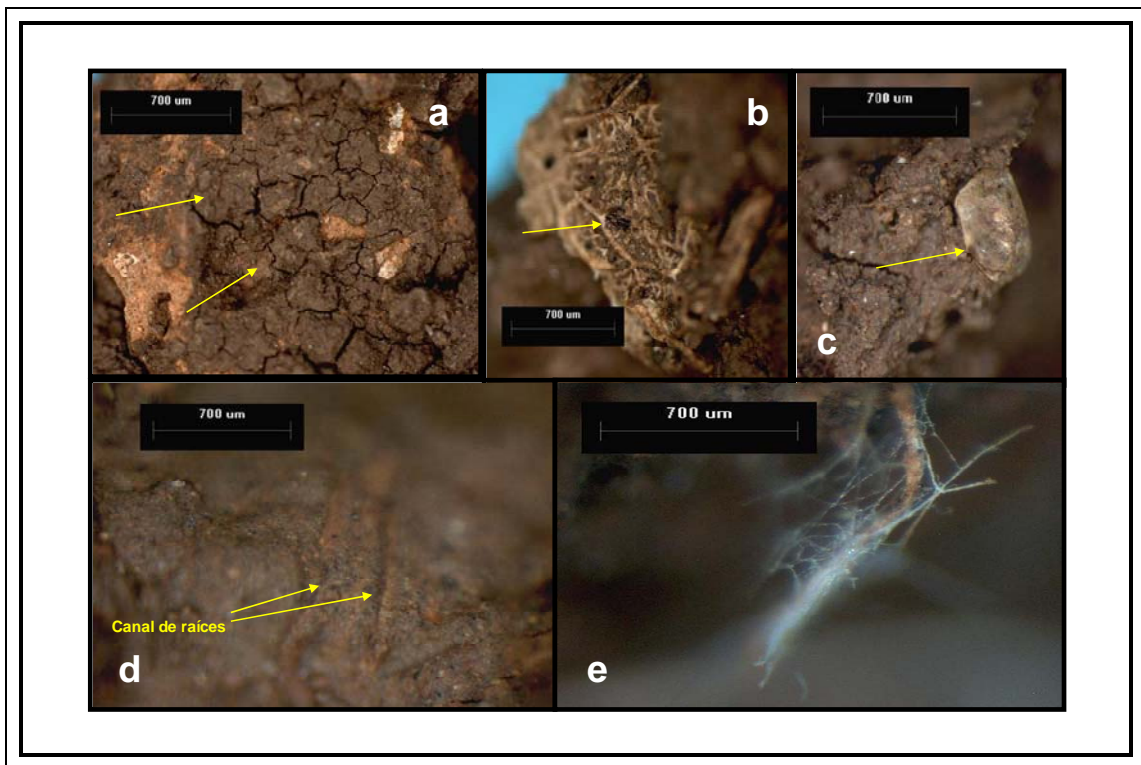
A continuación se muestran las descripciones mesomorfológicas del perfil de Andosol vítrico correspondiente a la SAP-M, sitio 1 y se ilustran mediante microfotografías en la Figura IV, V y VI, según sea el caso.



### 1.1.3 Mesomorfología

#### Horizonte A

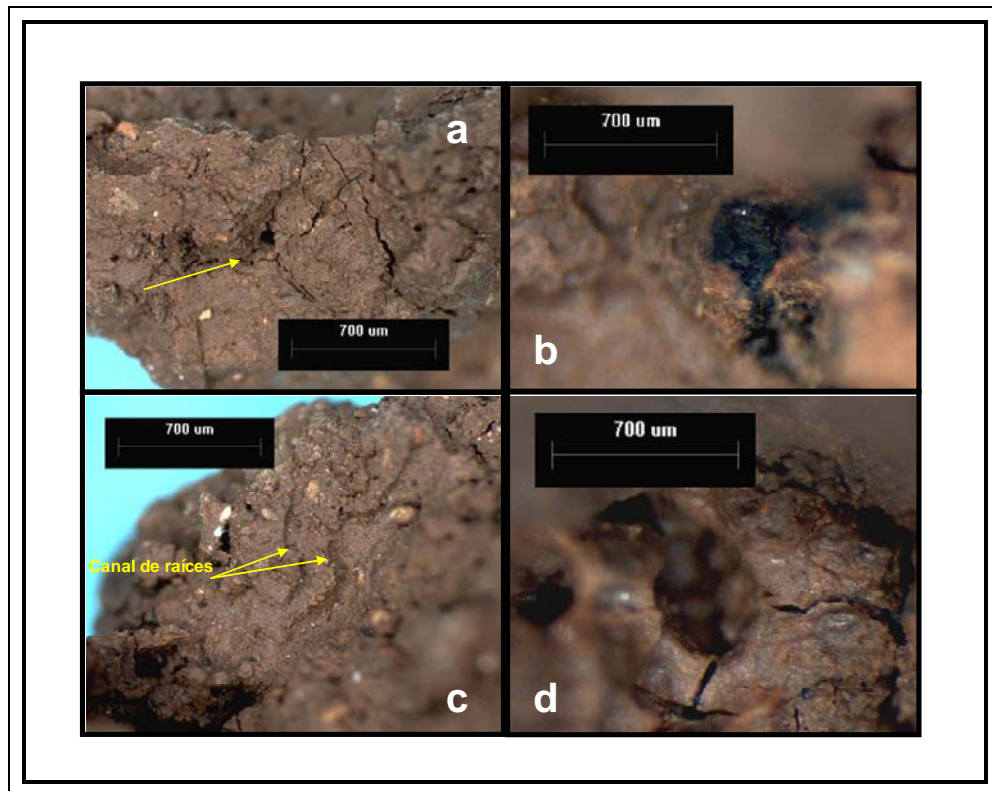
Más del 90%, se trató de agregados de forma subangular, con depósitos de óxidos de Fe sobre ellos. Estos fragmentos y agregados siempre se encuentran cubiertos por abundantes películas de limo y arcilla. Abundantes grietas continuas y discontinuas, algo ramificadas por todo el agregado y con acumulaciones de arcilla y limo dentro de las mismas (Fig. IVa). Abundantes arenas muy finas de cuarzo y vidrio de color blanco y rojizo en las paredes del agregado (Fig. IVc). Raíces muy finas, finas y medianas dentro y fuera del agregado en el 80% de los casos (Fig. IVd y e). En el 30% de los casos, se encontraron restos orgánicos entre los agregados (Fig. IVb); porosidad muy fina, fina y mediana con abundantes oquedades de origen biológico. El resto del material son trozos de saprolita intemperizada. Presencia de fauna edáfica del grupo Collembola, entre otros.



**Figura IV:** Microfotografías *Horizonte A* (a) películas de limos sobre saprolita con abundantes grietas (flechas). (b) Restos vegetales en descomposición sobre la pared de un agregado (flecha). (c) Arena de cuarzo (flecha). (d) Canales de origen orgánico sobre en agregado (flechas). (e) Fibras de algún insecto sobre una raíz.

## Horizonte 2A

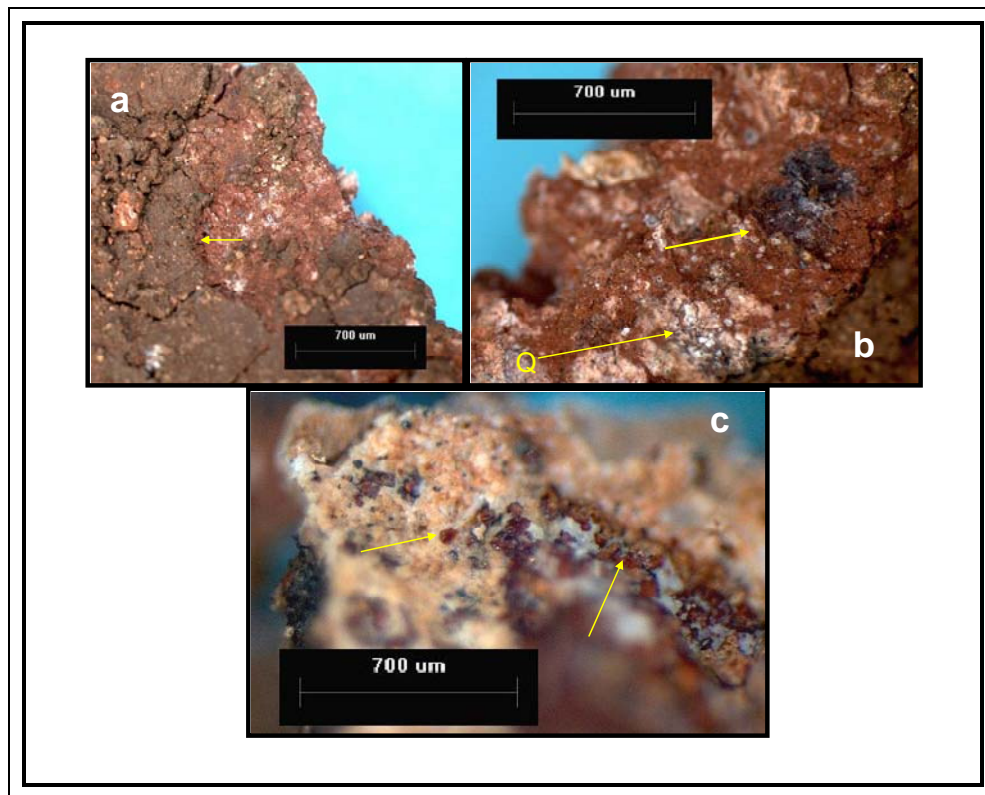
Más del 97% de agregados siempre cubiertos de películas de arcilla y limo de color pardo rojizo (Fig. Va). La apariencia de la película de arcilla está muy bien definida por que están muy bien pulidas, son más o menos brillantes y se encuentran regularmente en los poros y en oquedades del agregado, mientras que las películas de limo se encuentran en mayor abundancia respecto a las de arcilla, se encuentran por todo el agregado y son de apariencia opaca, más oscura y espesa que las de arcilla. Las grietas son continuas y un poco ramificadas en algunas partes del agregado (100% de los casos) (Fig. Vd). Las raíces son de tipo fino a muy finas, se encuentran dentro y fuera de los agregados (70%). Se encuentran abundantes arenas de cuarzo, vidrio volcánico y de otros minerales en las paredes. La microporosidad y porosidad en general es abundante, aunado con la abundante presencia de oquedades producidas por la irregularidad de los agregados (Fig. Vd). El resto del material son trozos de saprolita intemperizada. Pocos depósitos de óxidos de manganeso (Fig. Vb).



**Figura V:** Microfotografías *Horizonte 2A* (a) Salida de un canal de raíz y grietas (flecha). (b) Acumulación de óxidos de manganeso sobre arcilla. (c) Canales de raíces muy finas (flechas). (d) Poro con grietas en sus paredes.

## Horizonte 2Bw

Más del 98% de agregados siempre cubiertos de abundantes arenas finas y muy finas de cuarzo, vidrio volcánico y otros materiales, se localizan también películas de arcilla poco abundantes, muy pulidas de color claro y películas de limo de un color más oscuro que las arcillas y más opacas (Fig. VIa). Las arenas aparecen dentro y fuera del agregado. En las paredes del agregado, se presenta una mediana cantidad de minerales (Fig. VIc). Abundantes grietas muy finas por todo el agregado, estas son de tipo continuo y algo ramificadas (Fig. VIa). Grandes acumulaciones de óxidos de hierro en las paredes del agregado y más comúnmente en las paredes de los fragmentos de saprolita en intemperización (Fig. VIb). Abundante microporosidad por todo el agregado (Fig. VIb). Las raíces son muy finas y se encuentran fuera y dentro de los agregados con escasa presencia. Además se puede identificar la presencia poco abundante de manchas oscuras de óxidos de manganeso (<10% de los casos) (Fig. VIb).



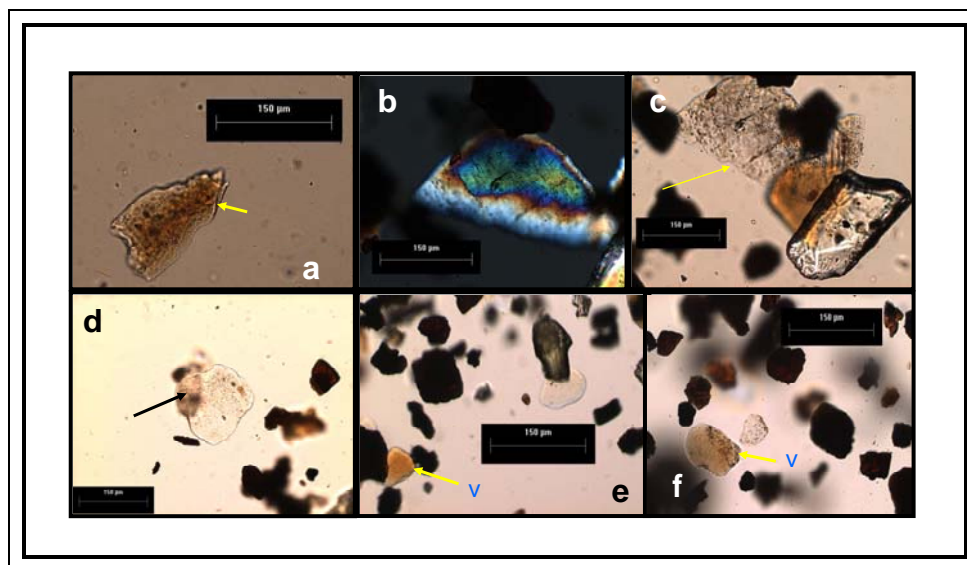
**Figura VI:** Microfotografías *Horizonte 2Bw* (a) Películas de limo y grietas sobre saprolita con abundantes depósitos de óxidos de Fe (flecha). (b) Arenas de cuarzo (Q) y depósitos de óxidos de Fe y Mn sobre saprolita (flecha). (c) Minerales sobre la matriz de una saprolita (flechas).

En el Cuadro 5, se muestran los porcentajes de vidrio volcánico en el Andosol vítrico de la SAP-M, estimados a partir de observaciones con Microscopio Petrográfico y sus respectivas imágenes se ilustran enseguida en la Figura VII.

#### 1.1.4 Porcentaje de vidrio volcánico

**Cuadro 5.** Porcentajes de vidrio volcánico, del Andosol vítrico de la SAP-M, sitio 1.

| Variable/Horizonte                     | A  | 2A |
|--|----|----|
| Vidrio Volcánico Fracción 0.075 mm (%) | 4  | 5  |
| Vidrio Volcánico Fracción >0.25 mm (%) | 22 | 21 |
| <i>Media</i>                           | 13 | 13 |



**Figura VII:** Microfotografías (a) Vidrio volcánico parcialmente sustituido con arcillas y bordes afilados, *Horizonte A*. (b) Imagen de una arena de cuarzo transportada eólicamente, con superficies talladas por transporte previo, *Horizonte 2A* (nícoles cruzados). (c) Misma arena de cuarzo sin interferencia (flecha) y acompañada de vidrio y una plagioclasa, *Horizonte 2A*. (d) Muscovita, mineral de rocas metamórficas presuntamente transportada eólicamente, *Horizonte 2A* (flecha). (e) Vidrio volcánico (v), *Horizonte A*. (f) Vidrio (v) y minerales opacos no identificados, *Horizonte 2A* (flecha).

En el Cuadro 6, se muestra la descripción del horizonte orgánico mediante la Clasificación del índice de von Post. Por su parte, en el Cuadro 7, se muestran las propiedades químicas y físicas del Andosol vítrico correspondiente a la SAP-M, sitio 1.

### 1.1.5 Composición Horizonte Orgánico

**Cuadro 6.** Descripción del Horizonte Orgánico del Andosol vítrico de la SAP-M, sitio 1.

|   |   |
|---|---|
| <b>Índice de Composición del horizonte orgánico</b> | <b>2 (Casi descompuesto:</b> se distinguen estructuras de plantas; agua ligeramente amarilla a café; casi sin humificar y libre de abono) |
|---|---|

### 1.1.6 Propiedades químicas y físicas del perfil

**Cuadro 7.** Propiedades químicas y físicas del Andosol vítrico de la SAP-M, sitio 1.

| Variable/Horizonte                                       | A                  | 2A                 | 2Bw            |
|--|--------------------|--------------------|----------------|
| Densidad Real (g cm <sup>-3</sup> )                      | 2.50               | 2.40               | 2.40           |
| Densidad Aparente (g dm <sup>-3</sup> )                  | 0.90               | 0.96               | 0.83           |
| Humedad (%)  | 42.00              | 28.00              | 65.00          |
| Porosidad (%)  | 63.93              | 60.06              | 65.40          |
| Arcillas (%)   | 45.86              | 68.13              | 62.53          |
| Limos (%)  | 47.11              | 28.37              | 33.48          |
| Arenas (%)   | 7.03               | 3.50               | 3.99           |
| Clase Textural   | Arcillosa muy fina | Arcillosa muy fina | Arcillo-limosa |
| Resistividad (kg cm <sup>-3</sup> )                      | 2.22               | 3.78               | 3.97           |
| Carbono Orgánico (%)                                     | 1.26               | 0.46               | 0.59           |
| pH (agua 1:2.5)  | 5.12               | 4.48               | 4.86           |
| pH (KCl 1:2.5)   | 4.60               | 4.50               | 4.22           |
| CICE (cmol kg <sup>-1</sup> )                            | 19.90              | 23.10              | 24.50          |
| Acidez Extractable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | 15.20              | 19.30              | 20.40          |
| CIC (cmol kg <sup>-1</sup> )                             | 21.50              | 19.40              | 16.80          |
| Saturación de Bases (%)                                  | 21.50              | 19.8               | 23.97          |
| Sodio (cmol kg <sup>-1</sup> )                           | 0.28               | 0.31               | 0.43           |
| Potasio (cmol kg <sup>-1</sup> )                         | 0.17               | 0.05               | 0.02           |
| Calcio (cmol kg <sup>-1</sup> )                          | 0.79               | 0.13               | 0.47           |
| Magnesio (cmol kg <sup>-1</sup> )                        | 3.40               | 3.30               | 3.50           |
| Al+0.5Fe (%)   | 1.08               | 1.15               | 1.24           |
| Si (%)   | 0.10               | 0.11               | 0.11           |
| Fe enlazado a materia orgánica (%)                       | 1.07               | 0.97               | 0.35           |
| Al enlazado a materia orgánica (%)                       | 1.20               | 1.30               | 0.60           |
| Fe libre (%)   | 9.78               | 14.97              | 9.89           |

Todo el perfil tuvo grandes cantidades de arcilla y limos en la fracción fina. Es considerado pobre en Carbono y bajo en CIC y pH.

Al comprobar el mayor contenido de arcilla en el horizonte 2A, se concluyó que los dos horizontes superficiales en realidad son dos capas diferentes de cenizas, depositadas en diferentes fechas; pero por efecto de la alta actividad biofísicoquímica del sitio se ha desarrollado una dinámica de diferenciación de las mismas, haciéndolas funcionar como horizontes. Este último fenómeno se ve reflejado en una disminución del pH, Porosidad, Humedad, CIC, Saturación de Bases, K, Ca, Fe y Carbono, conforme aumenta la profundidad del perfil. De manera opuesta, se encontró el aumento de la Densidad Aparente, Acidez Extractable, CICE, Resistividad, Na y  $Fe_{dit}$ . Mientras que no se encontraron cambios sustanciales en Densidad real, Mg,  $Si_{ox}$  y  $Al_{pirof}$ . El último horizonte es muy importante en este sitio, ya que resultó ser el más alto en Saturación de Bases, CICE, Humedad, Porosidad, Resistividad, Acidez Extractable y Na; y fue ligeramente más alto en Carbono y pH que la capa suprayacente.

El mantillo encontrado en el sitio 1, presentó un estado moderado de descomposición. El contenido de raíces fue menor conforme aumentó la profundidad del perfil y de manera opuesta la aparición de acumulaciones de óxidos de Fe y Mn sobre fragmentos de saprolita en proceso activo de intemperismo (Figura VIa y b). Se encontraron minerales como Muscovita y Cuarzos tallados en la capa intermedia (Figura VIIb y d).

El suelo fue clasificado como Andosol vítrico (AN vi) por el sistema de la WRB (2006), por cumplir con las propiedades de tener una cantidad moderada de Al y Fe extractable con oxalato ácido a pH 3 ( $Alox + \frac{1}{2} Fe_{ox} (\%) = 0.4-2.0$ ), una densidad aparente  $< 0.9 \text{ kg dm}^{-3}$  en la capa superficial y por presentar un porcentaje de vidrio volcánico  $> 10\%$  en las dos capas superficiales.



## 1.2 Descripción del suelo de Pastizal Activo de 8 años (PA-8), Sitio 1

### *1.2.1 Descripción geomorfológica*

**Grado de pendiente:** 30% aproximadamente.

**Exposición:** noreste.

**Complejidad de la pendiente:** muy irregular y llena de pequeñas lomas con gran cantidad de rocas ígneas extrusivas de gran tamaño (basaltos poco vesiculados y con gran cantidad de Fe).

**Forma de la pendiente:** pendiente cóncava alomada.

**Posición del perfil en la pendiente:** pie de monte.

**Componente geomorfológico:** ladera noreste de montaña.

**Microrelieve:** pendiente con pequeñas lomas y alta pedregosidad, con bombas volcánicas grandes y medianas descubiertas por la erosión del suelo.

**Patrón del drenaje:** drenaje interno deficiente, el externo laminar y concentrado en pequeños fluvios de alta pedregosidad y con evidencia de erosión intensa.

**Encharcamiento:** En las pequeñas depresiones del microrelieve.

**Profundidad del manto freático:** poco profundo, menos de 2 m.

**Material parental:** ceniza volcánica, sedimentos de partes altas, saprolita y bloques de basaltos rojizos.

**Erosión:** hídrica, alta y de clase tres a cuatro (pérdida del 75 o 100% del horizonte A o E).

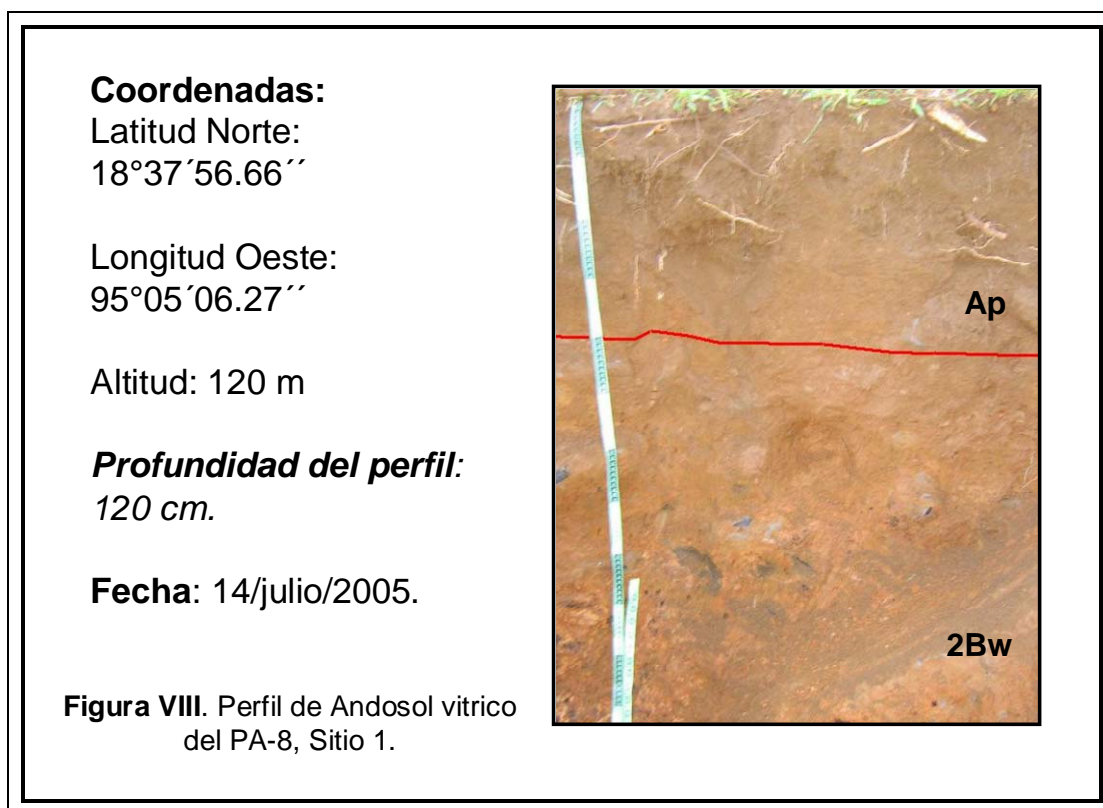
**Vegetación:** Pastizal inducido desde hace unos 8 años para la cría de ganado, existe la presencia de varios fluvios cerca del perfil con un aporte importante de agua a la planicie, presencia de residuos de vegetación autóctona como ceibas y algunos otros géneros no identificados, helechos y algunas epífitas.

**Pedregosidad superficial:** Muy pedregoso con bloques de gran tamaño y cantos pequeños poco o bien redondeados muy evidentes y descubiertos por la erosión de los horizontes superficiales.

**Facilidad de excavación del perfil:** muy difícil, por la constante aparición de bloques de gran tamaño.

**NOTA:** El perfil (de 120 cm) se encontró en un interfluvio aproximadamente a la mitad de la elevación dentro de una zona de pastizal y presentó abundantes y claros escurrimientos de agua por las cuatro paredes del perfil, se anegó muy rápidamente. Se detuvo la excavación del perfil a los 120 cm debido a la presencia de rocas en el piso del mismo y a la dificultad para continuar trabajando debido al encharcamiento excesivo.

En la Figura VIII, se aprecia la vista general del perfil correspondiente PA-8, con los horizontes correspondientes (delimitados con líneas rojas) y su profundidad de referencia.





En el Cuadro 8, se resume la descripción física del perfil de Andosol vítrico del PA-8, sitio 1.

### 1.2.2 Descripción del perfil

**Cuadro 8.** Descripción del perfil y pruebas físicas del Andosol vítrico del PA-8, sitio 1.

| Horizonte  | Profundidad (cm) | Limite de horizonte                                  | Estructura   | Adhesividad           | Raíces  | Poros  |
|------------|------------------|--|--|-----------------------|---|--|
| <i>Ap</i>  | 0-40             | <b>Contraste:</b> difuso.<br><b>Forma:</b> ondulada. | <b>Tipo:</b> subangular.<br><b>Clase:</b> finos a medianos.<br><b>Grado:</b> moderado. | Ligeramente plástico. | <b>Tamaño:</b> mediano y finos.<br><b>Clase:</b> muchas.          | <b>Tamaño:</b> Muy fino y mediano.<br><b>Clase:</b> Pocos.<br><b>Distribución:</b> expeds.<br><b>Orden:</b> tubulares. |
| <i>2Bw</i> | 40-más de 120    | <b>Contraste:</b> difuso.<br><b>Forma:</b> ondulada. | <b>Tipo:</b> subangular.<br><b>Clase:</b> finos y medianos.<br><b>Grado:</b> moderado. | Muy plástico.         | <b>Tamaño:</b> gruesos y medianos.<br><b>Clase:</b> poco comunes. | <b>Tamaño:</b> mediano.<br><b>Clase:</b> pocos.<br><b>Distribución:</b> expeds.<br><b>Orden:</b> tubulares.            |

Por su parte, en el Cuadro 9, se muestran las principales pruebas físicas y químicas aplicadas al perfil de Andosol del PA-8, sitio 1.

**Cuadro 9.** Pruebas físicas y químicas del Andosol vítrico, PA-8, sitio 1.

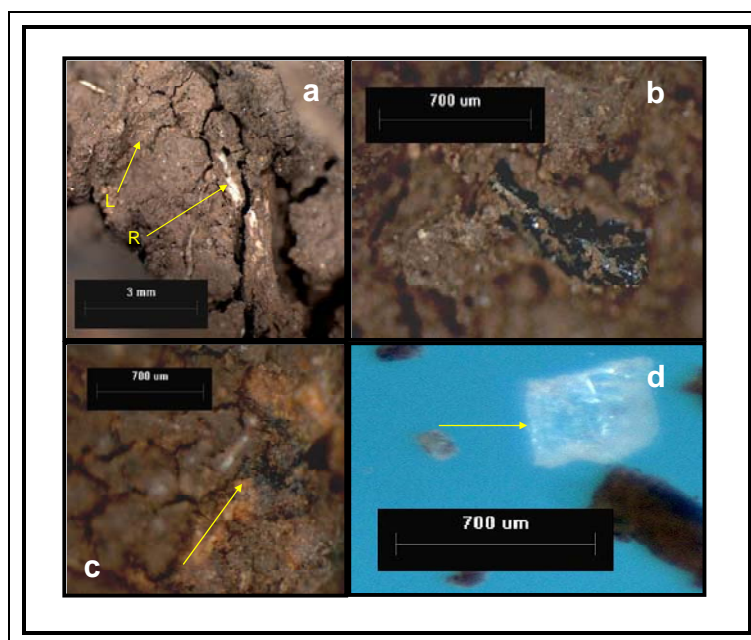
| Horizonte  | Reacciones  | Color   |
|------------|---|---|
| <i>Ap</i>  | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:</b> efervescencia inmediata.<br><b>NaF:</b> +  | <b>Seco:</b> 7.5YR 4/2<br><b>Húmedo:</b> 7.5YR3/4 |
| <i>2Bw</i> | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:</b> efervescencia inmediata.<br><b>NaF:</b> ++ | <b>Seco:</b> 7.5YR 4/4<br><b>Húmedo:</b> 7.5YR4/4 |

A continuación se detallan las descripciones mesomorfológicas del perfil correspondiente al PA-8, sitio 1. Las microfotografías correspondientes a cada descripción se muestran en la Figura IX, y X, según sea el caso.

### 1.2.3 Mesomorfología

#### Horizonte Ap

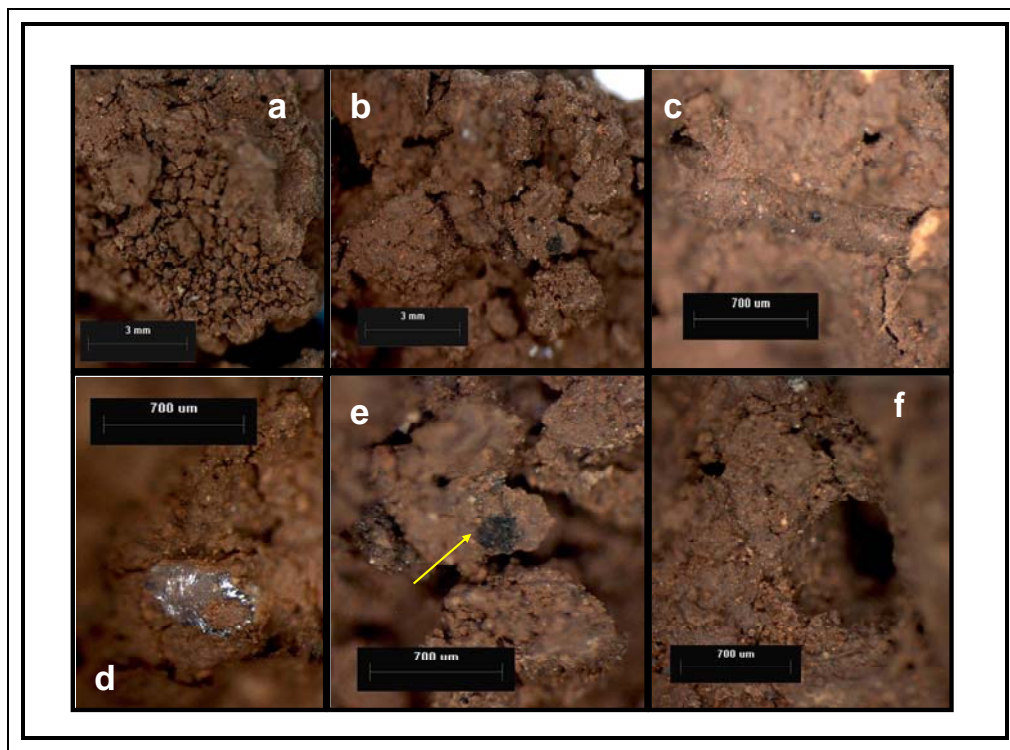
En el 98% de los agregados subangulares, se presentan películas poco abundantes de arcilla, de apariencia brillante y lisas sobre las paredes de los agregados y dentro de las grietas de los agregados, frecuentes películas de limo de apariencia más gruesa, más oscuras y sin brillo en la misma posición que las de arcilla (Fig. IXa). Arenas finas frecuentes de color negro, blanco y blanco amarillento (presuntamente cuarzos, vidrio volcánico y feldespatos) de diámetro menor a 0.5 mm (Fig. IXb y d). Cristales transparentes de cuarzo, presuntamente transportado eólicamente hasta el sitio y posiblemente proveniente de la zona costera que se encuentra a unos 1000 metros del lugar de estudio (Fig. IXd). Existen abundantes grietas interrumpidas y continuas, así como ramificadas por todo el cuerpo de los agregados (Fig. IXa). Existen abundantes depósitos de óxidos de Fe y Mn sobre los agregados (Fig. IXc). Las raíces abundantes (100% de los casos) son finas (de 1-2 mm) y existen abundantes restos orgánicos de color blanco, sobre los agregados. El resto del material son fragmentos de saprolita muy intemperizada y con acumulaciones de microcristales de óxidos de Fe.



**Figura IX:** Microfotografías *Horizonte Ap* (a) Raíz (R), películas de limos (L) y grietas sobre agregado. (b) Mineral oscuro cubierto de limo y arcilla. (c) Depósito de óxidos de Mn y limos (flecha). (d) Arena de cuarzo asilada del agregado (flecha).

## Horizonte 2Bw

Más del 90% agregados con <10% de presencia de fragmentos de saprolita muy intemperizada y con abundantes depósitos de óxidos de Fe sobre la superficie. Abundante presencia de películas de limo (>90% de los casos) y arcilla de color rojizo poco frecuente, que sirven como material que otorgó unión a los agregados y como principal material de los mismos (Fig. Xa y b). Casi en el 40% de los casos, las grietas fueron de tipo ramificadas y se encontraron por todas las paredes de los agregados (Fig. Xb). Las raíces son finas y muy finas y se les encontró dentro y fuera de los agregados. Moderada presencia de porosidad y oquedades de raíces en los agregados disminuyendo en la zona más profunda del perfil (Fig. Xc, e y f). Se encuentra la presencia de cristales de tamaño muy pequeño, tal vez de mica o cuarzo, sobre las paredes de los agregados (menores a 0.5 mm) (Fig. Xd). La presencia de materia orgánica derivada del pasto es menor en este horizonte. Se encontraron abundantes restos orgánicos blancos opacos, fibrosos y muy pequeños. Se encontraron óxidos de Mn (Fig. Xd).



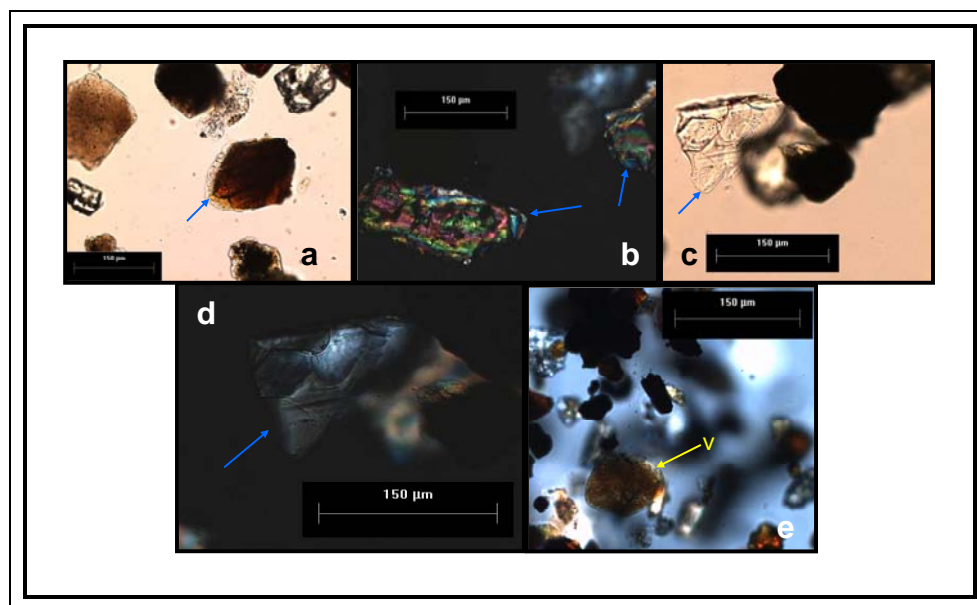
**Figura X:** Microfotografías *Horizonte 2Bw* (a) Agregación granular de material grueso cubierto de limos y arcillas. (b) Grietas y arenas sobre macroagregados. (c) Canal de raíz con arenas. (d) Arena de cuarzo sobre la cara de un agregado. (e) Acumulación de óxidos de Mn (flecha). (f) Poro en superficie de agregado.

En el Cuadro 10, se muestran los porcentajes de vidrio volcánico en el perfil de Andosol vítrico, PA-8, sitio 1, estimados a partir de observaciones con Microscopio Petrográfico, cuyas microfotografías aparecen en la Figura XI.

#### 1.2.4 Porcentaje de vidrio volcánico

**Cuadro 10.** Porcentajes de vidrio volcánico del Andosol vítrico del PA-8, sitio 1.

| Variable/Horizonte                     | <i>Ap</i> | <i>2Bw</i> |
|--|-----------|------------|
| Vidrio Volcánico Fracción 0.075 mm (%) | 6         | 3          |
| Vidrio Volcánico Fracción >0.25 mm (%) | 17        | 15         |
| <i>Media</i>                           | 11.5      | 9          |



**Figura XI:** Microfotografías (a) Mica (mineral de rocas metamórficas) presuntamente transportado eólicamente desde una fuente lejana (flecha), *Horizonte Ap*. (b) Imagen con nícoles cruzados de piroxenos (flechas), *Horizonte 2Bw*. (c) Plagioclasa con cubiertas de vidrio sobre su superficie (flecha), *Horizonte 2Bw*. (d) Misma plagioclasa con cubiertas de vidrio pero con nícoles cruzados (flecha), *Horizonte 2Bw*. (e) Vidrio (v), plagioclasas y minerales opacos muy abundantes, *Horizonte 2Bw*.

En el Cuadro 11, se presentan las propiedades químicas y físicas del perfil correspondiente al PA-8, sitio 1.

### 1.2.5 Propiedades químicas y físicas del perfil

**Cuadro 11.** Propiedades químicas y físicas del perfil de Andosol vítrico del PA-8, sitio 1.

| <b>Variable/Horizonte</b>                                    | <b>Ap</b>          | <b>2Bw</b>     |
|--|--------------------|----------------|
| <b>Densidad Real (g cm<sup>-3</sup>)</b>                     | 2.43               | 2.37           |
| <b>Densidad Aparente (g dm<sup>-3</sup>)</b>                 | 0.80               | 0.90           |
| <b>Humedad (%)</b>   | 44                 | 44             |
| <b>Porosidad (%)</b>   | 60.4               | 62             |
| <b>Arcillas (%)</b>  | 49.03              | 75.63          |
| <b>Limos (%)</b>   | 40.79              | 21.38          |
| <b>Arenas (%)</b>  | 10.18              | 2.99           |
| <b>Clase Textural</b>  | Arcillosa muy fina | Arcillosa fina |
| <b>Resistividad (kg cm<sup>-3</sup>)</b>                     | 2.28               | 2.89           |
| <b>Carbono Orgánico (%)</b>                                  | 1.77               | 0.59           |
| <b>pH (agua 1:2.5)</b>                                       | 5.20               | 4.60           |
| <b>pH (KCl 1:2.5)</b>  | 4.40               | 4.30           |
| <b>CICE (cmol kg<sup>-1</sup>)</b>                           | 26.50              | 21.60          |
| <b>Acidez Extractable (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>)</b> | 23.50              | 19.40          |
| <b>CIC (cmol kg<sup>-1</sup>)</b>                            | 20.60              | 17.30          |
| <b>Saturación de Bases (%)</b>                               | 14.20              | 12.79          |
| <b>Sodio (cmol kg<sup>-1</sup>)</b>                          | 0.28               | 0.25           |
| <b>Potasio (cmol kg<sup>-1</sup>)</b>                        | 0.05               | 0.02           |
| <b>Calcio (cmol kg<sup>-1</sup>)</b>                         | 0.95               | 0.28           |
| <b>Magnesio (cmol kg<sup>-1</sup>)</b>                       | 1.65               | 1.66           |
| <b>Al+0.5Fe (%)</b>  | 1.10               | 1.01           |
| <b>Si (%)</b>  | 0.10               | 0.07           |
| <b>Fe enlazado a materia orgánica (%)</b>                    | 1.14               | 1.21           |
| <b>Al enlazado a materia orgánica (%)</b>                    | 1.25               | 1.65           |
| <b>Fe libre (%)</b>  | 10.17              | 10.36          |

El perfil estudiado en el pastizal tuvo el mismo material parental que el del estudiado en la SAP-M, es decir, las cenizas volcánicas que se cree fueron depositadas en 1793 (Hughes *et al.*, 1999; Ortega *et al.*, 2006).

También este perfil tuvo grandes cantidades de arcilla y limos en la fracción fina y de igual forma considerado pobre en Carbono y bajo en CIC y pH desde el punto de vista agronómico.

Se encontraron rastros de micas transportadas eólicamente en el horizonte Ap (Figura XI, a).

En este perfil se encontró la disminución del pH, CIC, CICE, Acidez Extractable, Saturación de Bases, Densidad Real, Resistividad, Na, K, Ca, Si<sub>ox</sub> y Carbono, conforme aumenta la profundidad del perfil. La Densidad Aparente, Porcentaje de arcillas, Fe<sub>pirof</sub>, Al<sub>pirof</sub>, y Fe<sub>dit</sub>, aumentaron sus valores con el aumento en la profundidad del perfil. No se encontraron cambios sustanciales en Humedad, Porosidad, Mg a ninguna profundidad. En el horizonte 2Bw no se presentan cambios con respecto al perfil de la SAP-M.

La presencia de raíces fue menor conforme aumentó la profundidad del perfil, caso opuesto fue la aparición de acumulaciones de óxidos de Fe y Mn sobre fragmentos de saprolita (Figura IX, c y Figura X, e).

El suelo de este perfil fue clasificado como Andosol vítrico (AN vi) por el sistema de la WRB (2006), por cumplir con las propiedades de tener una moderada cantidad de Al y Fe extractable con oxalato ácido a pH 3 ( $A_{lox} + \frac{1}{2} Fe_{ox} (\%) = 0.4-2.0$ ), una densidad aparente  $< 0.9 \text{ kg dm}^{-3}$  en la capa superficial y por presentar un porcentaje de Vidrio Volcánico  $> 10\%$  en las dos capas superficiales.

## 2.1 Descripción del suelo de Selva Secundaria (SS), Sitio 2

### 2.1.1 Descripción geomorfológica

**Grado de pendiente:** más de 45% aproximadamente.

**Exposición:** norte-noreste.

**Complejidad de la pendiente:** muy irregular y llena de pequeñas terrazas de erosión menos perceptibles que en el otro perfil y con gran cantidad de rocas de basalto de gran tamaño que se encuentran cubiertas con mantillo abundante.

**Forma de la pendiente:** ligeramente plana.

**Posición del perfil en la pendiente:** pie de monte medio.

**Componente geomorfológico:** montaña, en la ladera nor-noreste.

**Microrelieve:** pendiente muy escarpada con ligeras acumulaciones de material en la base de los árboles y existe un flujo concentrado de escorrentía.

**Patrón del drenaje:** drenaje aparentemente eficiente, laminar y concentrado en pequeños y bien definidos fluvios de alta pedregosidad.

**Encharcamiento:** No hay.

**Profundidad del manto freático:** más de 2 m.

**Material parental:** ceniza volcánica, sedimentos de partes altas y grandes rocas de basaltos más oscuros que los del sitio de Monte Pío, además de material ignimbrítico (sapolita) en lo profundo del perfil.

**Erosión:** hídrica, ligera y de clase uno (pérdida de menos del 25% del espesor del horizonte A o E).

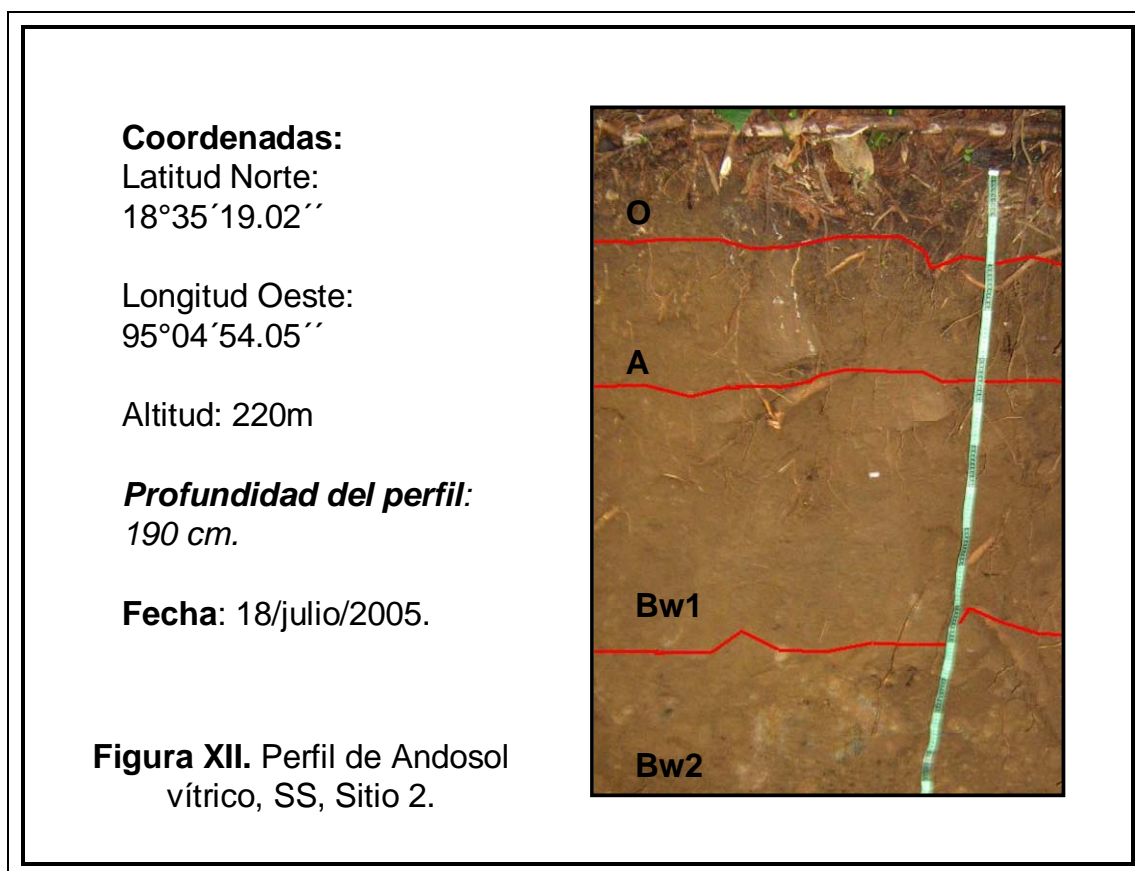
**Vegetación:** Selva Alta Perennifolia en sucesión secundaria caracterizada por abundantes hierbas, trepadoras y por una cubierta arbórea dominante de Guarumbos (*Cecropia obtusifolia*) aparentemente introducidas por el hombre.

**Pedregosidad superficial:** Mucha pedregosidad con rocas de basalto de gran tamaño y cantos pequeños poco o bien redondeados cubiertos por abundante mantillo acumulado.

**Facilidad de excavación del perfil:** muy fácil, excepto por la constante aparición de rocas.

**NOTA:** El perfil (de 190 cm) se encuentra en un interfluvio aproximadamente a la mitad de la elevación dentro de una zona de selva secundaria, el perfil no se encharca como en el otro sitio. Se decidió detener la excavación, debido a la continuidad del material saprolítico que se encuentra en lo profundo del perfil y a la ausencia de raíces, que en este caso no sobrepasan la zona de fragmentos de saprolita.

En la Figura XII, se aprecia la vista general del perfil correspondiente a la SS, sitio 2, con los horizontes correspondientes (delimitados con la línea roja) y su profundidad de referencia.





En el Cuadro 12, se resume la descripción física del perfil del Andosol vítrico de la SS, sitio 2. Por su parte, en Cuadro 13, se muestran las principales pruebas físicas y químicas aplicadas para la descripción del perfil.

### 2.1.2 Descripción del perfil

**Cuadro 12.** Descripción del perfil y pruebas físicas del Andosol vítrico de la SS, sitio 2.

| Horizonte  | Profundidad (cm) | Limite de horizonte  | Estructura  | Adhesividad                                   | Raíces   | Poros   |
|------------|------------------|--|---|---|--|---|
| <i>O</i>   | 0-10             | <b>Contraste:</b> difuso.<br><b>Forma:</b> ondulada en forma de lenguas.     | <b>Tipo:</b> granular.<br><b>Clase:</b> finos, medianos y grandes.<br><b>Grado:</b> débil a moderado. | Poco plástico.                                | <b>Tamaño:</b> mediano finas.<br><b>Clase:</b> muchas.   | <b>Tamaño:</b> muy fino y mediano.<br><b>Clase:</b> abundantes.<br><b>Distribución:</b> expeds e inpedes.<br><b>Orden:</b> tubulares. |
| <i>A</i>   | 10-45            | <b>Contraste:</b> muy difuso.<br><b>Forma:</b> ondulada en forma de lenguas. | <b>Tipo:</b> granular.<br><b>Clase:</b> finos, medianos y grandes.<br><b>Grado:</b> débil a moderado. | Muy plástico.                                 | <b>Tamaño:</b> finas y medianas y algunas gruesas.<br><b>Clase:</b> gruesas, medianas y finas. | <b>Tamaño:</b> fino a mediano.<br><b>Clase:</b> comunes.<br><b>Distribución:</b> expeds e inpedes.<br><b>Orden:</b> tubulares.        |
| <i>Bw1</i> | 45-110           | <b>Contraste:</b> difuso.<br><b>Forma:</b> ondulado.                         | <b>Tipo:</b> granular.<br><b>Clase:</b> finos a medianos.<br><b>Grado:</b> moderado.                  | Muy plástico                                  | <b>Tamaño:</b> gruesas y medianas.<br><b>Clase:</b> poco comunes.                              | <b>Tamaño:</b> mediano y grueso.<br><b>Clase:</b> pocos.<br><b>Distribución:</b> expeds.<br><b>Orden:</b> tubulares.                  |
| <i>Bw2</i> | 110- 190+        | <b>Contraste:</b> difuso.<br><b>Forma:</b> constante.                        | <b>Tipo:</b> granular.<br><b>Clase:</b> finos a medianos.<br><b>Grado:</b> moderado o débil.          | Muy plástico pero con fragmentos de saprolita | <b>Tamaño:</b> gruesas y medianas.<br><b>Clase:</b> poco comunes.                              | <b>Tamaño:</b> mediano y grueso.<br><b>Clase:</b> pocos.<br><b>Distribución:</b> expedidos.<br><b>Orden:</b> tubulares.               |

**Cuadro 13.** Pruebas físicas y químicas del Andosol vítrico de la SS, sitio 2.

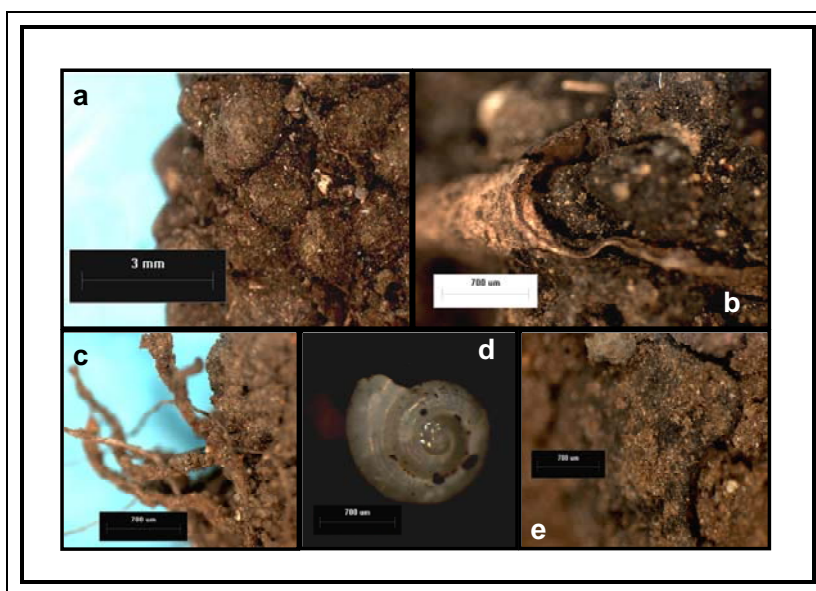
| Horizonte  | Reacciones  | Color  |
|------------|---|--|
| <i>O</i>   | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:</b> efervescencia ausente por M.O. abundante.<br><b>NaF:</b> 0 | <b>Seco:</b> 7.5YR 3/2<br><b>Húmedo:</b> 7.5YR3/2  |
| <i>A</i>   | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:</b> efervescencia lenta.<br><b>NaF:</b> ++                     | <b>Seco:</b> 7.5YR 4/4;<br><b>Seco Manchas:</b> 5YR5/6<br><b>Húmedo:</b> 7.5YR3/2  |
| <i>Bw1</i> | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:</b> efervescencia lenta.<br><b>NaF:</b> +++                    | <b>Seco:</b> 7.5YR 5/4<br><b>Húmedo:</b> 7.5YR4/4  |
| <i>Bw2</i> | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:</b> efervescencia lenta.<br><b>NaF:</b> +++                    | <b>Seco fragmentos de saprolita:</b> 5YR 7/1;<br><b>Seco por toda la roca:</b> 7.5YR5/8;<br><b>Seco en huecos de la roca:</b> 7.5YR3/2<br><b>Húmedo fragmentos de saprolita:</b> 7.5YR 7/0;<br><b>Húmedo por toda la roca:</b> 7.5YR5/8;<br><b>Seco en huecos de la roca:</b> 7.5YR2/0;<br><b>Colores rojizos emergentes:</b> 10R4/8 |

En seguida, se detallan las descripciones mesomorfológicas correspondientes al perfil de la SS, sitio 2. Las microfotografías correspondientes a cada descripción se muestran en la Figura XIII, XIV y XV, según sea el caso.

### 2.1.3 Mesomorfología

#### Horizonte O

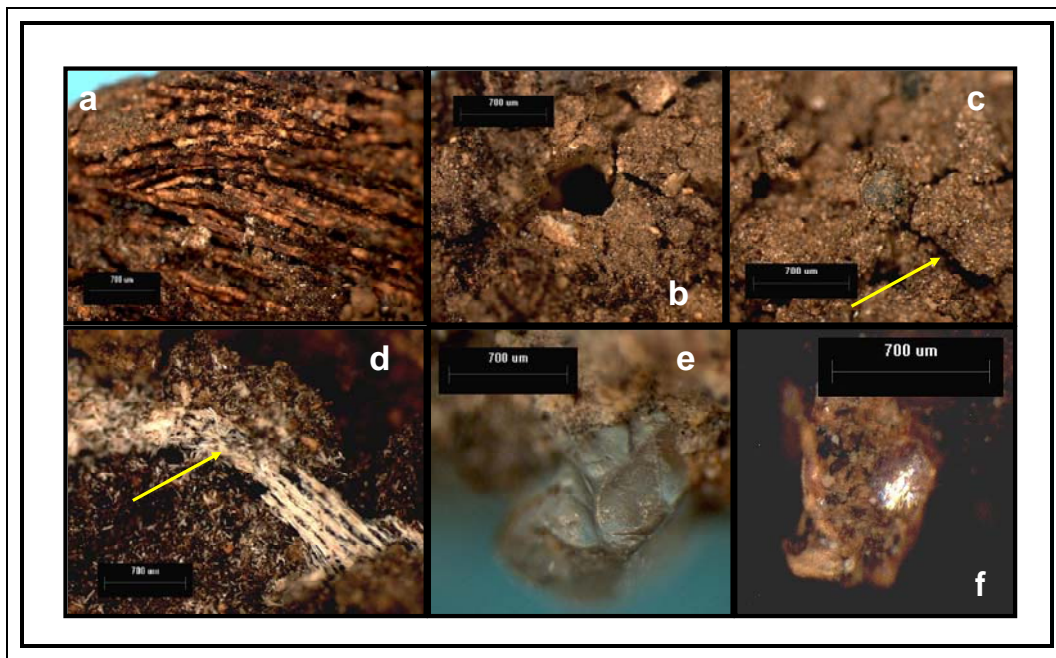
En el 100% de los casos los agregados fueron de color negro oscuro intenso, debido a la naturaleza de este horizonte, ya que es el que está en mayor contacto con el mantillo (Fig. XIIIe). Presencia de abundantes arenas finas y medianas de color blanco, amarillo y rojo, presuntamente de cuarzo, vidrio volcánico, piroxenos y otros minerales dispuestos en las paredes de los agregados (Fig. XIIIa, b y e). Se notan las películas de limo, que son opacas, de apariencia granulosa y algo gruesas. Abundantes restos vegetales dentro y fuera de los agregados (Fig. XIIIa y b). Raíces finas, medianas y gruesas extremadamente abundantes dentro y fuera de los agregados, tal vez como las principales responsables de la formación de la agregación de este horizonte (Fig. XIIIc). Las grietas son abundantes sobre las paredes, son continuas y algunas ramificadas (Fig. XIIIe). Los agregados son más bien masivos y biogénicos (Fig. XIIIa).



**Figura XIII:** Microfotografías *Horizonte O* (a) Agregación biogénica. (b) Restos vegetales en descomposición. (c) Raíces cubiertas de arenas y limos saliendo de un agregado. (d) Restos de fauna activa del mantillo. (e) Arenas finas y abundantes restos orgánicos cerca de una grieta en la superficie de un agregado.

## Horizonte A

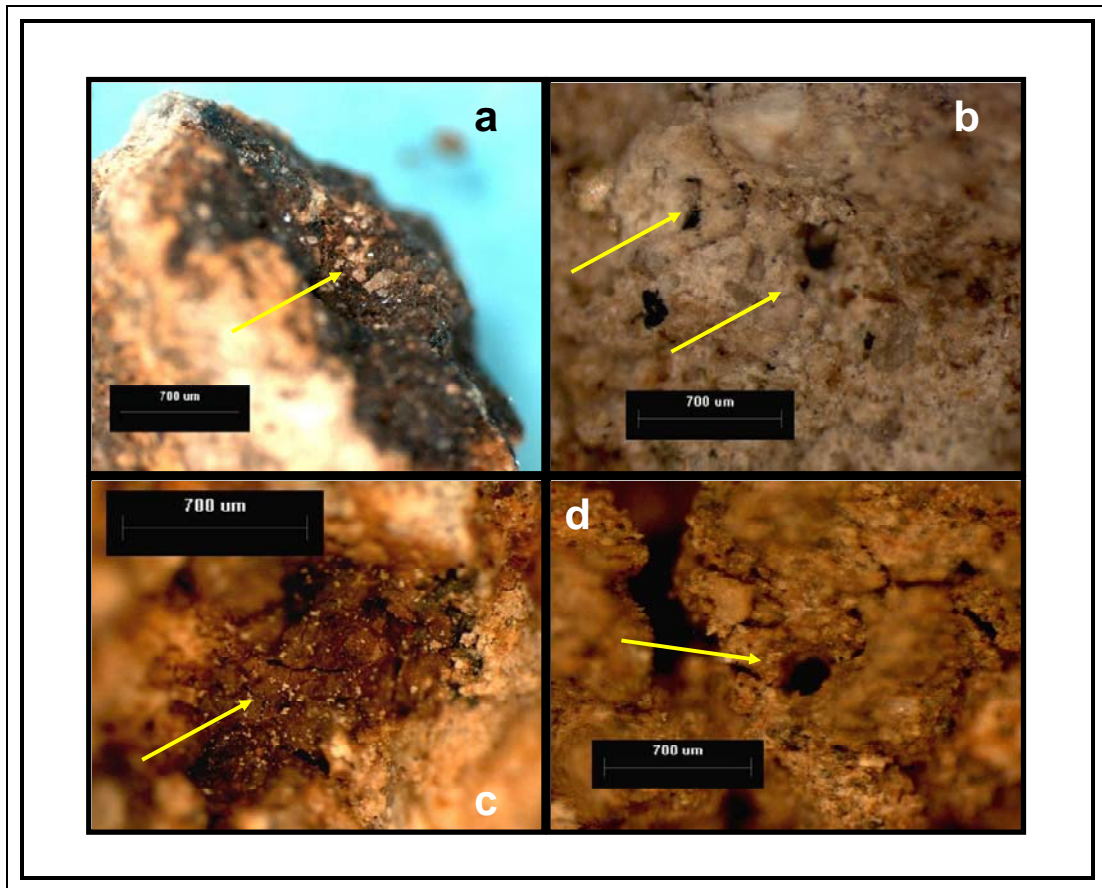
En el 100% de los agregados muy oscuros, ligeramente redondeados, compuestos de fragmentos de saprolita, con abundantes capas oscuras y opacas de limo en las paredes internas y externas de los mismos (Fig. XIVb y c). Grietas muy abundantes, continuas y algunas ramificadas muy profundas (Fig. XIVc). Abundantes oquedades y gran porosidad media a muy fina e incluso de tamaño grueso ( $>1\text{mm}$ ) (Fig. XIVb). Arenas abundantes, de tamaño fino y muy fino de color blanco y amarillo (Fig. XIVE y f). Restos orgánicos de color blanco, fibrosos y opacos que rodean al agregado (Fig. XIVd). Abundantes restos vegetales entre los agregados (Fig. XIVa).



**Figura XIV:** Microfotografías *Horizonte A* (a) Restos vegetales fibrosos. (b) Poro y grietas. (c) Grietas, arenas finas y mineral oscuro. (d) Restos de fibras vegetales descompuestas. (e) Cuarzo sobre agregado con superficie subconcooidal. (f) Mineral no identificado.

## Horizonte *Bw1*

Más del 50% de fragmentos de saprolita en intemperización, unidos por películas de arcilla y limo (estos últimos en mayor proporción que los primeros) (Fig. XVd). Los agregados presentan zonas con pequeños cristales negros como de vidrio volcánico, pero no fue identificado (Fig. XVb). Abundantes arenas blancas finas y otros minerales (Fig. XVa). Abundantes grietas grandes, muy poco continuas, interrumpidas y algunas ramificadas (Fig. XVd). No hay raíces. No hay restos biológicos, solo material mineral. Microporosidad presente solo en algunos agregados (Fig. XVd). Manchas de color oscuro en las paredes, de óxidos de manganeso. Películas de arcilla biogénicas en el interior de los fragmentos de saprolita como evidencia de intemperismo activo (Fig. XVc).



**Figura XV:** Microfotografías *Horizonte Bw1* (a) Vista interior de una saprolita con abundantes minerales. (b) Abundantes minerales inmersos en una matriz de saprolita. (c) Películas de arcilla biogénicas en hoquedad de saprolita. (d) Poro en saprolita con limos escasos.

## Horizonte Bw2

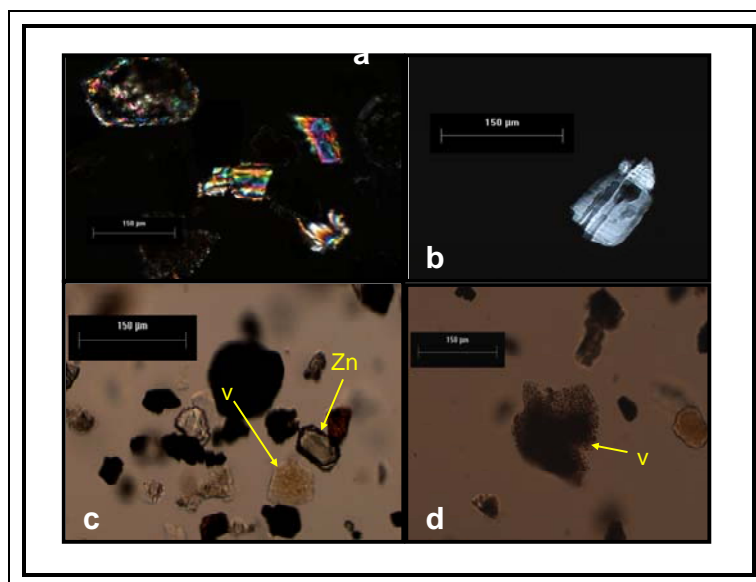
Más del 70% de los casos fueron macroagregados de fragmentos de saprolita, unidos por películas de arcilla y limo de color rojizo y pardo oscuro, respectivamente. Abundantes oquedades y fracturas en la roca muy anchas. Películas de arcilla roja brillante en oquedades. Algunas arenas finas blancas y rojizas en las paredes. Pocos depósitos de óxidos de Fe y Mn, de forma esférica en las oquedades. No hay raíces. Ni restos biológicos, solo roca madre.

En el Cuadro 14, se muestran los porcentajes de vidrio volcánico del Andosol vítrico de la SS, sitio 2. En la Figura XVI, se muestran las microfotografías obtenidas durante el conteo con Microscopio Petrográfico.

### 2.1.4 Porcentaje de vidrio volcánico

**Cuadro 14.** Porcentajes de vidrio volcánico del Andosol vítrico de la SS, sitio 2.

| Variable/Horizonte                     | A           | Bw1      |
|--|-------------|----------|
| Vidrio Volcánico Fracción 0.075 mm (%) | 2           | 2        |
| Vidrio Volcánico Fracción >0.25 mm (%) | 19          | 16       |
| <i>Media</i>                           | <b>10.5</b> | <b>9</b> |



**Figura XVI:** Microfotografías (a) Piroxenos con nícoles cruzados, *Horizonte A*. (b) Plagioclasa con nícoles cruzados y maclas, *Horizonte A*. (c) Vidrio (v) con minerales opacos y otros minerales como plagioclasas, Zircón (Zn) y piroxenos, *Horizonte A*. (d) Vidrio parcialmente sustituido en los bordes que se muestran con muescas (v), *Horizonte Bw1*.



En el Cuadro 15, se presenta la clasificación del horizonte orgánico según el Índice von Post. Mientras que, en el Cuadro 16, se muestran las propiedades químicas y físicas del Andosol vítrico de la SS, sitio 2.

### 2.1.5 Composición de Horizonte Orgánico

**Cuadro 15.** Descripción de Horizonte Orgánico, del Andosol vítrico de la SS, sitio 2.

|   |   |
|---|---|
| <b>Índice de Composición del horizonte orgánico</b> | <b>4 (Débilmente descompuesto:</b> se distinguen estructuras de plantas; agua fuertemente turbia; no pasan materiales de turba entre los dedos; con poco abono o poco humificada; material no pulposo). |
|---|---|

### 2.1.6 Propiedades químicas y físicas del perfil

**Cuadro 16.** Propiedades químicas y físicas del Andosol vítrico de la SS, sitio 2.

| Variable/Horizonte                                       | O     | A                     | Bw1              | Bw2  |
|--|-------|-----------------------|------------------|------|
| Densidad Real (g cm <sup>-3</sup> )                      | 1.67  | 2.27                  | 2.43             | --   |
| Densidad Aparente (g dm <sup>-3</sup> )                  | 0.57  | 0.77                  | 1.03             | --   |
| Humedad (%)  | 77.00 | 28.00                 | 43.00            | --   |
| Porosidad (%)  | 65.25 | 66.06                 | 54.40            | --   |
| Arcillas (%)   | --    | 27.55                 | 33.92            | --   |
| Limos (%)  | --    | 52.13                 | 52.48            | --   |
| Arenas (%)   | --    | 20.32                 | 13.60            | --   |
| Clase Textural   | --    | Franco-arcillosa fina | Franco arcillosa | --   |
| Resistividad (kg cm <sup>-3</sup> )                      | 0.80  | 1.06                  | 1.41             | 3.17 |
| Carbono Orgánico (%)                                     | 26.66 | 5.43                  | 1.49             | --   |
| pH (agua 1:2.5)  | 5.92  | 5.80                  | 5.61             | 5.62 |
| pH (KCl 1:2.5)   | 5.47  | 5.27                  | 4.32             | 3.27 |
| CICE (cmol kg <sup>-1</sup> )                            | 49.91 | 32.21                 | 28.22            | --   |
| Acidez Extractable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | 34.75 | 20.67                 | 17.01            | --   |
| CIC (cmol kg <sup>-1</sup> )                             | 39.00 | 27.75                 | 24.86            | --   |
| Saturación de Bases (%)                                  | 38.88 | 41.58                 | 45.05            | --   |
| Sodio (cmol kg <sup>-1</sup> )                           | 0.22  | 0.32                  | 0.36             | --   |
| Potasio (cmol kg <sup>-1</sup> )                         | 0.94  | 0.89                  | 1.91             | --   |
| Calcio (cmol kg <sup>-1</sup> )                          | 10.65 | 6.80                  | 5.12             | --   |
| Magnesio (cmol kg <sup>-1</sup> )                        | 3.35  | 3.53                  | 3.80             | --   |
| Al+0.5Fe (%)   | 1.18  | 1.19                  | 1.03             | --   |
| Si (%)   | 0.16  | 0.11                  | 0.10             | --   |
| Fe enlazado a materia orgánica (%)                       | 0.35  | 0.55                  | 0.57             | --   |

|   |      |      |      |    |
|---|------|------|------|----|
| <b>Al enlazado a materia orgánica (%)</b> | 0.33 | 0.63 | 0.85 | -- |
| <b>Fe libre (%)</b>                       | 2.50 | 4.50 | 3.97 | -- |

Los perfiles de este sitio son diferentes a los del sitio anterior pero debido a la mineralogía no se descarta que, al menos en las capas superficiales se trate de un material parental similar al sitio 1.

El perfil estudiado muestra algo que lo distingue de los demás, debido a su condición de ser un sitio de vegetación secundaria y con una especial dominancia de la especie pionera *Cecropia obtusifolia*. Esta planta generó la mayoría de las propiedades del Horizonte O, en general y comparándose con la parte mineral del suelo, se puede decir que se presentó un incremento de Humedad, Carbono, pH, CICE, Acidez Extractable, CIC, y de Ca. Decrementos en Densidad Real y Aparente, Saturación de Bases,  $Fe_{\text{pirof}}$ ,  $Al_{\text{pirof}}$ , y  $Fe_{\text{dit}}$ , Na, K y Mg. En tanto que la porosidad permaneció sin cambios.

Este perfil no tuvo grandes cantidades de arcilla y limos en la fracción fina y fue considerado con cantidades regulares a altas de Carbono y por la CIC y se le consideró en un grado de regular a mediano desde el punto de vista agronómico.

En la parte mineral se encontró una tendencia de decremento hacia la profundidad del perfil en Porosidad, contenidos de arcilla, Carbono, pH, CICE, Acidez, CIC, Ca, y  $Fe_{\text{dit}}$ . Hubo una tendencia a aumentar en Densidad Real y Aparente, Humedad, Resistividad, Saturación de Bases,  $Al_{\text{pirof}}$ , Na, K y Mg. En tanto que,  $Fe_{\text{pirof}}$  se mantuvo sin cambios.

El horizonte orgánico mostró un bajo grado de descomposición pero abundante presencia de microorganismos como hongos.

La presencia de raíces fue menor conforme la profundidad del perfil aumentó, pero en este caso una capa de saprolita es el impedimento físico para su paso. No se encontraron

minerales transportados eólicamente pero sí evidencias de intemperismo de saprolita por actividad biológica, como las películas de arcillas biogénicas en oquedades (Figura XVc).

Este perfil también fue clasificado como Andosol vítrico (AN vi) por el sistema de la WRB (2006), por cumplir con las propiedades de tener una moderada cantidad de Al y Fe extractable con oxalato ácido a pH 3 ( $A_{lox} + \frac{1}{2} F_{eox} (\%) = 0.4-2.0$ , una densidad aparente  $< 0.9 \text{ kg dm}^{-3}$  en la capa superficial y por presentar un porcentaje de Vidrio Volcánico  $> 10\%$  en las dos capas superficiales.



## 2.2 Descripción del suelo de Potrero de 15 años (PA-15), Sitio 2

### 2.2.1 Descripción geomorfológica

**Grado de pendiente:** más de 45% aproximadamente.

**Exposición:** nor-noreste.

**Complejidad de la pendiente:** muy irregular y llena de pequeñas terrazas de erosión y con gran cantidad de rocas basálticas superficiales de gran tamaño (mayores de 30 cm y hasta de 50 cm).

**Forma de la pendiente:** ligeramente plana pero con algunas pequeñas elevaciones.

**Posición del perfil en la pendiente:** pie de monte medio.

**Componente geomorfológico:** montaña, en la ladera nor-noreste.

**Microrelieve:** con muchas pequeñas terrazas producto de la erosión.

**Patrón del drenaje:** drenaje aparentemente eficiente, laminar y concentrado en pequeños, escasos y casi imperceptibles fluvios de alta pedregosidad.

**Encharcamiento:** solo en las zonas bajas.

**Profundidad del manto freático:** más de 2 m. El suelo no parecía tener gran retención de agua.

**Material parental:** ceniza volcánica, sedimentos de partes altas y rocas de basaltos más oscuros que los del sitio de Monte Pío, además de material ignimbrítico (saproлита) en lo profundo del perfil.

**Erosión:** hídrica, intensa a media y de clase tres (pérdida de al menos 75% de horizonte superficial)

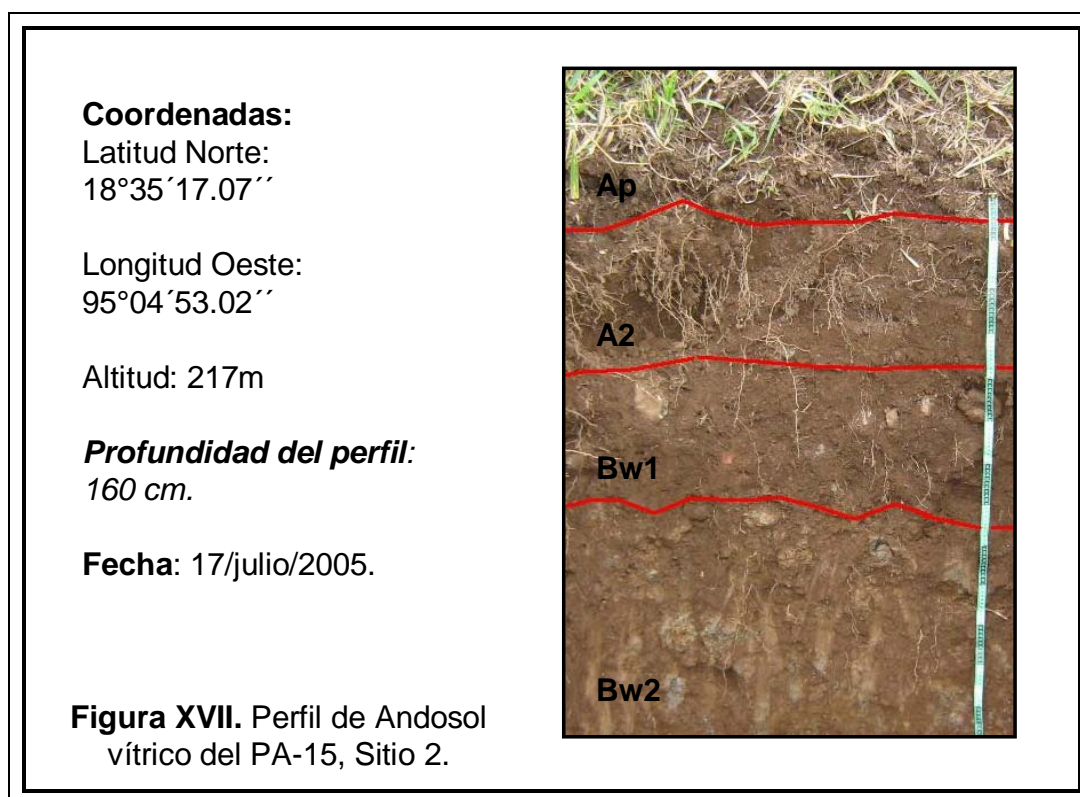
**Vegetación:** Pastizal muy alto y con crecimiento en macollos, con fuertes raíces, resistentes y gruesas, además de la presencia de algunos arbustos de selva secundaria de algunas hierbas que subsisten en el interior del pastizal.

**Pedregosidad superficial:** Mucha pedregosidad con rocas de basaltos de gran tamaño y cantos pequeños poco o bien redondeados.

**Facilidad de excavación del perfil:** muy fácil, excepto por la constante aparición de rocas de gran tamaño.

**NOTA:** El perfil (de 160 cm) se encuentra en un interfluvio aproximadamente a la mitad de la elevación dentro de una zona de pastizal y el perfil no se encharca como en el otro sitio. Se decidió detener la excavación, debido a la continuidad del material saprolítico que se encontró y a la ausencia de raíces en lo profundo del perfil.

En la Figura XVII, se aprecia la vista general del Andosol vítrico del PA-15, sitio 2, con sus respectivos horizontes (delimitados con la línea roja) y con su profundidad de referencia.



En el Cuadro 17, se resume la descripción física del Andosol vítrico del PA-15, sitio 2. Por otro lado, en el Cuadro 18, se muestran las principales pruebas físicas y químicas aplicadas al Andosol vítrico del PA-15, sitio 2.

### 2.2.2 Descripción del perfil

**Cuadro 17.** Descripción del perfil y pruebas físicas del Andosol vítrico del PA-15, sitio 2.

| Horizonte  | Profundidad (cm) | Limite de horizonte  | Estructura  | Adhesividad                                       | Raíces   | Poros  |
|------------|------------------|--|---|---|--|--|
| <i>Ap</i>  | 0-5              | <b>Contraste:</b> muy difuso.<br><b>Forma:</b> ondulada en forma de lenguas ligeras. | <b>Tipo:</b> granular.<br><b>Clase:</b> finos, medianos y grandes.<br><b>Grado:</b> débil a moderado. | Poco plástico.                                    | <b>Tamaño:</b> mediano y fino.<br><b>Clase:</b> muchas.  | <b>Tamaño:</b> muy fino y mediano.<br><b>Clase:</b> muchos.<br><b>Distribución:</b> expedidos e impedidos.<br><b>Orden:</b> tubulares. |
| <i>A2</i>  | 5-37             | <b>Contraste:</b> muy difuso.<br><b>Forma:</b> ondulada en forma de lenguas.         | <b>Tipo:</b> granular.<br><b>Clase:</b> finos, medianos y grandes.<br><b>Grado:</b> débil a moderado. | Muy plástico.                                     | <b>Tamaño:</b> fino, mediano y grueso.<br><b>Clase:</b> gruesas y disminución de medias y finas. | <b>Tamaño:</b> fino a mediano.<br><b>Clase:</b> comunes.<br><b>Distribución:</b> expedidos e impedidos.<br><b>Orden:</b> tubulares.    |
| <i>Bw1</i> | 37-76            | <b>Contraste:</b> difuso.<br><b>Forma:</b> ondulada.                                 | <b>Tipo:</b> granular.<br><b>Clase:</b> finos y medianos.<br><b>Grado:</b> moderado.                  | Muy plástico.                                     | <b>Tamaño:</b> grueso y mediano.<br><b>Clase:</b> poco comunes.                                  | <b>Tamaño:</b> mediano y grueso.<br><b>Clase:</b> pocos.<br><b>Distribución:</b> expedidos.<br><b>Orden:</b> tubulares.                |
| <i>Bw2</i> | 76-160+          | <b>Contraste:</b> difuso.<br><b>Forma:</b> constante.                                | <b>Tipo:</b> granular;<br><b>Clase:</b> finos y medianos.<br><b>Grado:</b> débil.                     | Muy plástico pero con más fragmentos de saprolita | <b>Tamaño:</b> gruesas y mediano.<br><b>Clase:</b> poco comunes.                                 | <b>Tamaño:</b> mediano o grueso.<br><b>Clase:</b> pocos.<br><b>Distribución:</b> expedidos.<br><b>Orden:</b> tubulares.                |

**Cuadro 18.** Pruebas físicas y químicas del Andosol vítrico del PA-15, sitio 2.

| Horizonte  | Reacciones   | Color  |
|------------|--|--|
| <i>Ap</i>  | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:</b> efervescencia lenta.<br><b>NaF:</b> +     | <b>Seco:</b> 7.5YR 4/2<br><b>Húmedo:</b> 7.5YR3/2  |
| <i>A2</i>  | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:</b> efervescencia lenta.<br><b>NaF:</b> +++   | <b>Seco:</b> 7.5YR 5/1<br><b>Húmedo:</b> 7.5YR3/4  |
| <i>Bw1</i> | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:</b> efervescencia lenta.<br><b>NaF:</b> ++    | <b>Seco:</b> 7.5YR 5/4<br><b>Húmedo:</b> 7.5YR3/4  |
| <i>Bw2</i> | <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:</b> efervescencia lenta.<br><b>NaF:</b> +++++ | <b>Seco:</b> 7.5YR 5/4;<br><b>Seco fragmentos de roca:</b> 7.5YR5/4<br><b>Húmedo:</b> 7.5YR3/4 |

A continuación, se presenta el análisis mesomorfológico del Andosol vítrico del PA-15, sitio 2. Las microfotografías correspondientes a cada descripción se muestran en la Figura XVIII, XIX y XX, según sea el caso.

### 2.2.3 Mesomorfología

#### Horizonte Ap

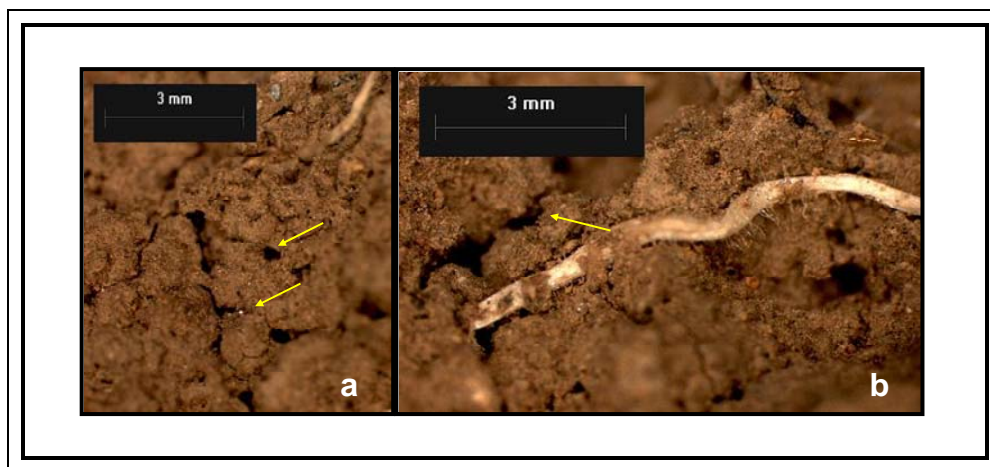
El 100% de los agregados son de color pardo, con abundantes fragmentos de saprolita intemperizada, cubiertos de películas de limo y en muy menor cantidad de arcilla de color café claro (Fig. XVIIIa y d). Con abundantes grietas y raíces finas y medianas, del mismo pasto (Fig. XVIIIa). Poca presencia de arenas en los agregados. Cristales de mica u otro tipo de silicato. Algunas acumulaciones de óxidos de Fe en las zonas de roca desnuda de saprolita intemperizada y en canales de raíz (Fig. XVIIIc y e). Horizonte con >20% de gravas. Abundantes restos vegetales dentro y fuera de los agregados (Fig. XVIIIb)



**Figura XVIII:** Microfotografías *Horizonte Ap* (a) Abundantes raíces saliendo de un agregado. (b) Restos vegetales en descomposición sobre la pared de un agregado. (c) Antiguo canal de raíz con óxidos de Fe en las paredes. (d) Vista más cercana de las raíces envolventes sobre un agregado. (e) Películas de limos, grietas y raíces con óxidos de Fe depositados sobre su superficie.

## Horizonte A2

Más del 40% de los agregados con abundantes fragmentos de saprolita en su interior y periferia, a menudo, los mismos fragmentos de saprolita están formando los mismos agregados en este caso. Abundan las películas de limo (>90% de los casos) y predominan sobre la arcilla, que se ve restringida a oquedades y depósitos dentro de grietas y porosidades (Fig. XIXa y b). Grietas continuas, discontinuas y ramificadas por todas las paredes de los agregados (Fig. XIXa). Arenas muy finas, blancas y rojas en poca a mediana abundancia. Raíces finas a medianas dentro y fuera de los agregados. Porosidad de tamaño muy fino y oquedades abundantes (Fig. XIXa).



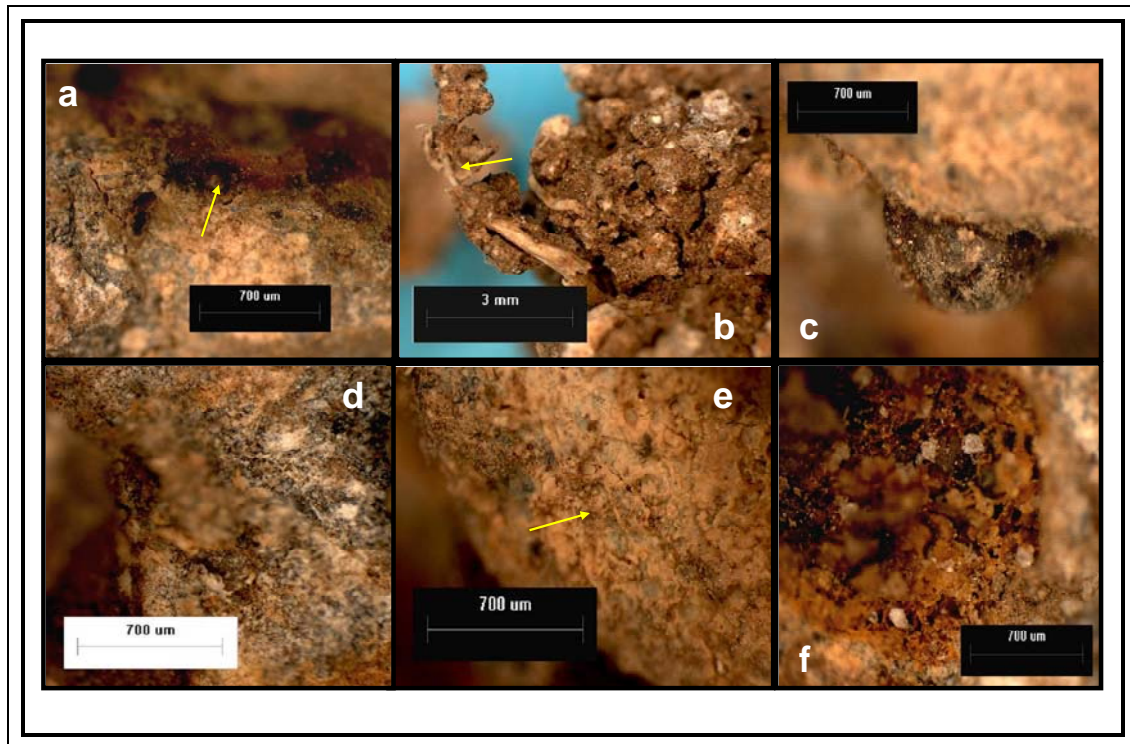
**Figura XIX:** Microfotografías *Horizonte A2* (a) Abundantes arenas finas sobre las paredes de un agregado. (b) Poros finos y raíces de pasto.

## Horizonte Bw1

Más del 70% de los agregados aparecen revueltos con fragmentos de saprolita, a menudo no se sabe si es un agregado de fragmentos más pequeños de roca o si se trata de un agregado común de partículas más finas de arcilla, limo y arenas (Fig. XXb). Las películas de arcilla son menos abundantes que las de limo, y se ven menos opacas y oscuras que éstas últimas y se encuentran en todas las paredes de los agregados en todos los casos (Fig. XXd y e). Las grietas que se encuentran en las paredes cubiertas o hechas de limo y arcilla, éstas son cortas, poco continuas y ramificadas (Fig. XXb). Se encuentran abundantes arenas de pequeño



tamaño de color blanco (menores a 0.5 mm) (Fig. XXe y f). Se encontraron abundantes restos de raíces de apariencia fibrosa, blancas, brillantes y de más o menos 0.2 mm de diámetro, principalmente en la periferia de los agregados aunque también dentro de los mismos. Abundantes oquedades y porosidad fina y mediana. Abundantes películas de arcilla de origen orgánico como indicación de acelerado intemperismo junto con abundantes minerales dentro de la saprolita (Fig. XXa, c y f).



**Figura XX:** Microfotografías *Horizonte Bw1* (a) Películas de arcilla en el interior de una oquedad de saprolita (flecha). (b) Raíz proyectándose hacia el exterior de una agregación de fragmentos de saprolita (flecha). (c) Formación esférica de origen orgánico en el interior de una saprolita en intemperismo activo. (d) Pared de saprolita con material limoso. (e) Pared de saprolita con arcilla y minerales a la vista (flecha). (f) Películas de arcilla biogénicas en oquedad de saprolita con abundantes minerales.

### **Horizonte Bw2**

Horizonte con agregados muy escasos y regularmente formados por uniones de fragmentos de saprolita muy pequeños unidos con películas de limo y arcilla. Predominan los fragmentos muy grandes de saprolita. Películas de limo sobre los fragmentos y otras películas de arcilla roja dentro de oquedades y grietas. Pocos óxidos de Fe depositados. Raíces escasas

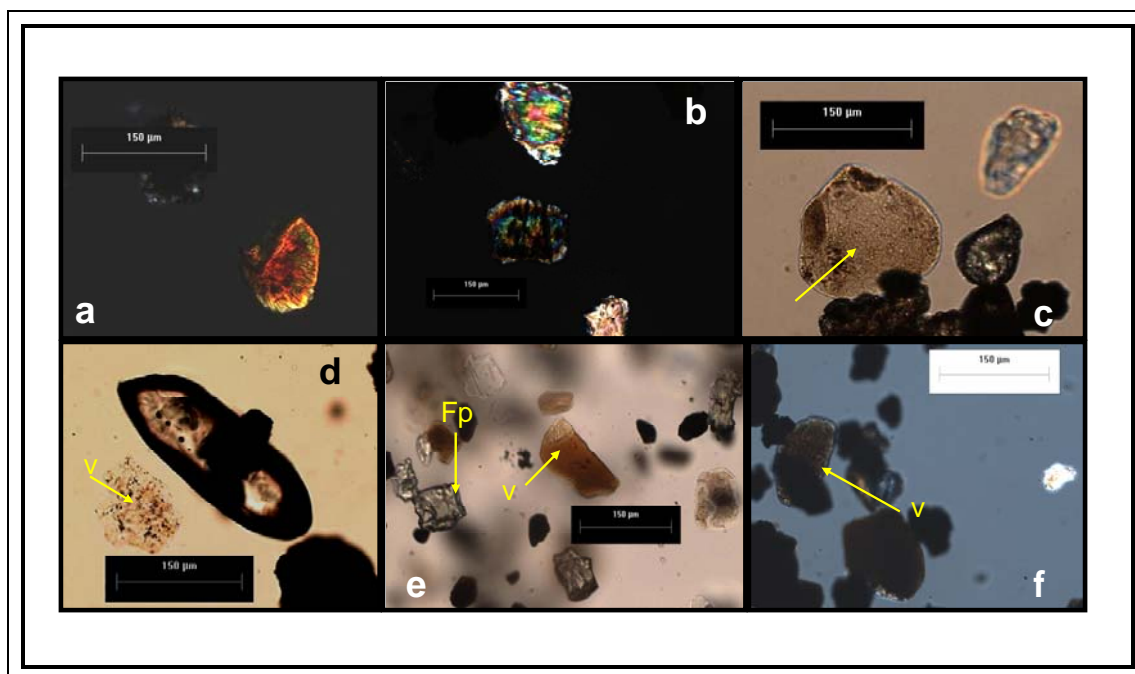
muy finas dentro de los agregados. Pocas arenas finas como las de los otros horizontes superiores. No existen los cristales vistos en los horizontes suprayacentes.

En el Cuadro 19, se presentan los porcentajes de vidrio volcánico en el Andosol vítrico del PA-15, sitio 2. Las imágenes de minerales obtenidas durante el conteo con el Microscopio Petrográfico se presentan en la Figura XXI.

#### 2.2.4 Porcentaje de vidrio volcánico

**Cuadro 19.** Porcentajes de vidrio volcánico del Andosol vítrico del PA-15, sitio 2.

| Variable/Horizonte                    | <i>Ap</i>   | <i>A2</i>   |
|---------------------------------------|-------------|-------------|
| Vidrio Volcánico Fracción 0.075mm (%) | 4           | 5           |
| Vidrio Volcánico Fracción >0.25mm (%) | 19          | 16          |
| <i>Media</i>                          | <b>11.5</b> | <b>10.5</b> |



**Figura XXI:** Microfotografías (a) Mica con nícoles cruzados, *Horizonte A2*. (b) Piroxenos intemperizados con nícoles cruzados, *Horizonte A2*. (c) Mica (flecha) con minerales opacos y plagioclasa, *Horizonte A2*. (d) Zircón con extremos bipiramidales y vidrio parcialmente sustituido (v), *Horizonte A2*. (e) Vidrio (v) y plagioclasas (Fp), *Horizonte A2*. (f) Vidrio (v) y minerales opacos predominantes, *Horizonte Bw1*.

En el Cuadro 20, se presentan las propiedades químicas y físicas del Andosol vítrico del PA-15, sitio 2.

### 2.2.5 Propiedades químicas y físicas del perfil

**Cuadro 20.** Propiedades químicas y físicas del Andosol vítrico del PA-15, sitio 2.

| Variable/Horizonte                                       | <i>Ap</i> | <i>A2</i>             | <i>Bw1</i>       | <i>Bw2</i> |
|--|-----------|-----------------------|------------------|------------|
| Densidad Real (g cm <sup>-3</sup> )                      | 2.10      | 2.70                  | 2.40             | --         |
| Densidad Aparente (g dm <sup>-3</sup> )                  | 0.83      | 1.00                  | 1.03             | --         |
| Humedad (%)  | 61.00     | 29.00                 | 30.00            | --         |
| Porosidad (%)  | 60.69     | 62.33                 | 56.84            | --         |
| Arcillas (%)   | --        | 29.42                 | 25.52            | --         |
| Limos (%)  | --        | 51.17                 | 53.43            | --         |
| Arenas (%)   | --        | 19.41                 | 21.05            | --         |
| Clase Textural   | --        | Franco-arcillo-limosa | Franco-arcillosa | --         |
| Resistividad (kg cm <sup>-3</sup> )                      | 0.80      | 1.36                  | 1.57             | 2.04       |
| Carbono Orgánico (%)                                     | 5.83      | 1.82                  | 0.52             | --         |
| pH (agua 1:2.5)  | 5.55      | 5.74                  | 5.63             | 6.00       |
| pH (KCl 1:2.5)   | 4.95      | 4.72                  | 4.50             | 3.90       |
| CICE (cmol kg <sup>-1</sup> )                            | 36.36     | 30.63                 | 27.97            | --         |
| Acidez Extractable (cmol <sub>e</sub> kg <sup>-1</sup> ) | 23.07     | 17.92                 | 15.70            | --         |
| CIC (cmol kg <sup>-1</sup> )                             | 26.60     | 22.80                 | 25.10            | --         |
| Saturación de Bases (%)                                  | 49.90     | 55.80                 | 48.80            | --         |
| Sodio (cmol kg <sup>-1</sup> )                           | 0.17      | 0.22                  | 0.30             | --         |
| Potasio (cmol kg <sup>-1</sup> )                         | 1.13      | 0.73                  | 0.40             | --         |
| Calcio (cmol kg <sup>-1</sup> )                          | 7.94      | 8.19                  | 7.28             | --         |
| Magnesio (cmol kg <sup>-1</sup> )                        | 4.04      | 3.58                  | 4.27             | --         |
| Al+0.5Fe (%)   | 1.34      | 1.14                  | 1.16             | --         |
| Si (%)   | 0.13      | 0.11                  | 0.11             | --         |
| Fe enlazado a materia orgánica (%)                       | 0.48      | 0.49                  | 0.46             | --         |
| Al enlazado a materia orgánica (%)                       | 0.41      | 0.66                  | 0.71             | --         |
| Fe libre (%)   | 3.51      | 4.31                  | 4.34             | --         |

Este perfil tampoco tuvo grandes cantidades de arcilla y limos en la fracción fina, fue más bien franco arcilloso y se consideró con un porcentaje regular a alto de Carbono y por los valores



de CIC y se le consideró en un grado de regular a mediano desde el punto de vista agronómico al igual que referencia de selva secundaria.

En general, se encontraron decrementos hacia la profundidad del perfil en Humedad, contenidos de arcilla, Carbono, CICE, Acidez, y K. La tendencia a aumentar fue en Densidad Aparente, Resistividad,  $Al_{\text{pirof}}$  y Na. En este perfil se encontró que algunas variables disminuían sus valores en el Horizonte A2 y lo aumentaban de nuevo en el Bw1 y esas fueron pH, Densidad Real, Porosidad, CIC, Saturación de Bases, Ca, y  $Fe_{\text{dit}}$ , Mg. Mientras que sólo  $Fe_{\text{pirof}}$  se mantuvo sin cambios.

La presencia de raíces fue disminuyendo conforme aumentaba la profundidad del perfil, pero también en este caso una capa de saprolita fue el impedimento físico para su paso.

Finalmente, este perfil también fue clasificado como Andosol vítrico (AN vi) por el sistema de la WRB (2006), por cumplir con las propiedades de tener una moderada cantidad de Al y Fe extractable con oxalato ácido a pH 3 ( $Alox + \frac{1}{2} Feox (\%) = 0.4-2.0$ ), una densidad aparente  $> 0.9 \text{ kg dm}^{-3}$  en la capa superficial y por presentar un porcentaje de Vidrio Volcánico  $> 10\%$  en las dos capas superficiales.

A continuación, se presentan los Índices de Calidad que se obtuvieron con el sistema FCC y se les explican brevemente.

## *Determinación de Índices de Calidad del suelo*

**Cuadro 21.** Índices de Calidad del suelo obtenidos por el sistema *Fertility Capability Soil Classification, Versión 4.*

| Sitio | Determinación | Características  |
|-------|---------------|--|
| SAP-M | $Cr^+ a$      | Superficie arcillosa sin cambios texturales en 50 cm; entre 10-35% de gravas; pendiente de 15 a 30%; (pH <5.5) posible toxicidad por aluminio para los cultivos comunes; (K < 0.20 cmol/kg de suelo) por lo tanto, con deficiencias de K.  |
| PA-8  | $CCr^{++} a$  | Superficie y subsuelo arcillosos; $\geq 35\%$ (por volumen) de fragmentos de gravas de tamaño grueso (2 a 25 cm de diámetro) en cualquier parte de los 50 cm de suelo; pendiente de 15 a 30%; (pH <5.5) posible toxicidad por aluminio para los cultivos comunes, (K < 0.20 cmol/kg) por lo tanto, con deficiencias de K.  |
| SS    | $LR^{++}$     | Superficie mezclada (< 35% de arcilla) con capa de roca que impide el paso de raíces en 50 cm; $\geq 35\%$ (por volumen) de fragmentos de gravas de tamaño grueso (2 a 25 cm de diámetro) en cualquier parte de los 50 cm de suelo; pendiente > 30%; riesgo alto de erosión por pendiente; (pH entre 5.5 y 7.2) sin mayores limitaciones químicas, (K > 0.20 cmol/kg) por lo tanto, sin deficiencias de K. |
| PA-15 | $LR^{++}$     | Superficie mezclada (< 35% de arcilla) con capa de roca que impide el paso de raíces en 50 cm; $\geq 35\%$ (por volumen) de fragmentos de gravas de tamaño grueso (2 a 25 cm de diámetro) en cualquier parte de los 50 cm de suelo; pendiente > 30%; riesgo alto de erosión por pendiente; (pH entre 5.5 y 7.2) sin mayores limitaciones químicas, (K > 0.20 cmol/kg) por lo tanto, sin deficiencias de K. |

Mediante esta metodología se pudo determinar que en la SAP-M del sitio 1, no se presentaron cambios texturales dentro de los primeros 50 cm, lo que si se logró identificar en el perfil del PA-8, donde se encontró un aumento abrupto en los contenidos de arcilla en el horizonte subsuperficial de más de 20% con respecto al horizonte superficial. También se identificó un aumento en la pedregosidad superficial del PA-8 como evidencia de erosión activa por la elevada pendiente del sitio (15-30%). Adicionalmente, se encontró que el sitio cuenta con una baja fertilidad por los niveles de  $K < 0.20$  cmol/kg de suelo y  $pH < 5.5$ , por lo que posiblemente se presentaba una toxicidad por Al para la mayoría de los cultivos comerciales pero aparentemente no para las plantas silvestres locales.

En contraste, el Andosol vítrico reportado para ambos perfiles del sitio 2, mostró tener una superficie de textura mezclada más bien arenosa con abundantes fragmentos de roca, lo que estuvo acompañado de una capa dura de roca, que impedía el paso de las raíces a una profundidad mayor a los 50 cm. La pendiente tan elevada supone que el sitio se encontraba en alto riesgo de erosión predominantemente hídrica y en casos muy especiales en alto riesgo de mostrar movimientos de masa o derrumbes. El pH y los niveles de K, indicaron que el sitio tiene una alta fertilidad y que no presentaba ningún tipo de toxicidad asociada a Al.

A continuación, se muestran los análisis estadísticos de las muestras superficiales (primeros 30 cm) en ambos sitios, mediante la prueba estadística *ROC*. Los resultados se explican brevemente.

## *Análisis de muestras superficiales*

**Cuadro 22.** Índices Externos de Calidad del suelo analizados con la prueba ROC ( $P < 0.01$ ).

| Variable/Sitio  | Sitio 1       |              | Sitio 2       |               |
|---|---------------|--------------|---------------|---------------|
|   | SAP-M         | PA-8         | SS            | PA-15         |
| Resistividad ( $\text{kg cm}^{-3}$ )                              | 2.22          | 2.28         | <b>1.06*</b>  | <b>1.36*</b>  |
| Carbono Orgánico (%)  | 1.54          | 3.69         | 5.68          | 5.56          |
| CICE ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )                                    | 24.69         | 27.07        | 24.15         | 29.70         |
| Acidez Extractable ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )             | 18.48         | 20.12        | 15.50         | 16.41         |
| CIC ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )                                     | 23.39         | 23.96        | <b>27.01*</b> | <b>22.80*</b> |
| Saturación de Bases (%)   | 26.17         | 26.9         | <b>31.86*</b> | <b>58.66*</b> |
| Sodio ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )                                   | 0.28          | 0.26         | 0.27          | 0.26          |
| Potasio ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )                                 | 0.42          | 0.38         | 0.64          | 0.82          |
| Calcio ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )                                  | 1.95          | 4.07         | 4.38          | 8.97          |
| Magnesio ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )                                | <b>3.56*</b>  | <b>2.24*</b> | 3.35          | 3.23          |
| Fe <sub>pirof</sub> (%)   | 0.96          | 0.96         | 0.45          | 0.66          |
| Al <sub>pirof</sub> (%)   | 1.01          | 0.97         | 0.47          | 0.69          |
| Estabilidad de agregados  | 1.25          | 1.60         | 0.21          | 0.26          |
| Tasa de Infiltración instantánea a 1 min ( $\text{ml min}^{-1}$ ) | <b>28.94*</b> | <b>84*</b>   | <b>31.2*</b>  | <b>79.3*</b>  |

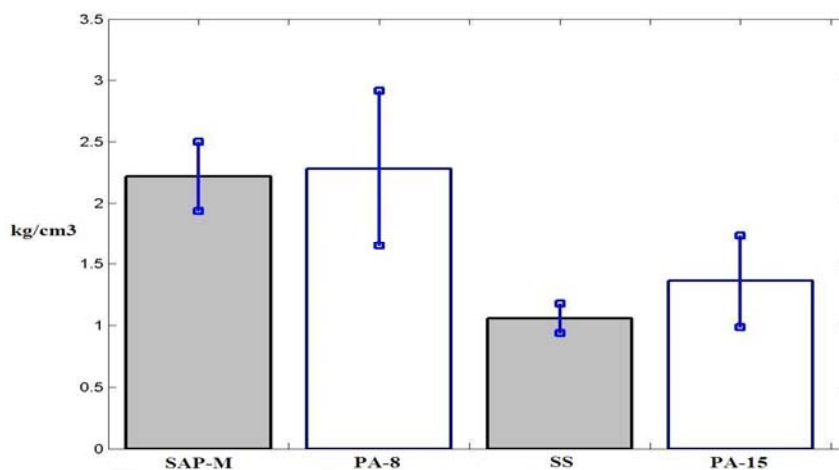
Las propiedades marcadas con el asterisco mostraron diferencias estadísticamente significativas. Como se aprecia en el Cuadro 22, la mayoría de los Índices no mostraron diferencias significativas, por lo que se sospecha que el tipo de suelo actúa como un factor que protege a los suelos de la degradación.

La Saturación de Bases y la CIC de la SS y PA-15, mostraron un comportamiento interesante al sugerir que el complejo de intercambio de los cationes en la SS es más alto, pero sin embargo, la saturación de bases nos indicó que el PA-15 es más rico en los mismos cationes.

La Resistividad fue más alta en los primeros centímetros del PA-15, sin embargo, no se asocia a una clara evidencia de compactación por la carencia de evidencia otorgada por los

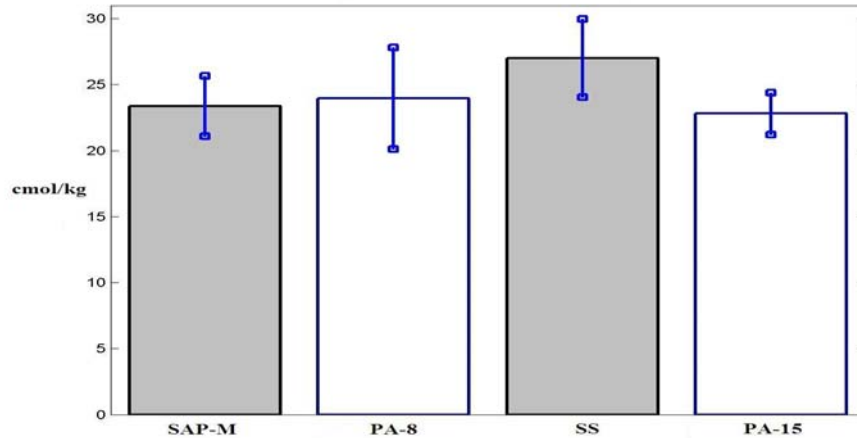
valores de Densidad Aparente, Densidad Real y Porosidad (Cuadro 16 y 20). Los niveles de Mg no se pueden interpretar fácilmente pero podría tratarse de diferencias en las concentraciones de los minerales locales o se puede atribuir a las diferentes tasas de intemperismo entre usos de suelo y la vegetación asociada, pero esto es muy poco claro. En el caso de la Tasa de Infiltración Instantánea, los tipos de usos de suelo de ambos sitios sí tuvieron diferencias significativas entre sí, principalmente por efecto de las raíces de los pastos, como se discute más adelante ( $P=0.000$ ,  $n=10$ ).

A continuación, se presentan las gráficas correspondientes a los Índices Externos más importantes observados en el Cuadro 22. En la Figura XXII, se muestra la comparación de los valores de Resistividad en la zona superficial en los Andosoles vítricos de ambos sitios. Destaca que sólo el PA-15 fue significativamente mayor que la SS y que sólo se encontraron diferencias significativas en el sitio 2.



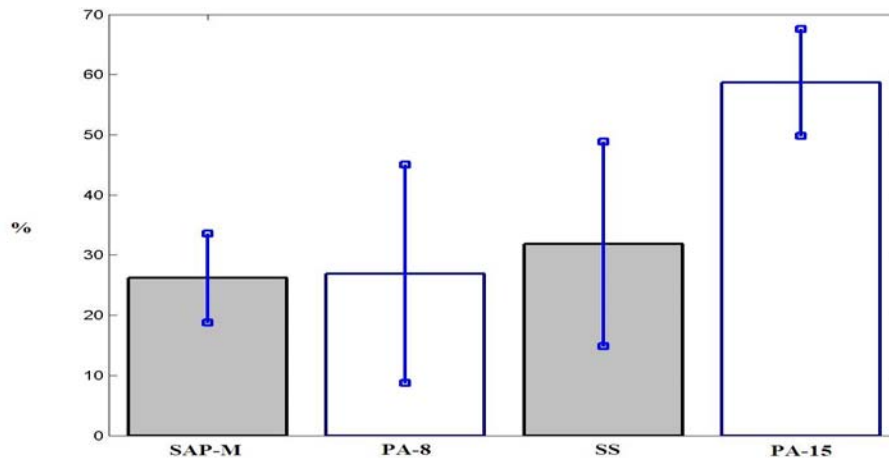
**Figura XXII:** Media (columnas) y desviación estándar (barras) de la Resistividad superficial, perteneciente a los andosoles vítricos de ambos sitios, en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas.

En la Figura XXIII, se muestra la comparación de los valores de la CIC superficial en los andosoles vítricos de ambos sitios. Destaca que sólo en la SS del sitio 2, se encontró que fue significativamente diferente y mayor que el correspondiente PA-15.



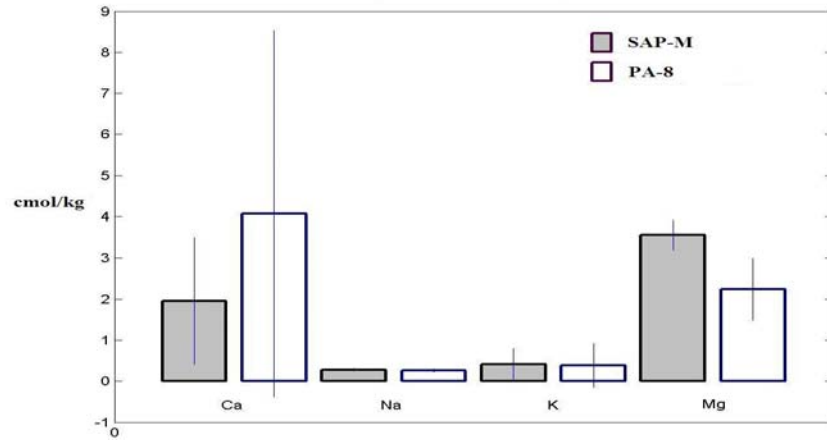
**Figura XXIII:** Media (columnas) y desviación estándar (barras) de la CIC superficial, perteneciente a los andosoles vítricos de ambos sitios, en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas.

En la Figura XXIV, se muestra la comparación de la Saturación de Bases superficial, en los andosoles vítricos de ambos sitios. Es de mencionar que, contrario a lo que se observó con la CIC, en este caso el PA-15 fue significativamente diferente y mayor que la SS.



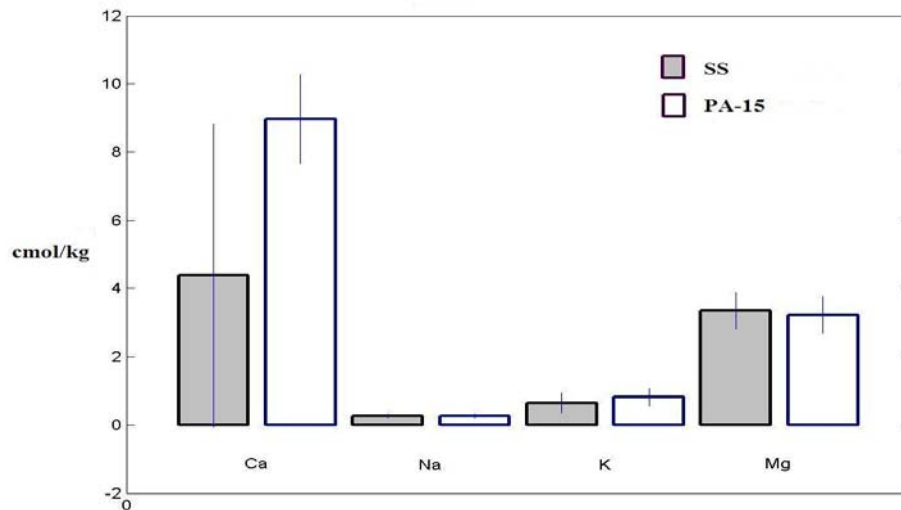
**Figura XXIV:** Media (columnas) y desviación estándar (barras) de la SB superficial, perteneciente a los andosoles vítricos de ambos sitios, en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas.

En la Figura XXV, se muestra la comparación de los Cationes Intercambiables, en el Andosol vítrico del sitio 1. Nótese que sólo Mg fue significativamente diferente y mayor en la SAP-M comparado con el PA-8.



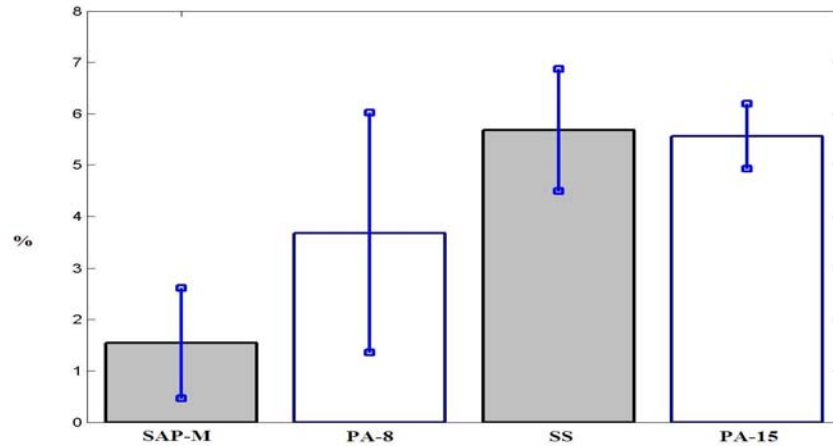
**Figura XXV:** Media (columnas) y desviación estándar (barras) de los Cationes Intercambiables en la capa superficial, perteneciente al Andosol vítrico del sitio 1, en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas.

En tanto que, la Figura XXVI muestra la comparación de los Cationes Intercambiables en la zona superficial del Andosol vítrico del sitio 2.



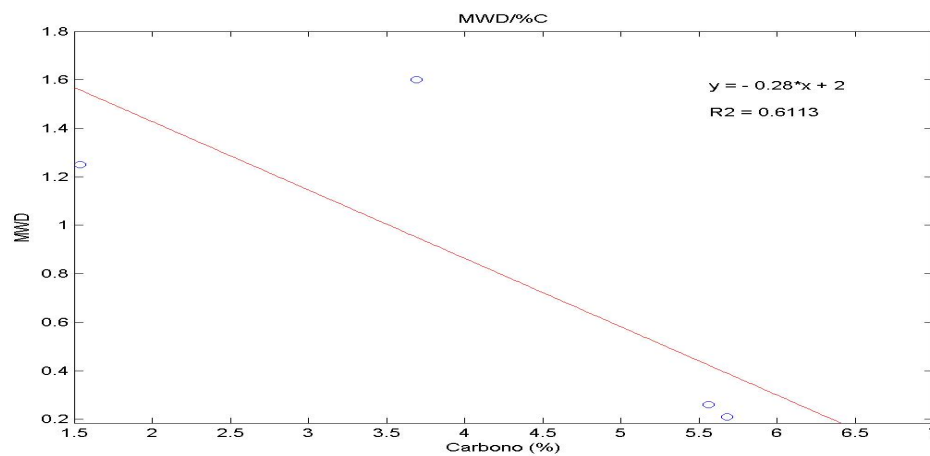
**Figura XXVI:** Media (columnas) y desviación estándar (barras) de los Cationes Intercambiables en la capa superficial, perteneciente al Andosol vítrico del sitio 2, en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas.

La Figura XXVII muestra la comparación del Porcentaje de Carbono superficial en los andosoles vítricos de ambos sitios estudiados dentro de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas.



**Figura XXVII:** Media (columnas) y desviación estándar (barras) del Porcentaje de Carbono en la capa superficial, pertenecientes a los andosoles vítricos de ambos sitios, en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas.

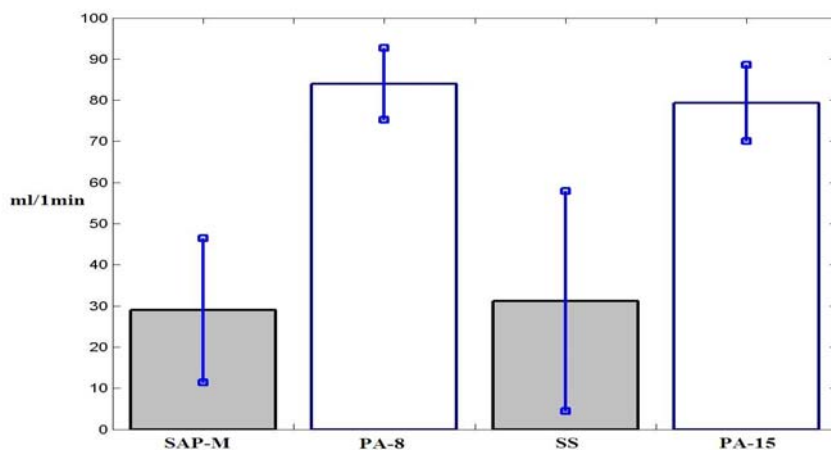
En la Figura XXVIII se aprecia la correlación entre los promedios del Índice de Estabilidad de Agregados (MWD) y los promedios del Porcentaje de Carbono de los andosoles vítricos de ambos sitios de estudio, junto son el coeficiente de correlación y la ecuación de la línea de tendencia. Se nota ambos sitios se agrupan bajo la relación mayor Carbono y menor valor del índice MWD, lo que se interpreta como mayor estabilidad.



**Figura XXVIII:** Correlación entre el Índice MWD y el Porcentaje de Carbono, pertenecientes a los andosoles vítricos de ambos sitios, en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas.



Finalmente, en la Figura XXIX, se muestran los valores de la Tasa de Infiltración Instantánea registrada a 1 minuto, para la zona superficial de ambos sitios de estudio. Estos valores en  $\text{ml min}^{-1}$  a un minuto, son equivalentes a 4.26, 0.96, 4.13 y 1.24  $\text{L h}^{-1}$  en la SAP-M, PA-8, SS Y PA-15, respectivamente.



**Figura XXIX:** Media (columnas) y desviación estándar (barras) de la Tasa de Infiltración Instantánea a un minuto, los datos pertenecen a los andosoles vítricos de ambos sitios, en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas.

## DISCUSIÓN

### 1. Génesis del suelo

Según las descripciones geológicas, los depósitos de ceniza de la zona corresponden a fechas plio-cuaternarias. Aunque, es muy probable que los suelos hayan sufrido un proceso de rejuvenecimiento a partir de los depósitos de cenizas de las últimas erupciones del volcán San Martín en 1664 y 1793 (Martín-Del Pozzo, 1997; Ortega *et al.*, 2006).

La idea general que propone que estos suelos son jóvenes está fundamentada porque se encontraron valores bajos de  $\text{Si}_{\text{ox}}$ ,  $\text{Fe}_{\text{ox}}$  y  $\text{Al}_{\text{ox}}$  en ambos sitios (Cuadros 7, 11, 16 y 20), mostrando que el intemperismo del material parental es incipiente. El contenido de vidrio volcánico  $> 10\%$  encontrado en casi todos los horizontes de los 4 perfiles, indica que estos suelos jóvenes aún cuentan con materiales altamente intemperizables que no han sido degradados completamente debido al poco tiempo de evolución de los mismos suelos (Cuadros 5, 10, 14 y 19).

Los valores bajos de  $\text{Fe}_{\text{pirof}}$  y  $\text{Al}_{\text{pirof}}$  en ambos sitios, son indicativo de que existen pocas asociaciones entre los óxidos de Fe y Al y la materia orgánica, esto también es un indicativo de la juventud de los suelos, ya que dicha asociación es mayor con la mayor edad de los suelos (Pochet *et al.*, 2007; Prado *et al.*, 2007).

## 2. Clasificación

Todos los perfiles estudiados cumplieron con las propiedades de tener una moderada cantidad de Al y Fe extractable, es decir, que los valores del índice  $\text{Al}_{\text{ox}} + \frac{1}{2} \text{Fe}_{\text{ox}}$  fueron mayores que 0.4 y menores a 2.0; valores de densidad aparente  $> 0.9 \text{ kg dm}^{-3}$  en la capa superficial y por presentar un porcentaje de vidrio volcánico  $> 10\%$  en las dos capas superficiales (Cuadros 7, 11, 16 y 20). Por lo que los suelos de ambos sitios fueron clasificados como Andosoles vítricos, según la clasificación de la WRB (IUSS Working Group WRB, 2006). Esto es consistente con lo reportado anteriormente en la zona (Hughes *et al.*, 1999).

## 3. Características generales de ambos sitios

El Andosol de la SAP-M y el PA-8 del sitio 1, mostró una mayor influencia en los aportes atmosféricos de materiales como Na y arenas finas, por estar aproximadamente a 1.5 km de la costa (Figura II). Presentó también, los niveles más bajos de Carbono orgánico y cationes; el  $\text{pH} < 5.5$  ha provocado toxicidad por Al y Mn y se encontró que el proceso de lavado de bases es más pronunciado que en el sitio 2 (Cuadros 7, 11, 16 y 20).

No hubo toxicidad por Al en la SS y el PA-15 del sitio 2, debido al  $\text{pH}$  más alto y la dinámica de reciclaje de nutrientes parece ser más acelerada que el sitio 1. No hubo mucha influencia de aportes atmosféricos, por su localización aproximadamente a 9.5 km de la costa, aunque sí estuvieron presentes materiales transportados (Cuadros 7, 11, 16 y 20).

#### *4. Diferencias/similitudes entre ambos sitios*

El mantillo encontrado en la SAP-M del sitio 1, presentó un estado medio de descomposición aparentemente por efecto del  $\text{pH} < 5.5$  que posiblemente provocó poca actividad y diversidad microbiana (Whitehead, 2000; Fierer y Jackson, 2006). En ambos perfiles de la SS y el PA-15 del sitio 2, el  $\text{pH} > 5.5$  aparentemente produjo la descomposición poco más alta de los restos vegetales en el Horizonte O y se reflejó en un Índice de von Post más alto que el encontrado en el sitio 1 (Cuadros 6 y 15).

El  $\text{pH} < 5.5$  del sitio 1, pudo ser el responsable de la presencia de depósitos de óxidos Mn y Fe sobre las paredes de los agregados (Figuras V, VI, IX y X), ya que a un  $\text{pH}$  bajo la disponibilidad de estos micronutrientes aumenta, lo que no se presentó en el sitio 2 (Whitehead, 2000).

Los valores de  $\Delta\text{pH}$  ( $\text{pH KCl} - \text{pH H}_2\text{O}$ ) mostraron una tendencia general en la dominancia de cargas negativas en el suelo, solo con excepciones en los Horizontes 2A (SAP-M, sitio 1), 2Bw (PA-8,

sitio 1) y A (SS, sitio 2) que mostraron valores positivos. Resultados que pudieron deberse a las mismas discontinuidades litológicas, diferencias en contenido de arcilla activa o a un menor contenido de materia orgánica en esa profundidad. También pudo reflejar una buena y variable capacidad de amortiguamiento por parte de los suelos de ambos sitios (Prado *et al.*, 2007).

Los valores altos de  $Fe_{dit}$  de la SAP-M y el PA-8 del sitio 1 (9–16%), podrían indicar una mayor depositación cristalina y paracristalina de los óxidos de Fe (Ejem. ferrihidrita) y una menor depositación en la SS y el PA-15 del sitio 2 (2.5-4%), posiblemente por diferencias en composición de material parental, pH o por variaciones microclimáticas (Prado *et al.*, 2007). Lo mismo ocurre con la asociación de óxidos de Fe y Al con la materia orgánica ( $Fe_{pirof}$  y  $Al_{pirof}$ ) que en general fue baja, pero fue posible distinguir que dicha asociación es mayor en la SAP-M y el PA-8 del sitio 1, comparándoles con la SS y el PA-15 del sitio 2, (Cuadros 7, 11, 16 y 20).

En la SAP-M y el PA-8 del sitio 1, se encontró una capa de ceniza compacta (Horizonte 2Bw), que impedía el paso rápido del agua hacia el interior del perfil. En esta capa, se encontró que la Saturación de Bases, CICE, Humedad, Resistividad, Acidez Extractable y Na fueron mayores que en todo el resto del perfil; y fue ligeramente más alta en Carbono y pH que la capa suprayacente, lo que se interpreta como un fenómeno derivado del lavado de material de capas suprayacentes. Aunque en esta capa se encontró una mayor humedad retenida por la alta compactación de la misma, es esta misma compactación la que constituye una barrera física para el paso de las raíces hacia una mayor profundidad (Figuras VI y X). De hecho, antes de llegar a esta capa, las raíces mostraron un patrón de crecimiento horizontal como indicativo de compactación en ambos perfiles de SAP-M y PA-8 (Batey y McKenzie, 2006).

En la SS y el PA-15 del sitio 2, no se encontró este problema, ya que la textura fue más arenosa y la saprolita subyacente tenía suficientes grietas como para dejar pasar el agua hacia la base del perfil,

aunque sí se observó un patrón de crecimiento horizontal de las raíces, como en la SAP-M y el PA-8 del sitio 1.

En la literatura se considera que en suelos arcillosos la disponibilidad de nutrientes es más alta que en suelos arenosos (Whitehead, 2000), pero en este caso el Andosol arenoso del sitio 2, fue más rico que el Andosol arcilloso del sitio 1, aparentemente por la mezcla de saprolita con las cenizas.

En el sitio 1 (Cuadros 7 y 11; Figuras VII y XI), se encontró una relativa abundancia de Na en el subsuelo y durante el conteo de vidrio volcánico se encontraron abundantes micas, muscovitas y cuarzos tallados, como evidencias del aporte activo de Na y materiales finos por parte del denominado *spray marino* desde sitios muy distantes en otras épocas y actualmente (McDowell, 1998; Whitehead, 2000; Ramos-Escobedo y Vázquez, 2001).

En el sitio 2, dicho efecto no es tan evidente pero también se encontraron algunas arenas de cuarzo, aún cuando el sitio se encuentra a varios kilómetros de la línea de costa (Cuadros 7, 11, 16 y 20).

El Na estuvo entre los cationes menos abundantes dentro de ambos sitios pero resalta que fue mucho más abundante que el K en el sitio 1, tal vez por una mayor influencia del transporte vía *spray marino*. En tanto que, en el sitio 2, el K fue más abundante que Na (Figuras XX y XXI). Ca y Mg fueron los cationes más abundantes en el complejo de intercambio de ambos sitios, seguidos por K y Na; como es de esperarse para suelos “no ácidos” y también para los suelos ricos en materiales volcánicos como piroxenos, anfíboles y olivinos, que tienen altos contenidos de Ca y Mg, según Whitehead (2000).

##### *5. Comparación de perfiles de selva vs. pastizal dentro de ambos sitios*

La presencia de raíces fue menor conforme aumentó la profundidad del perfil en ambos sitios, no obstante, es de significancia mencionar que en la SAP-M del sitio 1, las raíces finas y

medias alcanzaron una profundidad mayor a 50 cm y esto fue mayor a la encontrada en el PA-8 de ese mismo sitio (~40 cm). En tanto que en el PA-15 del sitio 2, las raíces alcanzaron casi la misma profundidad que las de la selva secundaria (> 40 cm), posiblemente por efecto del pH y las capas duras subyacentes (Cuadros 3, 8, 12 y 17; Figuras VI, X, XV y XX).

En el sitio 1 (Cuadros 7 y 11), el PA-8 mostró valores de pH ligeramente más altos que la SAP-M, mientras que en la profundidad del horizonte el pH fue más bajo que el encontrado en el horizonte forestal, aparentemente como resultado de la retención de bases en la capa superficial e interrupción del proceso de lavado natural en la zona forestal (Jener *et al.*, 1996; Numata *et al.*, 2007).

En el sitio 2 (Cuadros 20 y 26), el caso fue a la inversa, el horizonte mineral superficial del PA-15 tuvo un pH ligeramente más bajo y el subyacente ligeramente más alto que los de la SS. Aparentemente por la mayor cantidad de materia orgánica depositada en el sitio de vegetación secundaria y por la mayor cantidad de bases lavadas en el pastizal (Templer *et al.*, 2005).

## 6. Erosión

En el perfil del pastizal del sitio 1, no fue posible identificar el horizonte superficial que se encontró en el perfil de selva, y se consideró que éste había sido erosionado en años anteriores, como parte de la dinámica de cambio de uso, en donde el suelo queda desnudo el tiempo que tarda en establecerse el pasto después de la roza-tumba-quema (Houghton y Goodale, 2004).

Galván Fernández (1998), reportó altas cantidades de sedimentos en ríos de zonas cercanas, precisamente por el cambio de uso de suelo; por esto, se considera que este pastizal pudo haber tenido un proceso de erosión media pero considerable a lo largo de su historia, por lo que ya no hay evidencias del primer horizonte forestal.

Aunque los propietarios y encargados de los sitios estudiados comentaron que los pastizales no eran tan pedregosos hace algunos años (Comunicación personal con los propietarios), no fueron encontrados cambios significativos en textura entre los usos forestal y pecuario de los dos sitios, por lo que no se le pudo tomar como evidencia de erosión. Pero no se descarta que actualmente exista un grado medio a intenso de este proceso que se propone confirmar con otros estudios (Cuadros 7 y 11).

### *7. Índices de calidad del sistema FCC*

En general, en ambos sitios se encontró una tendencia al decremento conforme aumentó la profundidad del perfil por parte de los principales índices de fertilidad tomados en cuenta para este estudio (C, CIC, CICE y K), lo que apoya la idea general que habla de que la parte más importante y biológicamente activa de un suelo de selva tropical húmeda se encuentra dentro del primer medio metro de profundidad (Álvarez-Sánchez y Naranjo-García, 2003).

Según la clasificación obtenida por la FCC (Cuadro 21), para ninguno de los dos sitios se encontraron grandes cambios físicos ni químicos que indicaran degradación. Sin embargo, se hizo la distinción entre los dos grados de fertilidad de ambos sitios, se identificó la alta pedregosidad, susceptibilidad a erosión y los cambios texturales en el subsuelo.

En contraste, el aumento en el contenido de Carbono orgánico en el sitio 1 podría indicar una mejora de los suelos por la instalación de los pastizales, al menos hasta la fecha.

La tendencia de mejora de las propiedades del suelo en la selva secundaria comparada con el pastizal escapa a la capacidad del Sistema FCC.

El cambio textural encontrado en el subsuelo de ambos sitios según los datos discutidos arriba y que nota la clasificación de la FCC, es el responsable de la caída de árboles

cuando los vientos o la lluvia son fuertes y estos podrían ser un riesgo por favorecer el movimiento en masa de las zonas altas. Además de que debe tomarse en cuenta esto como un límite para la utilidad de los suelos que de continuar erosionándose como lo han comentado los mismos propietarios, lo que pasaría sería que la capa útil fuese peligrosamente delgada y poco productiva para la ganadería.

#### *8. Análisis de muestras superficiales selva vs. pastizal*

Reiners *et al.*, (1994) y Numata *et al.*, (2007), reportan incrementos de K y Ca en pastizales establecidos en antiguas zonas forestales, en contraste, en las muestras superficiales de ambos sitios de este estudio no se encontraron diferencias significativas en Na, K y Ca, pero sí tendencias al incremento (Cuadro 22).

Sólo en el caso de la SAP-M y el PA-8 del sitio 1, se encontró que la SAP-M fue significativamente mayor que el PA-8 en los valores de Mg, aunque no se ha encontrado una explicación a esto, pero podría deberse a diferencias litológicas (Figura XXV).

No se encontraron diferencias significativas en CICE y Acidez Extractable (AE) entre las muestras superficiales de los diferentes usos de suelo en los dos sitios de estudio (Cuadro 22). Estos resultados contrastan con los de Numata *et al.*, (2007) y Jener *et al.*, (1996), quienes encontraron decrementos de AE en cronosecuencias de pastizales instalados sobre Ultisoles, Alfisoles y Latosoles de Brasil. Por lo que los cambios en estas variables podrían estar relacionados con el tipo de arcillas y su actividad alta en el intercambio catiónico. Reiners *et al.*, (1994), reportaron la CICE más alta en la parte forestal debido a la mayor AE encontrada en ese tipo de uso de suelo. No se descarta que estos resultados estén bajo la influencia de la carga variable de las arcillas (Prado *et al.*, 2007).



La CIC de la SS en el sitio 2 fue significativamente más alta que la del pastizal, al menos en las muestras superficiales (Figura XXIII). Esto aparentemente se debe a un mayor aporte de cationes provenientes del lavado de los mismos desde el mantillo en descomposición o incluso por una mayor actividad de las arcillas. Estos resultados fueron consistentes con los de plantaciones forestales sobre Andosoles degradados de África, en donde la introducción de las mismas condujo a incrementos de Bases y CIC después de 15 años (Mulugeta, 2004).

La Saturación de Bases en el sitio 2, fue más alta en el pastizal (Figura XXIV). Lo que se atribuyó a una mayor presencia de cationes en ese tipo de uso de suelo, procedentes seguramente de los restos vegetales de los pastos. Numata *et al.*, (2007), también reporta este tipo de resultados en su estudio en Brasil.

No hubo diferencias significativas en los valores de Densidad Real y Porcentaje de Humedad en la parte mineral de ambos sitios (Cuadros 7, 11, 16 y 20), al parecer por la misma naturaleza de los Andosoles de retener grandes cantidades de humedad y ser pocos sensibles a erosión y desarrollo de costras (Lal, 1987; Mulugeta, 2004).

Sólo en el sitio 2 se encontraron diferencias significativas en la Resistividad (Figura XXII), pero esto pudo deberse a la gran presencia de fragmentos de saprolita dentro de la matriz del suelo o pudo ser un efecto claro de compactación por el paso de ganado como los que se reportan en Paleudults y Dystrudepts de Colombia, donde se encontraron valores de compacidad 10 veces mayores que en la zona forestal (Martínez y Zinck, 2004), sólo que en este caso el aumento fue mucho más ligero pero significativo, por lo que se apoya la idea de que la causa de estos resultados fue el muestreo y el material parental tan heterogéneo.

Se encontraron diferencias significativas en la Tasa de Infiltración Instantánea entre usos de suelo en ambos sitios de estudio, con una contundente reducción de más de 75% en los pastizales con respecto a la zona forestal (Figura XXIX). Estos resultados fueron consistentes con los de Zimmermann

y colaboradores (2006), quienes encontraron que los suelos forestales tuvieron una Infiltración media de  $1533 \text{ mm h}^{-1}$  y  $122 \text{ mm/h}$  en el pastizal, es decir, que el pastizal tuvo menos del 10% de la tasa original. En otros estudios reportan disminuciones de 50% de la tasa del sitio forestal o de otros pastizales (Greenwood y Mckenzie, 2001). Aunque con técnicas diferentes Martínez y Zinck (2004), mostraron que la Tasa de Infiltración en suelos arcillosos disminuyó de  $14.3 \text{ cm h}^{-1}$  en el sitio forestal a  $0.2 \text{ cm h}^{-1}$  en sitios de pastizales y de  $15.9 \text{ cm h}^{-1}$  a  $0.8 \text{ cm h}^{-1}$  en suelos con textura más gruesa.

Los resultados de Densidad Aparente, Densidad Real, Porosidad y Humedad no mostraron cambios sustanciales hacia la degradación, lo que nos indica que los cambios en la Tasa de Infiltración debieron deberse a la presencia de grandes cantidades de raíces de las gramíneas que impidieron el paso rápido del agua al interior del suelo y no a efectos de compactación por el ganado, como se encontró en los trabajos citados arriba. Sin embargo, es importante mencionar que la prueba del cilindro y porcentaje de Porosidad son poco sensibles para detectar cambios en macroporosidad y distribución de poros en el suelo (Martínez y Zinck, 2004; Perret y Dorel, 1999; Nguyen *et al.*, 1998). Estas últimas variables son las responsables principales de fuertes decrementos en la Tasa de Infiltración en sitios cultivados y en pastizales, desafortunadamente no fueron contempladas en el estudio.

Es importante comentar que la reducción en la Tasa de Infiltración trae consigo un menor aporte de agua a los mantos acuíferos de la zona, lo que a la larga podría producir severas repercusiones sobre la disponibilidad y calidad del vital líquido en zonas bajas. Además, la entrada más lenta del agua hacia el interior del suelo podría ocasionar saturación de la superficie del suelo, haciéndolo más propenso a la dispersión de las partículas de los agregados y destruyendo a los mismos o reduciendo su estabilidad y favoreciendo la erosión de las capas superficiales (Greenwood y Mckenzie, 2001). Es necesario realizar más estudios sobre este tema para evaluar el impacto que tienen los pastizales sobre los acuíferos de la zona.

El Porcentaje de Carbono de las capas superficiales del suelo mineral entre usos de suelo en ambos sitios de no mostró diferencias significativas, principalmente por la alta variabilidad de las muestras (Cuadro 22). Aunque, en el sitio 1 se muestra una clara tendencia de aumento en el contenido de Carbono en el pastizal por entradas abundantes de Carbono orgánico proveniente de las gramíneas, excrementos depositados y pisoteo de los mismos pastos; así como por la ausencia de labranza y erosión, como lo reportan en otros trabajos (Hassink, 1997; Templer *et al.*, 2005; García-Oliva *et al.*, 2006). Mientras que en el sitio 2, la cantidad de Carbono orgánico tiende a ser mayor en la selva secundaria por la depositación de hojarasca y raíces muertas, por la ausencia de forrajeo y alta actividad biológica (Hughes *et al.*, 1999; Rhoades *et al.*, 2000; Mulugeta, 2004).

Es muy probable que parte del Carbono orgánico encontrado en los pastizales no haya sido producido por los pastos actuales, sino que fue producido mucho tiempo antes, durante la época en que los sitios eran ocupados por selvas. Rhoades *et al.*, (2000), utilizando marcadores radiactivos encontraron que entre 40 y 50% del carbono dentro de los primeros cm de suelo en pastizales tuvo un origen forestal. En tanto que Mulugeta (2004) reporta que un 25% del Carbono de origen forestal permanece en sitio con agricultura activa, principalmente por efecto de labranza que ocasiona una mayor disponibilidad del Carbono a la acción microbiana. Otro factor que puede estar afectando los resultados puede ser la alta protección de materia orgánica y por lo tanto del carbono en Andosoles (Feller y Beare, 1997; Hughes *et al.*, 2000; Mulugeta, 2004). El rango de porcentaje de carbono en ambos sitios osciló entre 1.54 y 5.68% y fue consistente con el de 1.3 – 6.2% reportado por Hughes *et al.*, (1999), para los mismos tipos de usos de suelo en la misma zona de estudio.

El índice MWD del primer horizonte mineral entre usos de suelo en ambos sitios no mostró diferencias significativas. A pesar de ello, a partir de los promedios de MWD fue posible distinguir una tendencia al incremento en ambos pastizales, lo que se interpretó como una baja en la estabilidad, ya que

valores altos de MWD se deben a una mayor dispersión o ruptura de la estructura (Cuadro 22; Figura XXVIII).

Se sabe que la estabilidad de los agregados está en función de la materia orgánica, CIC, agentes cementantes (Ca, óxidos de Fe, etc.), arcillas, tiempo y tipo de uso de suelo e intensidad del mismo (Díaz-Zorita *et al.*, 2002; Bronick y Lal, 2005). Sin embargo, los porcentajes de arcilla, porcentaje de Carbono y cationes presentados en este trabajo parecen no estar relacionados.

De los dos sitios, se sabe que el sitio 1 es sobrepastoreado sin rotación alguna durante parte del año, sobrepasando la capacidad de carga de la zona con  $>3$  cabezas  $\text{ha}^{-1}$ . Mientras que el segundo es manejado con rotación y respetando la capacidad de carga con 0.5 a 1 vaca por hectárea (Comunicación personal con los propietarios), por lo que no hay ninguna relación con el tratamiento aplicado, al menos en el sitio 2.

Estos resultados bien podrían deberse a efectos adversos por pisoteo del ganado a pérdidas de interacciones entre materia orgánica con Fe y Al o a efectos de desecado, pero los resultados de Densidad Aparente, Porosidad, Humedad,  $\text{Fe}_{\text{pirof}}$  y  $\text{Al}_{\text{pirof}}$  no mostraron diferencias significativas que ayuden a explicar el fenómeno.

En teoría, los pastizales deberían presentar una mayor estabilidad de agregados, por el efecto mecánico de las abundantes raíces de pastos, micorrizas asociadas a las raíces, polisacáridos secretados y mayor cantidad de cationes disponibles en la rizósfera (Haynes, 1999; Islam y Weil, 2000; Franzluebbbers *et al.*, 2000; Bronick y Lal, 2005), pero solo la cuantificación de la CIC fue tomada en cuenta para este trabajo, por lo que muy probablemente la explicación a este fenómeno podría estar fuera de las variables estudiadas, como las anteriores y la tasa de mineralización de materia orgánica, entre otras más.

Esta prueba fue diseñada para evaluar principalmente la estabilidad de macroagregados, por lo que los resultados presentados aquí son válidos solo para macroagregados entre 1 y 2 cm.

Adicionalmente sólo podemos mencionar que el porcentaje de agregados  $< 0.25$  mm que pasó los tamices osciló entre 47% en la SAP-M y 65% en el PA-8 del sitio 1, y 65% en la SS y 64% en el PA-15 del sitio 2. Lo último se puede interpretar como una composición importante de microagregación en la estructura del suelo y en general una regular a baja estabilidad de los macroagregados (Six *et al.*, 2002; Bronick y Lal, 2005)

La correlación entre los valores de porcentaje de Carbono y el Índice MWD mostró que el PA-8 del sitio 1 tuvo un porcentaje de Carbono más alto pero un Índice MWD alto con respecto a la SAP-M. Mientras que el sitio 2, la SS mostró valores altos de Carbono orgánico y menor Índice MWD que el PA-15, aunque sin diferencias significativas en ambos casos (Figura XXVIII). Lo que apuntó también a que la diferencia en la estabilidad no se debió a la cantidad de materia orgánica o carbono, sino a la forma en que se encuentra dispuesta o compuesta en el suelo. En la Figura XXVIII, se pudo distinguir que entre mayor fue el porcentaje de Carbono, el Índice MWD fue menor, aparentemente sugiriendo que entre más Carbono orgánico mayor era la estabilidad de los agregados. Se pudo distinguir que el Andosol arcilloso del sitio 1 tuvo un Índice MWD mayor que el del Andosol arenoso del sitio 2, lo que resultó contradictorio, ya que se considera que los suelos arcillosos son más estables que los arenosos (Hassink, 1997).

Finalmente, en el caso especial de la SS del sitio 2 (Cuadro 16), donde la comunidad fue dominada por la especie pionera *Cecropia obtusifolia*, es importante volver a mencionar que en el Horizonte O, se presentaron incrementos en Humedad, porcentaje de Carbono, pH, CICE, Acidez Extractable, CIC, y de Ca. Con los consecuentes decrementos en Densidad Real y Aparente, Saturación de Bases,  $Fe_{\text{pirof}}$ ,  $Al_{\text{pirof}}$ ,  $Fe_{\text{dit}}$ , Na, K y Mg, todos comparados con la parte mineral de suelo del PA-15. Estos datos pueden ser interpretados como favorables para considerar a esta planta como una especie mejorante de suelos. Principalmente en zonas con

deficiencias de Carbono, Ca y retención de humedad, aunque la necesidad de más pruebas desde el punto de vista ecológico no se descarta.

Es de mencionar que esta especie en menor asociación con otras produjeron todos esos cambios en aproximadamente de 5 a 6 años a partir de un terreno de pastizal.

Esta especie es una especie pionera o facilitadora en un proceso de sucesión secundaria. Utiliza una estrategia de colonización oportunista y es exitosa porque tiene alta tolerancia a la escasez de luz y sus semillas tienen un buen umbral de respuesta germinativa cuando se abren claros en la selva y entra la luz al sotobosque. Estas características y los estudios previos de fenología, desarrollo y dinámica poblacional (González Soriano *et al.*, 1997), ponen en ventaja a esta especie sobre algunas otras para su estudio como mejoradora de suelos, como se le propone en este estudio.

## 9. Conservación

Aunque los resultados presentados en este trabajo pueden indicar que dentro de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas existen suelos capaces de resistir a la degradación por el cambio de uso de suelo, esto no debe generalizarse, ya que existen otros tipos de suelo que podrían ser muy vulnerables a este tipo de alteración, como los Inceptisoles y otros. La aplicación de este tipo de protocolos es nueva en la zona y aunque reveló que no ocurre un gran cambio con las propiedades físico-químicas de estos suelos, es de gran importancia señalar que el gran cambio es seguramente de tipo biológico, ya que al remover toda esa biomasa se pierde una incuantificable cantidad de relaciones biológicas y evolutivas y sin duda una gran cantidad de la riqueza biológica y genética con la que cuenta la zona y que muy difícilmente podría recuperarse.

La aplicación de este tipo de estudios puede ayudar a evaluar el impacto que genera la conversión de la selva en la zona, pero debe servir principalmente para encontrar la vocación más adecuada de los suelos, ya que como se ha visto en el Andosol del sitio 1, unos son más fértiles que otros y algunos tienen de hecho sólo vocación forestal y sería muy arriesgado cambiar esta vocación y utilizarlos de la forma tan inadecuada como hasta ahora se ha hecho.

Los resultados de la Tasa de Infiltración fueron particularmente importantes en este trabajo, ya que mostraron un impacto no identificado hasta ahora en la zona y que no debe pasarse por alto, porque la disponibilidad y la calidad del agua siempre son siempre importantes para las poblaciones humanas y por supuesto para los ecosistemas. Con base en estos resultados, se recomienda la búsqueda de otras alternativas de desarrollo para los habitantes de la Reserva y el enriquecimiento de los pastizales con árboles locales y útiles (maderables o frutales) con el fin de aumentar la tasa de infiltración y combatir lo que hasta ahora seguramente ha afectado a la zona.

Los resultados de este trabajo no deben ser malinterpretados y no debe pensarse que los suelos están en buen estado o que no son afectados con el cambio de uso de suelo, porque de hecho sí son afectados biológicamente, aunque la evaluación de este tipo de factor es muy difícil de medir. De aquí, la importancia de otros trabajos complementarios que tomen en cuenta estas y otras propiedades químicas, físicas y biológicas para tener una idea más amplia del problema. Aún faltan muchos estudios por realizar y entre ellos se podría sugerir un estudio para evaluar el impacto de los herbicidas con *Glisofato* en el suelo y los cuerpos de agua, ya que durante la realización de los muestreos de este estudio se pudo notar que los agricultores y algunos ganaderos hacen uso constante de los mismos. Y por supuesto, debería evaluarse el riesgo de movimientos de masas o derrumbes en la zona y su relación con la baja tasa de infiltración como se ha anotado en este trabajo.

# CONCLUSIONES

1. Los suelos fueron clasificados como Andosoles vítricos por cumplir con las propiedades establecidas por la WRB, donde los valores del índice  $Al_{ox} + \frac{1}{2}Fe_{ox}$  fueron mayores que 0.4 y menores a 2.0; los valores de densidad aparente fueron  $> 0.9 \text{ kg dm}^{-3}$  en la capa superficial y por presentar un porcentaje de Vidrio Volcánico  $> 10\%$  en las dos capas superficiales (IUSS Working Group, WRB, 2006).
2. Los índices de calidad del sistema FCC indican que no existe degradación física o química de los suelos de la zona de estudio e incluso se podría decir que la instalación de los pastizales produce mejoras en la fertilidad de los suelos más que degradación. La tasa de infiltración debe ser incluida para este tipo de estudios por su susceptibilidad a ser afectada por el cambio de uso de suelo y su relación con la salud de los ecosistemas.
3. En el sitio 2, la SS tuvo mejorías en las propiedades de: Índice MWD, CIC, Humedad, Ca, Carbono orgánico, Tasa de Infiltración, Densidad Aparente, y Porosidad, comparada con el PA-15.
4. En el sitio 1, no se presentaron cambios significativos en las propiedades físicas o químicas, excepto por el Mg, cuyos valores fueron significativamente más altos en la zona forestal.
5. Los pastizales tienden a ser más ricos en bases y carbono orgánico, sobre todo en el sitio 1. El Índice MWD fue ligeramente más alto en los pastizales (menor estabilidad) pero sin diferencias significativas con respecto a las zonas forestales y la relación con el Carbono indica que entre más Carbono menor es el valor del índice y por tanto la estabilidad de agregados se ve afectada directamente en forma positiva.
6. No fueron encontradas evidencias de compactación por el pisoteo del ganado dentro de los pastizales, sin embargo, se presentó una reducción de tasa de infiltración  $>70\%$  con respecto a las zonas forestales, posiblemente por efecto de las abundantes raíces de pasto que obstruyen el paso rápido del agua hacía el interior del suelo. Esa reducción de la tasa de infiltración puede tener



repercusiones graves en la disponibilidad y calidad de agua en zonas bajas y ayudar a erosionar los suelos de pastizales.

# APÉNDICE

## *Procedimientos*

### *Descripción de perfiles en campo*

La descripción de los perfiles en campo se realizó de acuerdo al *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo* (Siebe, C., Jahn, R. y Stahr, K., 1996). Se realizó la colecta de datos mediante la captura en tablas que se presentan en cada una de las descripciones de los perfiles. Se tomaron datos geomorfológicos como: grado de pendiente, exposición, complejidad de la pendiente, forma de la pendiente, posición del perfil en la pendiente, componente geomorfológico, microrelieve, patrón del drenaje, encharcamiento, profundidad del manto freático, material parental, erosión, vegetación, pedregosidad superficial, facilidad de excavación del perfil. Se tomaron datos al interior de los perfiles como: tipo de horizonte, profundidad y límite de horizontes, textura al tacto, estructura, consistencia, raíces, poros y la humedad.

### *Análisis de Laboratorio*

#### Pretratamiento de secado y triturado

Las muestras de horizontes y barrenaciones fueron puestas a secar al aire en un cuarto cerrado libre de fuentes de humedad y corrientes de aire por una semana y luego fueron separados los agregados para el análisis de Estabilidad de Agregados y puestos en

vasos de plástico rotulados y con tapa. El resto de la muestra que fue destinada para los análisis físicos y químicos fue triturada con mortero y pistilo de madera y tamizado con tamiz de malla # 10 y almacenadas en vasos de plástico rotulados y con tapa.

Todas las pruebas físicas y químicas con muestras de horizontes (11) fueron realizadas por triplicado. En el caso de las pruebas de barrena, se seleccionaron tres muestras aleatoriamente de las cuatro originales y esas fueron utilizadas para los análisis.

Las pruebas de laboratorio fueron realizadas como se describe enseguida:

***Prueba de Aluminio activo o de Aloffano (Porta Casanellas et al., 1999):*** Se colocaron muestras pequeñas de suelo en placas de porcelana y se les agregó dos gotas de NaF 1N, después se les agregó una gota de fenoftaleina 1% y se registró el color de cada tinción, jerarquizando la tonalidad de color rosa poniendo el color del más oscuro al más claro en cada horizonte. Para corroborar el resultado de las tinciones se volvió a tomar registro a los 5 minutos.

***Prueba de  $H_2O_2$  (Porta Casanellas et al., 1999):*** Se colocaron muestras pequeñas de cada horizonte en una placa de porcelana y se agregaron dos gotas de peróxido de hidrógeno para observar la reacción de efervescencia de las muestras y se anotó si fue inmediata o tardía.

***Prueba de pH (Van Reeuwijk, 2006):*** Se colocaron 10 g de suelo en vasos de vidrio previamente lavados con agua destilada, se agregaron 25 mL de agua destilada hervida y 25 mL de KCl 1 M, para obtener una concentración 1:2.5, se agitaron las muestras por media

hora y se realizó la toma de datos por medio de un potenciómetro (Marca CORNING, pH meter model 7). Se realizó por triplicado.

**Prueba de Color (Porta Casanellas et al., 1999):** Se colocaron muestras pequeñas de suelo en placas de porcelana y se registraron los colores de cada muestra comparando con las Cartas de Color Munsell, 1975.

**Densidad Real por el Método del Picnómetro (Van Reeuwijk, 2006):** Se pesaron picnómetros de 25 ml con tapón a peso constante. Se colocaron 5 g de suelo seco dentro de los picnómetros. Se agregó la mitad de la capacidad de los picnómetros de agua destilada. Se dejó que los picnómetros con suelo y agua reposaran 24 horas y luego se llenaron por completo hasta el capilar para pesarlos de nuevo y se registró el resultado.

Luego se pesaron los picnómetros a peso constante pero solo con agua hasta el capilar y se calculó la densidad real por la fórmula ( $DR = S / (S + A - (s + a))$ ). Donde: S: peso de muestra de suelo solo; A: peso de agua sola; s+a: peso de suelo más agua.

**Densidad Aparente por el Método del Cilindro (Blake y Hartge, 1986):** se obtuvo una muestra de cilindro por horizonte y se llevaron al laboratorio. Se pesaron en húmedo y luego de secarlos a 105°C, se calculó la densidad aparente por medio de la fórmula:  $DA = \text{Peso de suelo a } 105^{\circ}\text{C} / \text{volumen del cilindro}$ . El volumen del cilindro fue 116.42 m<sup>3</sup>.

**Porosidad (Porta Casanellas et al., 1999):** Mediante la fórmula  $\%P = (1 - (DA/DR)) \times 100$ .

**Permeabilidad por el Método del Infiltrómetro (Bouwer, 1986):** con un Infiltrómetro marca Sunbeam, se realizaron diez repeticiones por sitio de muestreo. Después de introducir la base del infiltrómetro y revisar que estaba bien estabilizado en un sitio sin hojarasca, se colocó agua en el cilindro exterior del infiltrómetro hasta llenarlo y luego en el cilindro interior hasta que el nivel de volumen de agua marcaba los 100 ml. Luego inmediatamente se activaba el cronómetro para que marcara el tiempo de infiltración. Y se calculó la capacidad de infiltración utilizando el promedio del volumen de agua infiltrado a 1 minuto, posteriormente se convirtieron los datos de  $\text{ml min}^{-1}$  a  $\text{L hora}^{-1}$ .

**Compactación por el Método del penetrómetro (Bradford, 1986):** Se utilizó un penetrómetro (Marca *Soiltest Inc.*, Modelo *cl-700*) con el que se tomaron ocho lecturas por horizonte en sitios aleatorios.

**Mesomorfología** (Modificada de Fitzpatrick, E. A. 1999): Por medio de observaciones con microscopio estereoscópico (Marca Carl Zeiss, que cuenta con aumentos que van de 1-3.2X en el micrométrico, con una escala de 0.2X), se observaron 30 agregados de diferentes tamaños por horizonte y se registraron sus características generales como: películas de arcilla, grietas, raíces, restos biológicos, etc. Las fotografías se tomaron en el Instituto de Geología con el Microscopio Estereoscópico (Marca LEICA, Modelo MZ125), que tiene acoplada la Cámara Digital (Marca LEICA, Modelo DC 300) y fueron editadas con el Software IMAGE PRO PLUS 5.1.

***Cuantificación de Vidrio Volcánico (Cady, J.G. 1986):*** En el Departamento de Edafología del Instituto de Geología, UNAM se trataron las arenas totales resultantes de la prueba de Textura, así, estas fueron limpiadas en cápsulas de porcelana de la materia orgánica con 5 ml de peróxido de hidrógeno y 5 ml de Hipoclorito de Sodio (Los Patitos); luego deferradas con de 2 a 4g de Ditionito de Sodio y 10 ml de Solución Citrato-Bicarbonato a una temperatura entre 50 y 60°C; finalmente, se secaron en estufa a 105°C. Se tamizaron con malla 200 (75  $\mu\text{m}$ ) y con la malla 60 (250  $\mu\text{m}$ ). Posteriormente, se colocaron en portaobjetos pequeñas muestras de arenas y se les cubrió con resina de Índice de Refracción = 1.546 para cuantificar el porcentaje de vidrio isotrópico en un total de cien partículas entre los rangos de 0.02-0.25 y 0.05-2 mm, con un Microscopio Petrográfico (Marca Olympus Modelo BX51) del Instituto de Geología. Se tomaron fotografías con la Cámara Digital acoplada (SR Photometrics) y se editaron con el Software IMAGE PRO PLUS 5.1. También se hicieron identificaciones de algunos minerales más abundantes por sus características cristalográficas estándar.

***Humedad del suelo. (Van Reeuwijk, 2006):*** Para el % de Humedad Total se tomaron aproximadamente 5 g de suelo húmedo (con humedad de campo) y se pesaron dentro de charolas de aluminio previamente pesadas (peso constante). Se colocaron en la estufa a 105°C y después de 48 horas fueron retiradas de la estufa y puestas en un desecador por 2 horas, después se volvieron a pesar en la balanza analítica y registrado el peso.

El % de Humedad Higroscópica se obtuvo pesando 5g de suelo seco al aire en una charola de aluminio a peso constante, después las charolas fueron colocadas en la estufa a 105°C por 24 horas y luego en un desecador por 2 horas y finalmente pesadas en la balanza analítica y registrado el peso.

El porcentaje de humedad total, higroscópica y el valor del factor de corrección de humedad (*mcf*) se cuantificaron por medio de las fórmulas:

$$\% \text{ Humedad Total} = ((\text{peso suelo húmedo} - \text{peso suelo a } 105^{\circ}\text{C}) / \text{peso suelo a } 105^{\circ}\text{C}) \times 100$$

$$\% \text{ Humedad higroscópica} = ((\text{peso suelo seco al aire} - \text{peso suelo a } 105^{\circ}\text{C}) / \text{peso suelo a } 105^{\circ}\text{C}) \times 100$$

$$\text{Factor de corrección de humedad (mcf)} = ((100 + \% \text{ humedad higroscópica}) / 100)$$

**Porcentaje de carbono orgánico, (Van Reeuwijk, 2006):** Las muestras a analizar se tamizaron antes del análisis con el tamiz de 0.25 mm. Se pesaron de 0.1 a 0.2 g de la muestra tamizada en la balanza analítica y se colocaron en matraces erlenmeyer de 250 ml, incluyendo un blanco sin muestra. Se agregaron 10 ml de Dicromato de Na 0.1667 M, incluyendo al blanco, luego 20 ml de ácido sulfúrico concentrado, ambos con buretas y se dejaron reposar los matraces por 30 minutos. Luego, 125 ml de agua destilada y 10 ml de ácido fosfórico concentrado con bureta y se dejó enfriar. Se agregaron 5 gotas de indicador de Bariosulfonato de difenilamina 0.16% y luego se titularon con la solución de Sulfato Ferroso 1M mientras se agitaba, lo mismo se hizo con el blanco para conocer la molaridad del sulfato ferroso. Finalmente el valor del porcentaje de carbono fue determinado con la fórmula:

$$\% \text{ C} = M \times ((V1 - V2) / s) (0.39) (\text{mcf})$$

Dónde: M: molaridad del sulfato ferroso; V1: ml de sulfato ferroso requeridos para el blanco; V2: ml de sulfato ferroso para la muestra problema; s: g de suelo; 0.39:  $(3 \times 10^{-3})$  (100%) (1.3); *mcf*: factor de corrección de humedad.

**Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (Van Reeuwijk, 2006):** Se pesaron 5g de suelo fino tamizado con la malla 150 y se les colocaron en tubos de centrifuga de 50 ml, se les agregó 25 ml de Acetato de Sodio 0.9 M/cloruro de sodio 0.1 M pH 7, se agitaron por 4 horas, se centrifugaron a 3000 rpm por 10 min y se desechó el sobrenadante. Luego se agregaron 25 ml de alcohol isopropílico, se agitaron por 2 horas, se centrifugaron a 3000 rpm por 10 minutos y se tiró el sobrenadante. Se les agregó finalmente Acetato de Amonio 1M pH 7, se les agitó por 4 horas y se centrifugaron a 3000 rpm por 10 minutos y se almacenaron en frascos de plástico y colocadas en refrigeración. Luego en frascos ámbar fueron pipeteados 1 ml de extracto y de 10 a 25 ml de agua destilada. Fue preparada la curva de Na de 0, 2, 5, 10, 15 hasta 25 mg/L, con 25 ml de Acetato de Amonio y se aforaron a 50 ml con agua destilada. Se valoraron con Flamómetro de Flama (Corning 400, Flame photometer) y se determinaron las concentraciones con la ecuación de regresión lineal de la curva. La ecuación usada es la siguiente:

$$\text{CIC (cmol/kg)} = ((a) \times 25 \times 50 \times mcf) / (10 \times 23 \times s)$$

Dónde: a: mg de Na en muestra; s: g de suelo (5g); mcf: factor de corrección de humedad.



**Estructura (Siebe et al., 1996):** En campo fue descrito el tipo, clase, grado, poros y raíces de 1 o 2 agregados de cada horizonte.

**Textura (Método de la Pipeta, Van Reeuwijk, 2006):** Fueron pesados 25g de muestra de suelo y colocados en frascos de vidrio de boca ancha, se les agregaron 15 ml agua destilada y de 15 a 30 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30%, dependiendo de la cantidad de materia orgánica en la muestra. Se dejaron reposar durante toda la noche y al día siguiente dependiendo de la cantidad de materia orgánica restante se les agregó otro tratamiento como el anterior y se les dejó reposar otra noche. Ya que la muestra no tenía restos orgánicos, se les colocó sobre una plancha caliente a temperatura media (60°C aprox.) hasta evaporar el agua. Una vez secas las muestras, se les trituró hasta deshacer la placa compacta que se formó y se pesaron 20g de muestra en la balanza analítica, se les colocó en otros vasos de vidrio con 20 ml de hexametáfosfato de Na al 5% y 300 ml de agua destilada, y se les puso a agitar toda la noche (16 horas aprox.). Al término del tiempo se les colocó en tratamiento con ultrasonido a 60 Hz por 10 minutos. Luego se limpiaron las arenas frotando la muestra con un gendarme de látex en una cápsula de porcelana hasta quedar limpias (viendo agua transparente en la suspensión y sedimentación de las mismas) y se colocaron en cápsulas de porcelana taradas a peso constante en baño maría a 60°C de 8 a 12 horas; luego colocadas en la estufa a 105°C por 24 horas; se enfriaron en un desecador de 2 a 4 horas; luego se pesaron en balanza analítica, determinando así el peso de las arenas totales. Las arenas totales secas, se hicieron pasar por una columna de tamices con las siguientes aperturas de malla: 2000, 1000, 500, 150, 53, y 44 µm. Cada fracción de arenas se pesó en balanza analítica y se registró el peso.

Se separaron los limos y arcillas en suspensión de agua destilada (al mismo tiempo del lavado de arenas) con el tamiz # 325 (44  $\mu\text{m}$ ), vertiendo la suspensión en un Vaso Berzelius primero y luego en una Probeta de 1L; aforando con agua destilada si fuese necesario. Se incluyó un blanco por cada lote de 8 probetas con 20 ml de hexametáfosfato de Na y aforados a 1L.

Para la toma de muestras de limos y arcillas se colocó un soporte universal que sostuvo a la Pipeta Robinson de 20 ml previamente calibrada, sobre las probetas.

Para la fracción  $<50\mu\text{m}$ , se agitó el volumen de la probeta con una varilla adaptada para tal fin e inmediatamente se tomó una muestra de 20 ml en el centro del área de la probeta a 10 cm de la superficie; se colocó la muestra en una cápsula de porcelana tarada a peso constante y se puso en baño maría a  $60^{\circ}\text{C}$  de 8 a 12 horas hasta evaporar; luego colocadas en la estufa a  $105^{\circ}\text{C}$  por 24 horas; enfriadas en un desecador de 2 a 4 horas; y pesadas en balanza analítica para obtener el valor de limos gruesos.

Para la fracción  $<20\mu\text{m}$ , se tomó la temperatura de la suspensión, se determinó la profundidad a la que se tomaría la muestra (regularmente entre 11.9 y 12.1 cm bajo la superficie); se agitó el volumen de la probeta con una varilla adaptada para tal fin y a los 5 minutos se tomó una muestra de 20 ml al centro de la probeta a la profundidad indicada; se colocó la muestra en una cápsula de porcelana a peso constante y evaporó el agua en baño maría a  $60^{\circ}\text{C}$  de 8 a 12 horas hasta; colocadas en la estufa a  $105^{\circ}\text{C}$  por 24 horas; retiradas y colocadas en un desecador de 2 a 4 horas; y pesadas en balanza analítica para el valor de limos finos.

Finalmente, para la fracción  $<2\mu\text{m}$ , después de 5.5 horas se tomó la temperatura de la suspensión del blanco, se determinó la profundidad a la que se tomaría la muestra según el manual (regularmente entre 7.8 y 8.0 cm bajo la superficie, o la media en caso de cambio

de temperatura); se tomó una muestra de 20 ml al centro de la probeta a la profundidad indicada; se colocó la muestra en una cápsula de porcelana a peso constante y se puso en baño maría a 60°C de 8 a 12 horas hasta evaporar; colocadas en la estufa a 105°C por 24 horas; retiradas y colocadas en un desecador de 2 a 4 horas; y pesadas en balanza analítica para el valor de arcillas.

Los blancos también fueron pipeteados y las muestras obtenidas para las tres últimas fracciones tratadas de la misma forma que las otras muestras, el resultado de determinar el peso de los cristales de hexametáfosfato en cada fracción del blanco se restó a las fracciones problema para corregir ese error. Finalmente, los porcentajes de arenas, limos gruesos, limos finos y arcillas fueron calculados conforme al manual. Para el reporte se sumaron los valores de limos y presentados la suma total y las arenas utilizadas para la cuantificación de vidrio volcánico.

### ***Composición del horizonte orgánico por el Método de Índice de von Post (Nordman, 2005)***

Se tomó un puño de las muestras de hojarasca en húmedo y se les apretó en la mano, luego se determinaron sus características según el cuadro siguiente:

**Cuadro 23:** Clasificación del Índice von Post.

| <b>Valor de Índice</b> | <b>Descripción</b>  |
|------------------------|---|
| 1                      | No descompuesto: Estructuras de plantas no alteradas, Agua escuriendo sin color.  |
| 2                      | Casi descompuesto: Se distinguen estructuras de plantas, agua de color amarillo a café claro.   |
| 3                      | Descompuesto muy débilmente: Se distinguen estructuras de plantas, agua turbia café, ninguna sustancia como turba pasa entre los dedos, residuo no esponjoso.               |
| 4                      | Débilmente descompuesto: se distinguen estructuras de plantas, agua fuertemente turbia, ninguna sustancia como turba pasa entre los dedos, residuos ligeramente esponjosos. |

---

|   |  |
|---|--|
| 5 | Moderadamente descompuesto: Estructuras de plantas siguen claramente distinguibles pero empiezan a ser indistinguibles, agua mucho más turbia, algo de turba escapa de los dedos, residuo esponjoso.                   |
| 6 | Fuertemente descompuesta: estructuras de plantas algo distinguibles pero más claras en el residuo comprimido que en la turba no alterada, casi la mitad del material escapa de la mano, residuo fuertemente esponjoso. |
| 7 | Fuertemente descompuesta: no se distinguen estructuras de plantas pero siguen reconocibles, cerca de la mitad de la turba escapa de la mano.   |
| 8 | Muy fuertemente descompuesta: estructuras de plantas muy indistinguibles, cerca de dos tercios de la turba escapa por los dedos, el residuo consiste de restos resistentes como fibras de raíces y madera.             |

---

***Ca y Mg intercambiables, por el Método de acetato de amonio y la valoración por absorción atómica (Van Reeuwijk, 2006):*** Se pesaron 5 g de suelo y se les colocó en tubos de centrífuga de 50 ml de polipropileno, se les agregó 30 ml de acetato de amonio 1M a pH 7, se les agitó toda la noche. Se quitaron del agitador al día siguiente y se centrifugaron a 3000 rpm por 10 min. El sobrenadante se aforó a 50 ml en matraces aforados con el mismo acetato de amonio, se filtraron con papel filtro # 2. Se tomaron 2 ml del extracto aforado y se les colocó en vasos de polipropileno con 10 ml de óxido de lantano al 0.5%. Se preparó la curva de Ca de 0, 2, 5, 10, 15, 20 y 25 mg/L y Mg de 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 mg/L, con 5 ml de Acetato de Amonio, 25 de óxido de LaO y se aforaron a 50 ml con agua destilada

Luego se cuantificaron por absorción atómica (Perkin-Elmer 2380, Atomic Absortion Spectrophotometer).

***Determinación de Na y K intercambiables, por el método de acetato de amonio y flamómetro de flama (Van Reeuwijk, 2006):*** Esta determinación se hizo directamente de los vasos de polipropileno y se midió con sus respectivas curvas de 0, 2, 5, 7.5, 10, 15, 20 y 25 mg/L, con 20 ml

de Acetato de Amonio, y aforados con agua destilada. La lectura se hizo en Flamómetro de Flama (Coming 400, Flame photometer). Los cálculos se hicieron con las fórmulas:

$$\text{Na} = ((a-0) \times 50 \times \text{mcf}) / 1150$$

$$\text{K} = ((a-0) \times 10 \times 50 \times \text{mcf}) / 1955$$

$$\text{Ca} = ((a-0) \times 10 \times 50 \times \text{mcf}) / 1002$$

$$\text{Mg} = ((a-0) \times 25 \times 50 \times \text{mcf}) / 607.5$$

**Acidez Extractable (Van Reeuwijk, 2006)** Se pesaron 2.5 g de suelo y se colocaron en tubos de centrifuga de 50 ml con solución buffer de cloruro de bario 0.25 M trietanolamina 0.2 M a pH 8.2 y se les dejó agitar toda la noche. Al siguiente día se les centrifugó a 3000 rpm por 10 min, se tomaron alícuotas de 10 ml y se les colocó en matraces erlenmeyer de 250 ml con 20 ml de agua, se les agregó 1 gota de verde bromocresol .01% y 5 gotas de la mezcla indicadora de rojo de metilo con azul de metileno. Se les tituló con HCl 0.1 M, hasta que se presentó el viraje a color púrpura, después de titular el blanco. Se calculó con la siguiente:

$$\text{A.E.} = ((a-b) \times 25 \times \text{mcf}) / 2.5$$

Los cálculos para CICE y Saturación de Bases con las siguientes:

**CEC Efectiva: bases+acidez**

$$\% \text{ S. B.} = ((\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}) / \text{CEC}) \times 100$$

**Fe, Al y Si Extractables por Oxalato ácido (Van Reeuwijk, 2006):** 1g de muestra de tierra fina, triturada y tamizada con tamiz # 60 se pesó en balanza analítica. Se les colocó en tubos de centrifuga de 50 ml con 30 ml de solución de oxalato ácido de amonio en oxalato 0.2 M. Se agitaron por 4 horas con cubiertas de papel aluminio para protegerlas de la luz,

después se les centrifugó a 3000 rpm por 10 min. Se les preparó en disolución 5X de la siguiente forma: 1 ml del extracto y 4 ml de la solución diluyente de HCl y KCl en tubos ámbar para su inmediata lectura en Absorción atómica (Perkin-Elmer 2380, Atomic Absortion Spectrophotometer). Con las referencias y curvas correspondientes, las cuervas fueron compuestas de 0, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25 ml de soluciones 100 mg/L de Fe, Al y Si con 10 ml de oxalato ácido, 5 ml de solución supresante de KCl y 1 ml de HCl concentrado en 50 ml, para tener una curva de 0, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, y 5 mg/L. Las referencias fueron de 10, 0.5 y 5 ml de las solución 100 ml/L en 100 ml de agua, de Si, Fe y Al, respectivamente. Los cálculos de las concentraciones en los extractos se realizaron por las siguientes formulas:

$$\text{Si} = ((b) * 0.1 * 5 * 30 * mcf) / 1000$$

$$\text{Al} = ((b) * 0.1 * (5, 10) * 30 * mcf) / 1000$$

$$\text{Fe} = ((b) * 0.1 * (10, 15, 20) * 30 * mcf) / 1000$$

***Fe y Al extractables por Pirofosfato de Sodio (Van Reeuwijk, 2006):*** Se pesó 1g de muestra fina y se les colocó en tubos de centrifuga de 50 ml con 30 ml de solución de pirofosfato de sodio 0.1 M, se les dejó en agitación toda la noche y al día siguiente se les centrifugó a 3000 rpm por 10 min. Se prepararon diluciones 5X con 1 ml de solución sobrenadante y 4 ml de agua destilada en tubos ámbar. Se tomaron los valores en Absorción atómica (Perkin-Elmer 2380, Atomic Absortion Spectrophotometer). Las curvas fueron de 10 ml de las soluciones de pirofosfato con 0, 2.5, 5, 12.5, y 25 ml de soluciones 100 mg/L

de Fe y Al, aforados en 50 ml para tener concentraciones de 0, 0.5, 10, 25 y 50 mg/L, respectivamente. Las concentraciones de las muestras problema se calcularon con las siguientes formulas:

$$\text{Fe} = ((b) * (5, 10, 15, 20) * 3 * \text{mcf}) / 1000$$

$$\text{Al} = ((b) * (5, 10, 15) * 3 * \text{mcf}) / 1000$$

***Fe Extractable por Ditionito de Sodio (Van Reeuwijk, 2006):*** Se pesaron 2g de muestra y se les colocó en tubos de centrifuga de 50 ml con 20 ml de solución buffer de citrato de sodio 0.27 M y bicarbonato de sodio 0.11 M en baño maría de 55 a 60 °C. Tres veces seguidas se les agregó 0.5g de Ditionito de Sodio y se les agitó constantemente con una varilla de vidrio por el primer minuto y ocasionalmente por los siguientes 5. Luego se les agregó 5 ml de la solución saturada KCl durante la agitación y se les dejó en baño maría por 5 min más. Se centrifugaron a 3000 rpm por 10 min y luego se decantaron los sobrenadantes en matraces de 100 ml, y así se hizo una vez más desde el paso en que se agregaron por primera vez los 0.5 g de Ditionito de Sodio hasta que se decantó el segundo sobrenadante en el matraz correspondiente. Entonces, ya con los 2 sobrenadantes juntos los matraces se aforaron con agua desionizada hasta 100 ml. Después se tomó 1 ml de esas soluciones y con 4 ml de agua deionizada se les mezcló en tubos ámbar con tapa y se les almacenó en refrigeración hasta su lectura en Absorción atómica (Perkin-Elmer 2380, Atomic Absortion Spectrophotometer), junto con las curvas que tuvieron 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20 y 25 ml de la solución de Fe 100 mg/L, junto con 10 ml de la solución matriz (90 ml de solución buffer+20 ml de solución saturada KCl y 6 g de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub> en 250 ml aforados con agua destilada) y aforados en 50 ml con agua destilada para tener

concentraciones de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 y 50 mg/L. Con sus respectivas referencias, arriba mencionadas. Los cálculos de las concentraciones en las muestras problema se realizaron con las siguientes formulas:

$$Fe = ((a) * 10 * (fd) * mcf) / 2000$$

***Diferencias en la distribución del tamaño de los agregados (Kemper, et al., 1986):*** Las muestras de agregados secos al aire se colocaron sobre una hoja de papel y se dividieron en cuatro cuadrantes para tomar una muestra aleatoria de agregados de 1 a 2 cm. Se pesaron 4 g de los agregados seleccionados y se les colocó dentro los tamices (Número 60, 35, 18, 10, y 4). Se llevó a los tamices con la muestra adentro a la humectadora a vapor, hasta que alcanzaron la capacidad de campo (entre 30 y 45 min a una temperatura de vapor de 70°C aprox.). Se les colocó en sus latas correspondientes con agua destilada, suficiente como para cubrir la muestra cuando el tamiz fue colocado en su interior y se accionó el tamiz rotatorio durante 3 min a 35 ciclos/min, con una altura de 1.3 cm. Luego se sacaron las muestras del aparato y los materiales que pasaron los tamices fueron colocados en cápsulas de porcelana para su secado en baño maría a 50-60°C.

Luego las latas se volvieron a llenar con agua destilada hasta cubrir los agregados estables y se les aplicó un tratamiento de ultrasonido a 60 Hz por 30 segundos.

De nuevo, se les colocó (latas y tamices) en el rotor a 35 ciclos por minuto por 5 minutos. Después de ese tiempo, se retiraron los tamices, se vació el agua en otras cápsulas de porcelana previamente marcadas y se pusieron a secar en baño maría a 50-60°C.

Lo mismo se hizo con los restos de agregados que quedaron sobre el tamiz.

Se sacaron los porcentajes de cada fracción de suelo obtenidos después de cada proceso de tamizado. Para la evaluación de los resultados se usó el Índice MWD (*meanweight diameter*), que es igual a la sumatoria de los productos de la media del diámetro de cada fracción de



agregados ( $X_i$ ) por la proporción del peso total de la muestra correspondiente a la fracción indicada (suma). Como en el ejemplo:

**Cuadro 24:** Ejemplo de cálculo del Índice MWD.

| sitio   | g 3min | g 5min | suma   | porcentaje (suma/4g) | $X_i$ (mm) | MWD= $\Sigma XIWI$ |
|---------|--------|--------|--------|----------------------|------------|--------------------|
| mall 4  | 0.0325 | 0.2004 | 0.2329 | 0.058225             | 3.38       | 0.1968005          |
| mall 10 | 0.0136 | 0.0438 | 0.0574 | 0.01435              | 1.5        | 0.021525           |
| mall 18 | 0.021  | 0.0204 | 0.0414 | 0.01035              | 0.75       | 0.0077625          |
| mall 35 | 0.0158 | 0.05   | 0.0658 | 0.01645              | 0.375      | 0.00616875         |
| mall 60 | 0.0076 | 0.0031 | 0.0107 | 0.002675             | 0.125      | 0.000334375        |
|         |        |        |        |                      | $\Sigma$   | <b>0.232591125</b> |

También se calcularon los porcentajes de microagregados presentes en los materiales que pasaron los tamices con su posterior separación por tamizado con el tamiz 0.25mm (#60) y la resta de este peso al peso del material original.

# LITERATURA CITADA

- Álvarez-Sánchez, J y Naranjo-García, E. 2003. *Ecología de suelo en la selva tropical húmeda de México*. UNAM-Instituto de Biología-Facultad de Ciencias-Instituto de Ecología, A. C. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Ver. México. pp. 302.
- Batey, T. y McKenzie, D. C. 2006. *Soil compaction: identification directly in the field*. Soil Use and Management. **22**: 123-131.
- Blake, G.R. y Hartge, K.H. 1986. Bulk Density, Chapter 13 **En**: Klute, A. (Editor). 1986. *Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical methods*. Agronomy no. 9. ASA and SSSA. USA. pp. 1188.
- Bouwer, H. 1986. Intake Rate: Cylinder Infiltrometer, Chapter 32 **En**: Klute, A. (Editor). 1986. *Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical methods*. Agronomy no. 9. ASA and SSSA. USA. pp. 1188.
- Bradford, J.M. 1986. Penetrability, Chapter 19 **En**: Klute, A. (Editor). 1986. *Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical methods*. Agronomy no. 9. ASA and SSSA. USA. pp. 1188.
- Bronick, C. J. y Lal, R. 2005. *Soil structure and management: a review*. Geoderma. **124**: 3-22.
- Cady, J.G. 1986. Petrographic Microscope Techniques, Chapter 46 **En**: Klute, A. (Editor). 1986. *Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical methods*. Agronomy no. 9. ASA and SSSA. USA. pp. 1188.
- Conant, R. T., Paustian, K. y Elliot, E. T. 2001. *Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon*. Ecological Applications. **11(2)**: 343-355.
- Díaz-Zorita, M., Perfect, E. y Grove, J. H. 2002. *Disruptive methods for assessing soil structure*. Soil and Tillage Research. **64**: 3-22.
- Dirzo, R. y García, M.C. 1992. *Rates of deforestation in Los Tuxtlas, a Neotropical Area in Southeast Mexico*. Conservation Biology. **6** (1): 84-90.
- Durand, L. y Lazos, E. 2004. *Colonization and tropical deforestation in the Sierra Santa Marta, Southern Mexico*. Environmental Conservation. **31** (1): 11-21.
- Estrada, A. y Coates-Estrada R. 2000. *Las selvas tropicales húmedas de México*. FCE. México. pp. 191.
- Feller, C. y Beare, M. H. 1997. *Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics*. Geoderma. **79**: 69-116.
- Fierer, N. y Jackson, R. B. 2006. *The diversity and biogeography of soil bacterial communities*. PNAS. **103(3)**: 626-631.
- Fitzpatrick, E. A. 1990. *Micromorfología de suelos*. CECSA. México. pp 476.
- Franzluebbers, A. J., Wright, S. F. y Stuedemann, J. A. 2000. *Soil Aggregation and Glomalin under Pastures in the Southern Piedmont, USA*. Soil Sci. Soc. Am. J. **64**: 1018-1026.

- Galván Fernández, M.A. 1998. *Influencia del transporte fluvial de sedimentos sobre la evolución de una laguna costera*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México. 132 p.
- García-Oliva, F., Sanford, R. Jr., y Kelly, E. 1999. *Effects of slash- and- burn management on soil aggregate organic C and N in a tropical deciduous forest*. *Geoderma*. **88**: 1-12.
- García-Oliva, F., Gallardo-Lancho, J. F. y Montaña, N. M. 2006. *Soil Carbon and Nitrogen dynamics followed by a forest-to-pasture conversion in western Mexico*. *Agroforestry Systems*. **66**: 93-100.
- González-Soriano, E., Dirzo, R. y Vogt, R. C. 1997. *Historia Natural de Los Tuxtlas*. UNAM. México. pp. 647.
- Greenwood, K. L. y Mckenzie, B. M. 2001. *Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review*. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. **41**: 1231-1250.
- Hassink, J. 1997. *The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles*. *Plant and soil*. **191**: 77-87.
- Haynes, R. J. 1999. *Labile organic matter fractions and aggregate stability under short-term, grass-based leys*. *Soil Biology and Biochemistry*. **31**: 1821-1830.
- Hughes, R. F., Kauffman, J. B. y Jaramillo, V. J. 1999. *Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forest in a humid tropical region of Mexico*. *Ecology*. **80 (6)**: 1892-1907.
- Hughes, R. F., Kauffman, J. B. y Jaramillo, V. J. 2000. *Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico*. *Ecological applications*. **10(2)**: 515-527.
- Houghton, R. A. y Goodale, C. L. 2004. *Effects of land-use change on the carbon balance of terrestrial ecosystems*. *Ecosystems and Land Use Change*. Geophysical Monograph Series 153. American Geophysical Union. pp 85-98.
- INEGI. 1997. *Destino de la producción agropecuaria en el estado de Veracruz*. INEGI. México.
- INEGI. 1984. Carta Edafológica, escala 1:250, 000. Coatzacoalcos E15-1-4.
- INEGI. 1991. Fotografías aéreas, escala 1:75, 000. La Nueva Victoria E15A63.
- Islam, K. R. y Weil, R. R. 2000. *Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystems of Bangladesh*. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. **79**: 9-16.
- IUSS Working Group WRB, 2006, *World reference base for soil resources*, 2<sup>nd</sup> edition, World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.
- Jener, F. L. de Moraes, Volkoff, B., Cerri, C. C. y Bernoux, M. 1996. *Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil*. *Geoderma*. **70**: 63-81.
- Kemper, D.W. y Rosenau, K. 1986. *Aggregate stability and size distribution*. **En**: Klute, A. *Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical methods*. Agronomy no. 9. ASA and SSSA. USA. pp. 425-442.
- Lal, R. 1987. *Tropical Ecology and physical Edaphology*. John Wiley and Sons. UK. pp 166-545.

- Martín-Del Pozzo, A. L. 1997. *Geología*. En: González Soriano, E., Dirzo, R., Vogt, R. C. *Historia Natural de Los Tuxtlas*. UNAM. México. pp. 647.
- Martínez, L. J. y Zinck, J.A. 2004. *Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia*. Soil and Tillage Research. **75**: 3-17.
- McDowell, W. 1998. *Internal nutrient fluxes in a Puerto Rican rain forest*. Journal of Tropical Ecology. **14**: 521-536.
- Mulugeta, L. 2004. *Effects of land use changes on soil quality and native flora degradation and restoration in the highlands of Ethiopia*. Doctoral Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, pp 64.
- Nguyen, M. L., Sheath, G. W. y Smith, C. M. 1998. *Impact of cattle treading on hill land. 2. Soil physical properties and contaminant runoff*. New Zealand Journal of Agricultural Research. **41**: 279-290.
- Nordman, C. 2005. *Southern coastal plain seepage swamp and baygall ecological system: ecological integrity assessment*. NatureServe. pp 48.
- Numata, I., Chadwick, O. A., Roberts, D. A., Schimel, J. P., Sampaio, F. F., Leonidas, F. O. y Soares, J. V. 2007. *Temporal nutrient variation in soil and vegetation of post-forest pastures as a function of soil order, pasture age, and management, Rondônia, Brazil*. Agriculture Ecosystems and Environment. **118**: 159-172.
- Ortega, B., Caballero, M., Lozano, S., Vilaclara, G., y Rodríguez, A. 2006. *Rock magnetic and geochemical proxies for iron mineral diagenesis in a tropical lake: Lago Verde, Los Tuxtlas, East-Central Mexico*. Earth and Planetary Science Letters. **250**: 444-458.
- Perret, S. y Dorel, M. 1999. *Relationships between land use, fertility and Andisol behaviour: examples from volcanic islands*. Soil Use and Management. **15**: 144-149.
- Pochet, G., Van der Velde, M., Vanclooster, M. y Delvaux, B. 2007. *Hydric properties of high charge, halloysitic clay soils from the tropical South Pacific region*. Geoderma. **138**: 96-109.
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M. y Roquero de Laburu, C. 1999. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa. España. pp. 849.
- Prado, B., Duwig, C., Hidalgo, C., Gómez, D., Yee, H., Prat, C., Esteves, M. y Etchevers, J.D. 2007. *Characterization, functioning and classification of two volcanic soil profiles under different land uses in Central Mexico*. Geoderma. **139**: 300-313.
- Ramos-Escobedo, M. G. y Vázquez, G. 2001. *Major nutrients and primary productivity in volcanical neotropical streams draining rainforest and pasture catchments at Los Tuxtlas, Veracruz, Mexico*. **445**: 67-76.
- Van Reeuwijk, L.P. 2006, *Procedures for soil analysis*. 7th Edition, Technical Report 9. Wageningen, Netherlands, ISRIC – World Soil Information.
- Reiners, W. A., Bouwman, A. F., Parsons, W. F. J. y Keller, M. 1994. *Tropical rain forest conversion to pasture: changes in vegetation and soil properties*. Ecological Applications. **4(2)**: 363-377.
- Rhoades, C. C., Eckert, G. E. y Coleman, D. C. 2000. *Soil carbon differences among forest, agriculture, and secondary vegetation in lower montane Ecuador*. Ecological Applications. **10(2)**: 497-505.

Sánchez, P.A., Palm, C.A. y Buol, S.W. 2003. *Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics*. Geoderma. **114**: 157-185.

Siebe, C., Jahn, R. y Stahr, K. 1996. *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Instituto de Geología, UNAM. México. pp. 57.

Six, J., Feller, C., Denef, K., Stephen, M., Ogle, M., de Moraes, J. C., y Albrecht, A. 2002. *Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no tillage*. Agronomie **22**: 755-775.

Sommer-Cervantes, I., Flores-Delgadillo, L., y Gutiérrez-Ruiz, M. 2000. *Caracterización de los suelos de la Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas, Veracruz*. **En**: Álvarez-Sánchez, J y Naranjo-García, E. *Ecología de suelo en la selva tropical húmeda de México*. UNAM-Instituto de Biología-Facultad de Ciencias-Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Ver. México. pp. 302.

Templer, P. H., Groffman, P. M., Flecker, A. S., y Power, A. G. 2005. *Land use change and soil nutrient transformations in the Los Haitises region of the Dominican Republic*. Soil Biology and Biochemistry. **37**: 215-225.

Whitehead, C. D. 2000. *Nutrient element in grassland*. CABI Publishing. United Kingdom. pp 14-40.

Zimmermann, B, Elsenbeer, H y De Moraes, J.M. 2006. *The Influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation*. Forest Ecology and Management. 222. 29-38 pp.

Sitios en internet consultados:

Ficha Técnica de la Sierra de Los Tuxtlas-Laguna del Ostión, Regiones Terrestres Prioritarias de México, CONABIO (Consultado en [www.conabio.gob.mx](http://www.conabio.gob.mx), 2005).