



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

## FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

Cobertura vegetal, materia orgánica y pH en suelo y su relación con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

### T É S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

### B I Ó L O G O

PRESENTA:

**JOSÉ DONACIANO MIGUEL JIMÉNEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**BIÓL. JUAN MANUEL VALDERRÁBANO GÓMEZ**



## **CONTENIDO**

|   |    |
|---|----|
| RESUMEN.....  | 1  |
| 1.-INTRODUCCIÓN.....  | 3  |
| 2.-MARCO CONCEPTUAL.....  | 4  |
| 2.1. Percepción Remota (Teledetección).....   | 4  |
| 2.2. Índices de Vegetación.....   | 5  |
| 2.2.1 Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....                         | 7  |
| 2.2.1.1 Estructura de la Clorofila.....   | 9  |
| 2.3. Cobertura del Suelo.....   | 9  |
| 2.3.1 Mantillo del Suelo.....   | 10 |
| 2.4. Materia Orgánica del Suelo (MOS) y su Relación con el Suelo y Vegetación.....        | 10 |
| 2.5. Relación de la Materia Orgánica con la Vegetación y con el Suelo.....                | 10 |
| 2.6. pH o Reacción del Suelo.....   | 11 |
| 2.7. Elementos Esenciales.....  | 12 |
| 2.8. Suelo.....   | 12 |
| 2.8.1. Propiedades del Suelo.....   | 13 |
| 2.9. Análisis Estadístico.....  | 13 |
| 2.9.1.-Correlación Simple de Pearson.....   | 13 |
| 2.9.2.-Análisis de Varianza.....  | 14 |
| 3. JUSTIFICACIÓN.....   | 15 |
| 4. HIPÓTESIS.....   | 16 |
| 5. OBJETIVOS.....   | 16 |
| 5.1 Particulares.....   | 16 |
| 6.-METODOLOGÍA.....   | 17 |
| 6.1.-Área de Estudio.....   | 17 |
| 6.2.-Trabajo de Campo.....  | 19 |
| 6.3.-Trabajo de Laboratorio.....  | 20 |
| 6.4.-Trabajo de Gabinete.....   | 22 |
| 7.-RESULTADOS.....  | 25 |
| 7.1.- Vegetación.....   | 25 |
| 7.2.-Tipos de Suelos.....   | 27 |
| 7.3.-Interpretación del Vigor de la Vegetación en las Imágenes Landsat ETM +.....         | 29 |
| 7.3.1.-Validación del Vigor de la Vegetación.....   | 33 |
| 7.3.2.-Vigor de la Vegetación en Zoquiapan y Anexas.....                                  | 34 |
| 7.3.3.-Vigor de la Vegetación en la zona de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl..... | 37 |
| 7.4.-Producción Maderable y su Relación con el Vigor de la Vegetación.....                | 41 |
| 7.5.-Reacción del Suelo y su Relación con el Vigor de la Vegetación.....                  | 44 |
| 7.5.1.-pH Activo.....   | 44 |
| 7.5.2-pH Potencial.....   | 48 |
| 7.5.3.-Vigor de la Vegetación y la Reacción del Suelo.....                                | 50 |
| 7.6.-Porcentaje de Materia Orgánica del Suelo (MOS).....                                  | 52 |
| 7.6.1.-Vigor de la Vegetación y Materia Orgánica del Suelo.....                           | 55 |
| 7.7.-Nitrógeno.....   | 56 |
| 7.7.1.- Porcentaje de Nitrógeno en Tejido Foliar.....                                     | 56 |
| 7.7.2.- Vigor de la Vegetación y Relación con Nitrógeno Foliar (N-Foliar).....            | 58 |
| 7.7.3.- Porcentaje de Nitrógeno en Mantillo.....  | 59 |
| 7.7.4.-Vigor de la Vegetación y Relación con N en Mantillo.....                           | 62 |
| 7.7.5.-Nitrógeno Total en Suelo.....  | 63 |
| 7.7.6.-Vigor de la Vegetación y Relación con N total del Suelo.....                       | 67 |

|  |    |
|--|----|
| 7.8.-Magnesio.....   | 68 |
| 7.8.1.-Porcentaje de Magnesio en Tejido Foliar. ....                         | 68 |
| 7.8.2.-Vigor de la Vegetación y Relación con Mg Foliar. ....                 | 69 |
| 7.8.3.- Porcentaje de Magnesio en Mantillo.....                              | 71 |
| 7.8.4.-Vigor de la Vegetación y Relación con Mg en Mantillo. ....            | 73 |
| 7.8.5.-Magnesio en Suelo.....  | 74 |
| 7.8.6.-Vigor de la Vegetación y Relación con Mg Intercambiable en Suelo..... | 78 |
| 8.-DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....  | 79 |
| 9.-CONCLUSIONES.....   | 84 |
| 10.-RECOMENDACIONES.....   | 84 |
| 11.-BIBLIOGRAFÍA.....  | 85 |
| 12.-ANEXO.....   | 91 |

## **INDICE DE CUADRO**

|   |    |
|---|----|
| Cuadro 1.-Características de las bandas de los Sensores Landsat y su utilidad.....  | 5  |
| Cuadro 2.-Índices de vegetación utilizados para evaluar el vigor de la vegetación. ....   | 6  |
| Cuadro 3.-Combinación de bandas de los Sensores Landsat y su utilidad.. ....  | 6  |
| Cuadro 4.- Descripción de la zona de estudio.....   | 25 |
| Cuadro 5.- Suelos descritos por Mielich (1980) y su equivalente con WRB. ....   | 27 |
| Cuadro 6.-Sitios de estudio y valor de vigor de la vegetación. ....   | 31 |
| Cuadro 7.- Sitios de validación del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.....   | 35 |
| Cuadro 8.- Sitios de validación del Parque Nacional Ixta-Popo. ....   | 38 |
| Cuadro 9.- Sitios de validación ecológica y productividad forestal.....   | 42 |
| Cuadro 10.- Sitios de validación ecológica descrito por Valderrábano (2012) y productividad forestal de menor a mayor volumen maderable. .... | 43 |
| Cuadro 11.- Grado de acidez de los suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.....  | 45 |
| Cuadro 12.- Grados de acidez por intervalo altitudinal de los suelos de Parque Nacional Iztaccíhuatl y Popocatepetl. ....                     | 46 |
| Cuadro 13.- Promedio por intervalo altitudinal de NDVI y pH Potencial .....   | 51 |
| Cuadro 14.- Promedio por vegetación y su relación con el pH y el NDVI. ....   | 51 |
| Cuadro 15.- Intervalos de referencia del contenido de Materia Orgánica del suelo.....   | 53 |
| Cuadro 16.- Los valores de referencia por intervalo de altitud para clasificar la concentración de la MOS volcánicos. ....                    | 53 |
| Cuadro 17.- Promedio de vigor de la vegetación, pH y MOS por intervalo altitudinal.....   | 55 |
| Cuadro 18. Materia Orgánica del Suelo por tipo de vegetación y su relación con pH y vigor.....  | 55 |
| Cuadro 19. Vigor de la vegetación y Nitrógeno foliar por intervalo altitudinal.....   | 58 |
| Cuadro 20.- Promedio por vegetación y su relación con el N foliar y el NDVI.....  | 58 |
| Cuadro 21.- Promedio por intervalo altitudinal de NDVI- N en mantillo.....  | 62 |
| Cuadro 22.- Promedio por vegetación y su relación con la N mantillo y el NDVI.....  | 62 |
| Cuadro 23.- Intervalos de clases de N-total. ....   | 64 |

|   |    |
|---|----|
| Cuadro 24.- Vigor de la Vegetación y Nitrógeno total por intervalo altitudinal. ....                            | 67 |
| Cuadro 25.- Promedio por vegetación y su relación con la N total y el NDVI. ....                                | 67 |
| Cuadro 26.- Promedio por intervalo altitudinal de NDVI- Mg foliar. ....   | 70 |
| Cuadro 27.- Promedio por vegetación y su relación con la Mg foliar y el NDVI. ....                              | 70 |
| Cuadro 28.- Promedio por intervalo altitudinal de NDVI- Mg en mantillo. ....                                    | 73 |
| Cuadro 29.- Promedio por vegetación y su relación con el Mg en mantillo y el NDVI. ....                         | 73 |
| Cuadro 30.- Intervalos de clases de Mg en cmol kg-1. ....   | 75 |
| Cuadro 31.- Valores promedio de NDVI y Mg Intercambiable por intervalo altitudinal. ....                        | 78 |
| Cuadro 32.- Promedio por vegetación y su relación con el Mg intercambiable (cmol Kg-1) en suelo y el NDVI. .... | 78 |
| Cuadro 33.- Cuadro de datos Anexo. ....   | 93 |

## **INDICE DE FIGURA**

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.- Comportamiento espectral teórico de la vegetación vigorosa. ....  | 7  |
| Figura 2.-Calculo del NDVI y el Valor del Infrarojo y Rojo Cercano. ....   | 8  |
| Figura 3.-Estructura de la clorofila. Tomada de Nelson y Cox, 2001. ....   | 9  |
| Figura 4.-Imagen del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl. ....   | 17 |
| Figura 5.-Tratamiento de Muestras Foliares. ....   | 21 |
| Figura 6.-Histograma banda 1, sin corrección atmosférica (izquierda) y con corrección atmosférica (derecha). ....            | 22 |
| Figura 7.-Realce del histograma. ....  | 23 |
| Figura 8.-Frecuencia de vegetación dominante del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. ....                             | 26 |
| Figura 9.-Mapa de suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl descritos por Mielich (1980). ....                    | 28 |
| Figura 10.-Vigor de la vegetación. ....  | 29 |
| Figura 11.-Comparación de la Imagen de NDVI (Izquierda) con imagen de Google Earth año 2008 (Derecha). ....                  | 29 |
| Figura 12.-Mapa del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, composición (NDVI) y puntos de muestreo y de Validación. .... | 30 |
| Figura 13.-Vigor de bosques de <i>A. religiosa</i> con respecto a los de <i>Pinus</i> . ....                                 | 32 |
| Figura 14.-Mapa del PNIP combinación NDVI y los puntos de validación. ....   | 33 |
| Figura 15.-Mapa del PNZA composición NDVI y los puntos de validación. ....   | 34 |
| Figura 16.-Sitios de validación Zoquiapan y Anexas, punto 26 y La Mina. ....   | 36 |
| Figura 17.-Sitios de validación Zoquiapan y Anexas, sitio 24 y (Cuadrante 3). ....   | 37 |
| Figura 18.-Mapa del PNIP composición NDVI y los puntos de validación. ....   | 38 |
| Figura 19.-Sitios de validación del PNIP. Puntos La Caja y Santa Isabel (Cuadrante 1). ....                                  | 39 |
| Figura 20.-Sitios de validación PNIP. Puntos Potrero y F1. ....  | 40 |
| Figura 21.-Sitios de validación PNIP. Puntos Tomacoco y Cruce via Ameca. ....  | 41 |
| Figura 22.- Relación entre altitud y pH activo. ....   | 45 |
| Figura 23.-Análisis de varianza entre suelos y pH activo. ....   | 46 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 24.-Análisis de Varianza para pH Activo y <i>A. religiosa</i> y <i>Pinus</i> . .....         | 47 |
| Figura 25.-Análisis de Varianza para pH Activo y exposición. ....                                   | 47 |
| Figura 26.- Reacción del suelo (pH Potencial) y vigor de la vegetación. ....                        | 48 |
| Figura 27.-Relación entre altitud y pH potencial. ....  | 49 |
| Figura 28.-pH potencial en bosques de <i>Pinus</i> y <i>A. religiosa</i> . ....                     | 49 |
| Figura 29.-Análisis de varianza de exposición y pH potencial. ....                                  | 50 |
| Figura 30.- Relación del vigor de la vegetación y el pH activo. ....                                | 50 |
| Figura 31.- Relación del vigor de la vegetación y el pH potencial. ....                             | 50 |
| Figura 32.- Porcentaje de Materia Orgánica del Suelo y el vigor de la Vegetación. ....              | 52 |
| Figura 33.-Relación entre porcentaje de MOS y altitud. ....   | 53 |
| Figura 34.-Análisis de varianza para MOS y la vegetación. <i>A. religiosa</i> y <i>Pinus</i> . .... | 54 |
| Figura 35.-ANOVA Multifactorial entre MOS porcentual y Exposición. ....                             | 54 |
| Figura 36.- Porcentaje de N en tejido foliar y vigor de la vegetación. ....                         | 56 |
| Figura 37.- Relación entre N foliar y pH activo. ....   | 57 |
| Figura 38.-Relación entre materia Orgánica del suelo y N-foliar. ....                               | 57 |
| Figura 39. N foliar en bosque de <i>A. religiosa</i> y <i>Pinus</i> . ....                          | 58 |
| Figura 40. Porcentaje de N en mantillo y el Vigor de la vegetación. ....                            | 59 |
| Figura 41.- Relación entre N-mantillo y pH activo. ....   | 60 |
| Figura 42.-Relación entre N-mantillo y MOS porcentual. ....   | 60 |
| Figura 43.- Relación entre N en mantillo y N foliar. ....   | 61 |
| Figura 44.- Relación entre N en mantillo y Mg foliar. ....  | 61 |
| Figura 45.-ANDEVA entre N-mantillo y Vegetación. ....   | 61 |
| Figura 46.-Relación del vigor de la vegetación y N en mantillo. ....                                | 62 |
| Figura 47.- Porcentaje de N total en suelo y Vigor de la vegetación. ....                           | 63 |
| Figura 48.- Relación entre N-total y altitud. ....  | 64 |
| Figura 49.- Relación entre N-total en suelo y MOS %. ....   | 65 |
| Figura 50.- Relación entre N total en suelo y N-foliar. ....  | 65 |
| Figura 51.- Relación entre N total en suelo y Mg foliar. ....                                       | 65 |
| Figura 52.- Relación entre N total en suelo y N en mantillo. ....                                   | 66 |
| Figura 53.- Relación entre N total en suelo y Mg foliar. ....                                       | 66 |
| Figura 54.- Relación entre N-total y Vegetación. ....   | 66 |
| Figura 55.- Relación del vigor de la vegetación y N total en suelo ....                             | 67 |
| Figura 56.-Porcentaje de Mg en tejido foliar y vigor de la vegetación. ....                         | 68 |
| Figura 57.- Relación entre Mg-foliar y Vegetación. ....   | 69 |
| Figura 58.- Relación del vigor de la vegetación y Mg en tejido foliar. ....                         | 70 |
| Figura 59.- Porcentaje de Mg en mantillo y Vigor de la vegetación. ....                             | 71 |
| Figura 60.- Relación entre N-mantillo y Mg- foliar. ....  | 72 |
| Figura 61.- Relación entre Mg-mantillo y N- foliar. ....  | 72 |
| Figura 62.- Relación entre Mg-mantillo y Vegetación. ....   | 72 |
| Figura 63.- Relación del vigor de la vegetación y Mg en mantillo. ....                              | 73 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 64.- Mg Intercambiable en Suelo y el Vigor de la Vegetación. .... | 74 |
| Figura 65.- Relación entre Mg-en suelo y altitud.....                    | 75 |
| Figura 66.- Relación entre Mg en suelo y pH Activo. ....                 | 76 |
| Figura 67.- Relación entre Mg en suelo y pH Potencial. ....              | 76 |
| Figura 68.- Relación entre Mg en suelo y foliar. ....                    | 76 |
| Figura 69.- Relación entre Mg en suelo y Mg en mantillo. ....            | 77 |
| Figura 70.- Relación entre Mg cmolk-1 y Vegetación. ....                 | 77 |
| Figura 71.- Relación del vigor de la vegetación y Mg intercambiable..... | 78 |
| Figura 72.- Mapa combinación 4,3,2. Falso color. ....                    | 91 |
| Figura 73.- Mapa combinación 3-NDVI-1. Falso color.....                  | 92 |

## DEDICATORIA

A mi madre, Ma. Julia Jiménez Nicolás, todo lo que soy, se lo debo a mi madre. Atribuyo todos mis éxitos en esta vida a la enseñanza moral, intelectual y física que recibí de ella, yo sé que aunque no estés conmigo, lograste que terminara algo que siempre tenías en mente que lograría, hoy puedo decir que todos tus sacrificios no fueron en vano y que hiciste en mí una persona de provecho, gracias mamá te amo.

A mi padre, Evencio Miguel Cruz, nos enseñaste que todo en esta vida lo teníamos que hacer con nuestro esfuerzo, nos enseñaste a trabajar y salir con nuestro esfuerzo adelante y sobre todo a no agachar la cabeza.

A mis hermanos, Carlos Alberto Miguel Jiménez, Mario Cuauhtémoc Miguel Jiménez y Evelyn Miguel Jiménez, que siempre estamos juntos en las buenas y en las malas, siempre sacando las cosas que nos hacían falta, siempre tratando de mejorar en todos los aspectos, siempre unidos, siempre juntos, los quiero mucho a todos.

## AGRADECIMIENTOS

A la virgen de Guadalupe, desde que empecé mis caminatas agradeciéndote todo lo que me has dado no puedo dejar de agradecerte, por darme esa paz que necesitaba en esos momentos difíciles y sobretodo en nunca dejarme caer.

A mis tíos, Carlos, Mari, Catalina, Leoncio, Lupe, Neme, Venancio, Lalo que siempre estuvieron presentes en todos los momentos difíciles y que siempre están presentes en las buenas y en las malas.

A mis primos, Martin, Sandra, Andrés, Félix, Susana, Diego, que siempre están presentes en todos nuestro compromisos y que siempre nos apoyan.

A mi ahijado Juan Carlos, que quiero que llegues muy lejos y que veas que si se puede lograr sacar una carrera, aunque empecemos desde abajo.

Al Doc. Gerardo, por siempre lo considere como mi asesor de tesis, aun que llegue pidiéndole la oportunidad de realizar mi tesis con él, en algo que no maneja, por darme alas de no abandonar mi tesis cuando me decían que no se podía realizar, y sobre todo en presentarme a la persona que me dedico su tiempo, sus consejos y sobre todo su amistad para realizar y concluir mi tesis.

A mi asesor de tesis Juan Manuel Valderrábano G. que ante todo me tuvo paciencia, por brindarme todos sus consejos, para llevar a cabo esta finalización de mi tesis, sobre todo por brindarme sus conocimientos y enseñanzas.

Al Doc. Efraín por darme sus consejos y apoyarme al enriquecer el contenido de este trabajo.

A todos mis maestros que siempre estuvieron ahí para apoyarme.

A mis compañeros de mi generación, Mario, rene, Luís, Lalo, Margarita, Alejandra, Liliana que siempre estamos en contacto

A Alma Bella por ser una hermosa persona conmigo y apoyarme en todos los trámites que no podía realizar por estar trabajando fuera al igual que Beyibet por todo su apoyo. Gracias



## RESUMEN

La Teledetección muestra rápidamente las perturbaciones de los ecosistemas, dado que monitorea áreas grandes y detecta cambios en su funcionamiento. El Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI), es un buen estimador de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (RFA). Se fundamenta en el comportamiento de ésta en función de su espectro electromagnético frente a las radiaciones rojas e infrarrojas. Los suelos y la vegetación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl han sido perturbados por actividades agrícolas y ganaderas que han degradado sus componentes. Por lo tanto, el presente trabajo pretende aportar conocimiento del estado que guardan las especies de coníferas (*Pinus spp.* y *Abies religiosa*) y los suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl mediante el uso de imágenes Landsat ETM+, índice de vegetación y la relación de éstos con el pH, materia orgánica del suelo (MOS), N-total y Mg intercambiable del suelo y con los porcentajes de N y Mg en tejido foliar. La hipótesis planteada fue que la concentración de N-total y Mg intercambiable del suelo será mayor en sitios con más contenido de MOS y serán más disponibles a pH activo de entre 5 y 6.5 unidades, y en consecuencia las especies de *Pinus* y de *Abies religiosa*, en estos sitios tendrán mayor porcentaje de N y Mg foliar y reflejarán valores más altos en el NDVI. Para ello, se estudiaron 77 sitios, cada uno con cuadrantes de 50 m x 20 m, donde se tomaron 5 muestras de suelo al azar de 0-0.2 m de profundidad. En cada sitio se realizó una descripción ecológica y se tomaron al azar muestras de tejido foliar de individuos arbóreos para análisis de N y Mg. Dentro del cuadrante, se midió el diámetro a la altura del pecho (1.3 m) y se estimó la altura y cobertura de cada árbol para establecer el volumen de madera del sitio. En general, se encontró que los valores más altos de NDVI (mayor vigor) corresponden a sitios con bosques mejor conservados, con mayor volumen de madera, más N en las acículas, pH menos ácidos y en donde la cantidad de MOS fue mayor. Los bosques de *A. religiosa* presentaron mayor contenido de Mg y N foliar en comparación con los bosques de *Pinus*, lo que reflejó un menor vigor en este tipo de vegetación.

Palabras clave. Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl, NDVI, MOS, pH.

## ABSTRACT

Remote sensing quickly shows disturbances of ecosystems, since large areas monitors and detects changes in performance. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is a good estimator of the fraction of photosynthetically active radiation intercepted by vegetation (RFA). It is based on the behavior of this in terms of its electromagnetic spectrum face red and infrared radiation. Soils and vegetation of the Iztaccihuatl-Popocatepetl National Park have been disturbed by farming activities that have degraded components. Therefore, this paper aims to provide knowledge of the state that keep species of conifers (*Pinus* spp., And *Abies religiosa*) and soils National Park Iztaccihuatl-Popocatepetl by using Landsat ETM + vegetation index and the ratio of those with pH, soil organic matter (SOM), N-total soil exchangeable Mg and the percentages of N and Mg in leaf tissue. The hypothesis was that the concentration of N-total exchangeable soil Mg will be greater in sites with more content available MOS and be active at pH 5 to 6.5 units, and consequently the species *Pinus* and *religious Abies*, these sites have a higher percentage of leaf N and Mg and higher values reflect NDVI. For this, we studied 77 sites, each with quadrants 50 mx 20 m, where 5 soil samples taken at random from 0-0.2 m. At each site was a description ecological and took random samples of individual trees leaf tissue for analysis of N and Mg. Within the quadrant, we measured the diameter at breast height (1.3 m) and estimated the height and cover of each tree to establish the volume of timber from the site.

In general, it was found that higher NDVI values (greater force) are best preserved forest sites, with the largest timber plus N in the needles, less acidic pH and wherein the amount of MOS was higher. The forests of *A. religiosa* had higher Mg content and leaf N compared to pine forests, reflecting a smaller effect in this type of vegetation.

Keywords. Iztaccihuatl Popocatepetl National Park, NDVI, MOS, pH.

## 1.-INTRODUCCIÓN.

La Percepción Remota estudia la energía reflejada, emitida o transmitida por un objeto del cual se obtienen datos sin tener contacto directo. Esta ciencia detecta perturbaciones en los ecosistemas a través de su energía, dado que monitorea superficies extensas y analiza cambios en su funcionamiento (Alcaraz *et al.*, 2008). Uno de los índices espectrales más usados para detectar dichas perturbaciones es el “Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada” (NDVI, por sus siglas en inglés). Tiene gran valor en términos ecológicos, ya que es un buen estimador de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (Paruelo, 2008; Alcaraz *et al.*, 2008). Las clorofilas, pigmentos de los cloroplastos, están capacitadas para absorber luz visible en las membranas de los tilacoides (dentro de los cloroplastos) durante la fotosíntesis. Los cloroplastos poseen clorofila *a* y *b*, con estructuras policíclicas planas, cuya posición central está ocupada por  $Mg^{2+}$  coordinado por cuatro átomos de N de la protoporfirina. La vegetación sana refleja luz verde y verde amarilla (500 y 600  $\mu m$ ) y absorbe longitudes violeta, azul, anaranjado y rojo. La vegetación estresada por falta de agua, nutrimentos, plagas, entre otros, se diferencia mejor con la energía lumínica en el infrarojo dado que disminuye su reflectancia (Jensen, 2007). La vegetación se nutre principalmente del mantillo y de la materia orgánica del suelo (MOS) puesto que son la reserva principal de N y Mg (esenciales para la molécula de clorofila) y otros nutrimentos; además, retienen agua, agregan las partículas del suelo y regulan la temperatura y acidez del suelo. El pH del suelo determina directamente la disponibilidad de nutrimentos para la biota, la mayor parte de los suelos forestales tienen un pH de 3.5 a 6.5 aproximadamente (Foth, 1980; Teuscher y Adler; 1980, Pritchett, 1991). El suelo es definido como un cuerpo natural, con una mezcla variable de minerales modificados física, química y biológicamente, junto con materia orgánica en desintegración, que proporciona soporte mecánico y sustento a la biota en general, dado que es hábitat de macro y microorganismos. En el suelo se intercambian y fijan sustancias nutritivas, siendo un componente fundamental en la interacción con la hidrósfera, atmósfera, litósfera y biósfera del ecosistema (Velázquez *et al.*, 2007; Etchevers *et al.*, 2000). Los suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl sufren deterioro causado por la presión de las poblaciones aledañas. Han sido sujetos de extracción y aprovechamiento por actividades agrícolas y ganaderas caracterizadas por su tipo extensivo y tradicional. Además, las actividades comerciales de los recursos forestales, sin control legal, han generado áreas deforestadas y alteradas, demostrando un desequilibrio en la relación hombre-naturaleza (Hernández y Granados, 2006).

## 2.-MARCO CONCEPTUAL

### 2.1. Percepción Remota (Teledetección).

Este concepto parte del principio físico de una perturbación (energía electromagnética, onda de presión, campos gravitacionales) producida por el objeto o sistema observado en el ambiente, la cual se transmite al sistema receptor para ser registrada, almacenada y posteriormente analizada e interpretada (Gilabert *et al.*, 1997).

La radiación electromagnética es el medio más usado en la teledetección. Sánchez *et al.*, (2002) la definen como el **Registro de información en las regiones del ultravioleta, visible, infrarrojo y microondas por medio de scanners y cámaras en plataformas móviles de un objeto sin entrar en contacto material con él**. Consiste en el análisis de información adquirida por medio de técnicas de interpretación de fotografías aéreas y de imágenes satelitales.

Tiene como objetivo reconocer las características electromagnéticas de la superficie terrestre y de los fenómenos que en ella se producen a partir de datos registrados por un sensor. Entre los sensores remotos ampliamente utilizados para monitorear vegetación se encuentran: *LANDSAT, ASTER, QUICKBIRD, IKONOS, SPOT, HYPERION, ALI* y los aerotransportados: *GEOSCAN, AVIRIS, HYPMAP*, entre otros (Maass *et al.*, 2006; Jensen, 2007).

La Percepción Remota se ha fortalecido con el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) dado que aprovecha las posibilidades analíticas de los ordenadores, facilitando múltiples operaciones difícilmente accesibles por medios convencionales; por ejemplo, generalización cartográfica, integración de variables espaciales, análisis de vecindad, etc. Además, los SIG permiten almacenar información espacial de forma eficiente, facilitando su actualización y acceso directo al usuario (Linares *et al.*, 2008). En el Cuadro 1 se presenta a cada uno de los sensores Landsat y sus características.

**Cuadro 1.-Características de las bandas de los Sensores Landsat y su utilidad.**

|                  |   |   |
|------------------|---|---|
| LANDSAT (TM),    | Banda 1 (B1); 455 a 500 nm (Azul)   | Usada para el mapeo de aguas costeras, tipo de forestación o agricultura e identificación de centros poblados.  |
|                  | Banda 2 (B2); 500 a 580 nm (Verde)  | Corresponde a la reflectancia del verde de la vegetación vigorosa o saludable. También es usada para la identificación de centros de población.   |
|                  | Banda 3 (B3); 620 a 700 nm (Rojo)   | Usada para la discriminación de especies de plantas, determinación de límites de suelos, delineaciones geológicas así como modelos culturales.  |
|                  | Banda 4 (B4); >775 nm (Infrarrojo Reflectivo)   | Determina la cantidad de biomasa presente en un área, enfatiza el contraste de zonas de agua-tierra, suelo-vegetación.  |
|                  | Banda 5 (B5) >775 nm (Infrarrojo Medio):  | Es sensible a la cantidad de agua en las plantas. Usada en análisis de las mismas, tanto en época de sequía como cuando es saludable. También es una de las pocas bandas que pueden ser usadas para la discriminación de nubes, nieve y hielos. |
|                  | Banda 6 (B6) >775 nm (Termal)   | Detecta vegetación enferma, intensidad de calor, aplicaciones de insecticidas, polución termal, actividad geotermal, actividad volcánica, etc.  |
|                  | Banda 7 (B7) >775 nm (Infrarrojo medio):  | Es importante para la discriminación de tipos de rocas y suelos, así como el contenido de humedad entre suelo y vegetación.   |
| LANDSAT 7 (ETM), | A diferencia del LANDSAT TM, captura imágenes pancromáticas con 15 m de resolución y dos imágenes termales en una ganancia baja y la otra en ganancia alta, cubren un área aproximada de 180 Km <sup>2</sup> . A partir del año 2003 LANDSAT ETM tuvo problemas y a partir del 14 de julio del mismo año, las imágenes se colectan en modo SLC-off. |   |

Este sensor captura imágenes desde el año 1984 hasta la actualidad, el ancho de la escena es alrededor de 180 Km<sup>2</sup> y posee 7 bandas espectrales (Buendía *et al.*, 2002).

## 2.2. Índices de Vegetación.

Son combinaciones de bandas espectrales que realzan la contribución de la vegetación en la respuesta espectral de una superficie y atenúan la del suelo, iluminación y atmósfera (Cuadro 2 y 3). Con los índices de vegetación se pretende conseguir información clara sobre características de la vegetación y obtener una correlación con parámetros biológicos como biomasa, índice de superficie foliar (LAI por sus siglas en inglés) etc., (Sánchez *et al.*, 2002; Paruelo, 2008; Chuvieco, 1996).

**Cuadro 2.-Índices de vegetación utilizados para evaluar el vigor de la vegetación. (Tomados de Gilabert *et al.*, 1997).**

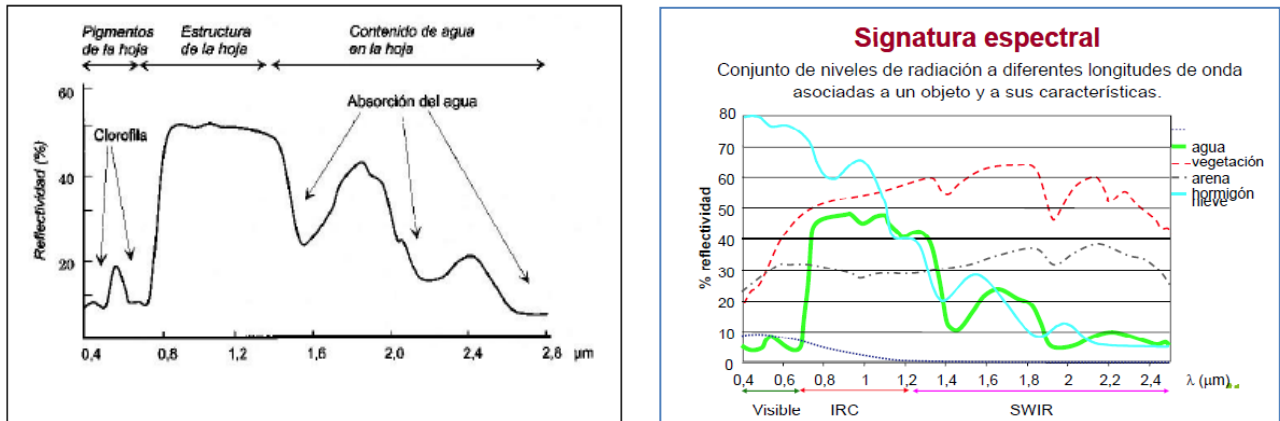
| INDICE DE VEGETACIÓN                           | DEFINICIÓN   | AUTOR Y AÑO                   |
|--|--|-------------------------------|
| Relación de índice de vegetación               | $RVI = \text{irc}/r$   | Pearson y miller (1972)       |
| Índice de diferencia normalizada de vegetación | $NDVI = \frac{\text{IRC}-R}{\text{IRC}+R}$                                 | Rouse <i>et al.</i> , 1974    |
| perpendicular índice de vegetación             | $PVI = \frac{\text{irc}-a}{r-b} \cdot \frac{r-b}{\sqrt{a^2+1}}$            | Richardson y Wiegand 1977     |
| Índice de vegetación ajustado al suelo         | $SAVI = \frac{\text{irc}-r}{\text{irc}+r+1}$                               | Huete (1988)                  |
| SAVI* transformado                             | $TSAVI = \frac{a(\text{irc}-a-r-b)}{r+a\text{irc}-a-b+\sqrt{1+a^2}}$       | Baret y Guyot (1991)          |
| SAVI modificado                                | $MSAVI = \frac{2\text{irc}+1-\sqrt{(2\text{irc}+1)^2-8(\text{irc}-r)}}{2}$ | Qi <i>et al.</i> , 1994       |
| SAVI optimizado                                | $OSAVI = \frac{\text{IRC}-R}{\text{IRC}+R+Y}$                              | Rondeaux <i>et al.</i> , 1996 |

\*las constantes a y b son, respectivamente, la pendiente y la ordenada en el origen de la línea de suelo  $\text{irc}_{\text{suelo}} = a \cdot r_{\text{suelo}} + b$ . r= rojo, irc= infrarojo cercano.

Según Gilabert *et al.*, 1997, la vegetación vigorosa muestra una reflectividad reducida en ciertas bandas visibles del espectro electromagnético, debido al efecto absorbente de los pigmentos de clorofilas, xantofilas y carotenos, pues éstas absorben la radiación de los 0.445 μm (445 nm), equivalente al rango de la banda 1 (Azul) del sensor Landsat . La clorofila presenta una segunda banda de absorción cercana a los 0.645 μm, correspondiente a la banda 3 (color rojo). Entre ambas porciones del espectro, aparece una banda intermedia, alrededor de los 0.55 μm (banda 2 del color verde), en donde el efecto absorbente es menor, mostrando así un máximo de reflectividad (Figura 1).

**Cuadro 3.-Combinación de bandas de los Sensores Landsat y su utilidad. Información tomada Docampo *et al.*, 2002.**

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Bandas 321 (RGB)              | Imagen de color real. Refleja el área tal como la observa el ojo humano en una fotografía aérea a color.  |
| Bandas 432, RGB (Falso color) | Tiene buena sensibilidad a la vegetación verde, los bosques coníferos se ven de color rojo más oscuro, los glaciares se ven de color blanco y el agua se ve de color oscuro debido a sus características de absorción.  |
| Bandas 741, RGB (Falso color) | Esta combinación de bandas es ampliamente utilizada en geología. Utiliza las tres bandas menos correlacionadas entre sí. La banda 7, en rojo, cubre el segmento del espectro electromagnético en el que los minerales arcillosos absorben, más que reflejar, la energía; la banda 4, en verde, cubre el segmento en el que la vegetación refleja fuertemente; y la banda 1, en azul, abarca el segmento en el cual los minerales con óxidos de hierro absorben energía. |
| Bandas 742, RGB (Falso color) | Permite discriminar los tipos de rocas. Ayuda en la interpretación estructural de los complejos intrusivos asociados a los patrones vulcano-tectónicos.   |
| Bandas 543, RGB (Falso color) | En esta combinación la vegetación aparece en distintos tonos de color verde.  |
| Bandas 731, RGB (Falso color) | Ayuda a diferenciar tipos de rocas, definir anomalías de color que generalmente son de color amarillo claro algo verdoso, la vegetación es verde oscuro a negro, los ríos son negros y con algunas coloraciones azules a celestes, los glaciares se ven celestes.   |



**Figura 1.- Comportamiento espectral teórico de la vegetación vigorosa.** Tomado de Molina (1984). El pico de reflectancia de la clorofila se da en el visible (0.445-0.645 μm). La vegetación presenta un segundo pico de reflectancia en el infrarrojo (B4 a la B7) en función del estado de salud de la hoja. La figura derecha indica la energía electromagnética asociada a otros componentes de la cobertura del suelo.

### 2.2.1 Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

Es un índice de vegetación bi-dimensional sugerido por Rouse *et al.*, (1974). Toma valores en el intervalo de -1.0 a +1.0, donde los negativos indican superficies de agua, nieve o nubes y, los positivos crecientes indican vegetación creciente. El suelo posee valores bajos, mientras la vegetación se encuentra entre 0.2 y 0.8, tales valores se obtienen mediante la siguiente ecuación (Bannari *et al.*, 1995):

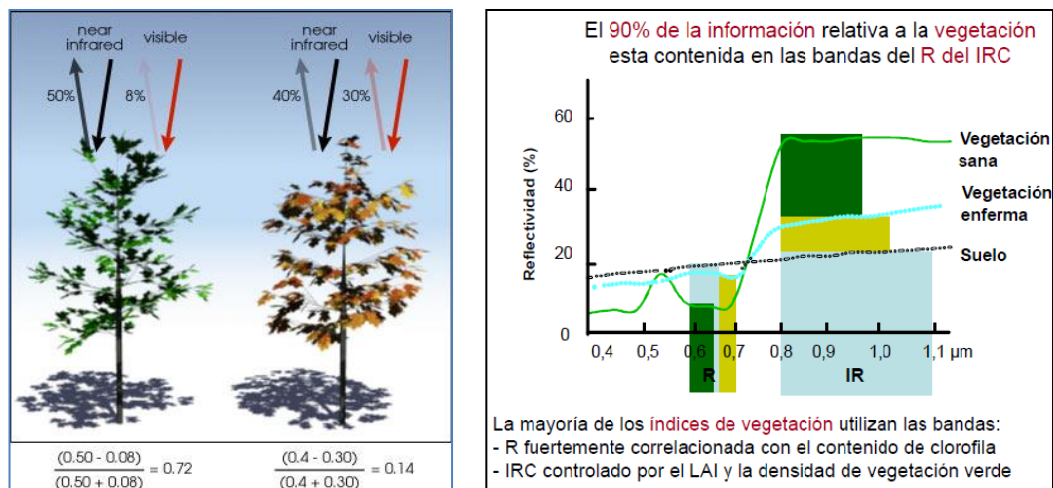
$$NDVI = \frac{b4 - b3}{b4 + b3}$$

Donde: b4= valor de reflectancia de la banda 4 y b3= valor de reflectancia de la banda 3. En general:

- a) NDVI<0= superficies sin vegetación, nieve, agua o nubes.
- b) 0<NDVI<0.2= suelo desprovisto, con poca vegetación. Vegetación senil o estresada
- c) 0.2<NDVI<0.8= vegetación verde, sana, buen contenido de clorofila.

El NDVI tiene gran valor ecológico, es un buen estimador de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (RFA) por sus siglas en ingles. Se fundamenta en el comportamiento de la vegetación en función de su espectro electromagnético frente a las radiaciones rojas e infrarrojas a través de métodos gráficos para estimar la separabilidad entre coberturas a través de firmas, dispersión espectral y diagramas de dispersión (Gilabert *et al.*, 1997). De acuerdo con Paruelo (2008), este índice permite monitorear diferentes indicadores de la dinámica entre la radiación y la vegetación terrestre, tales como promedio anual, estacionalidad, fenología, estabilidad y funcionamiento del ecosistema (Figura 2).

El funcionamiento del NDVI comienza cuando la luz del sol llega a la hoja y se inicia el proceso de fotosíntesis. Los cloroplastos contienen clorofila *a* y *b* y son los pigmentos más importantes de las plantas porque absorben la luz azul y roja. La clorofila *a* absorbe longitudes de onda de entre 0.43 y 0.66 micras y la clorofila *b* de 0.45 a 0.65 micras. Existen otros pigmentos en la hoja de las plantas usualmente ocultos por la clorofila. Los carotenos amarillos y xantofilas amarillo pálidas absorben fuertemente la longitud de onda del azul, los  $\beta$ -carotenos absorben a 0.45, las ficoeritrinas a 0.55 y las ficocianinas a 0.62  $\mu\text{m}$ . Debido a que la clorofila *a* y *b* presentes en los cloroplastos tienen una absorción similar en la banda del azul, tiende a dominar y ocultar el efecto de dichos pigmentos. Cuando una planta es senil o entra en estrés, el pigmento de la clorofila disminuye o desaparece, lo que permite que los carotenos y otros pigmentos dominen, alterando el espectro de absorción (Figura 2). Por lo tanto la absorción de la clorofila en un dosel representa una variable biofísica fundamental y útil para muchas investigaciones (Salisbury y Ross., 1994 y Jensen, 2007;)



**Figura 2.-Cálculo del NDVI y el Valor del Infrarrojo y Rojo Cercano.** Para determinar la densidad de verdor de la cubierta vegetal los investigadores deben observar el color que las plantas reflejan en distintas longitudes de ondas, que van del visible hasta el infrarrojo cercano que presenta una elevada reflectividad debido a la estructura celular interna de la hoja. Los pigmentos de las hojas de las plantas (clorofila) presentan una fuerte absorción en la luz visible que es usada para la fotosíntesis (longitudes de onda de 0.4 a 0.7  $\mu\text{m}$ ). Por otra parte, la estructura de las células de las hojas presentan una fuerte reflexión de la luz en el infrarrojo cercano (longitudes de onda de 0.7 a 1.1  $\mu\text{m}$ ). La fórmula del NDVI se ve expresada en la figura. La vegetación vigorosa se observa con un verde más fuerte y valor de NDVI mayor (0.7) en comparación con la vegetación senil o estresada con color verde-amarillo y NDVI menor (0.14). En la imagen derecha se representa la gráfica del porcentaje de reflectancia para la vegetación sana, estresada y suelo.

Fuente de la imagen:

CONAFOR:[http://148.223.105.188:2222/gjif/snif\\_portal/index.php?option=com\\_content&task=view&id=61&Itemid=69](http://148.223.105.188:2222/gjif/snif_portal/index.php?option=com_content&task=view&id=61&Itemid=69).



### 2.2.1.1 Estructura de la Clorofila.

Como ya se mencionó; las clorofilas se encuentran en los cloroplastos y están capacitadas para absorber luz visible durante la fotosíntesis. Poseen estructuras policíclicas planas, cuya posición central está ocupada por  $Mg^{2+}$  coordinado por cuatro átomos de N de la protoporfirina (Figura 3). Las clorofilas tienen una cadena lateral larga de fitol esterificado a un grupo carboxilo sustituyente del anillo IV. El sistema de cinco anillos heterocíclicos tiene una estructura poliénica extendida con enlaces sencillos y dobles alternantes que muestra una absorción fuerte en la región del visible del espectro. Absorben muy poco de la luz verde y verde amarilla (500 a 600  $\mu m$ ), pero absorben intensamente las longitudes de violeta, azul, anaranjado y rojo (Jensen, 2007).

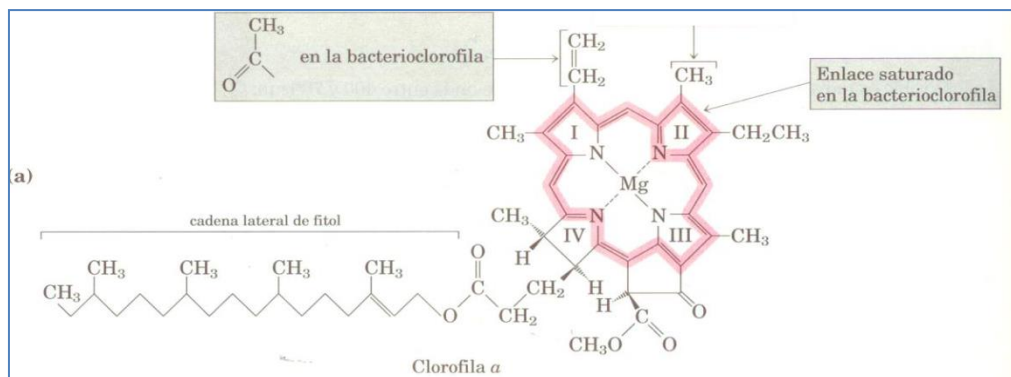


Figura 3.-Estructura de la clorofila. Tomada de Nelson y Cox, 2001.

### 2.3. Cobertura del Suelo.

La cobertura del suelo se define como la cubierta biofísica observada que cubre la superficie terrestre (Reyes *et al.*, 2006). Comprende una amplia gama de materiales con diferentes características, entre los que se encuentran los pastizales, bosques naturales, concreto, pavimento, metales, etc. La cobertura vegetal actúa como protectora y amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Las hojas y tallos, absorben parte de la energía lumínica, de la lluvia y del viento, de modo que su efecto es menor que si actuaran directamente sobre el suelo, mientras que los componentes subterráneos, como los sistemas radiculares, contribuyen a la resistencia mecánica del suelo (Anaya *et al.*, 1991).

La reflectividad de las coberturas del suelo están determinadas por las características ópticas y distribución espacial de todos sus constituyentes por lo que se necesita el uso de la teledetección (Gilbert *et al.*, 1997).

### 2.3.1 Mantillo del Suelo.

Entre la cobertura del suelo se encuentra el mantillo. Esta capa alude a todos los materiales orgánicos en diferentes estados de descomposición que descansan sobre la porción mineral del suelo, pero que no se hallan mezclados con ella. Por debajo de esta capa se haya el humus, mismo que se redefine como la capa superficial del suelo que se encuentra debajo del mantillo no desintegrado, pero no lo incluye (Duchaufour, 1975 y Pritchett, 1991).

### 2.4. Materia Orgánica del Suelo (MOS) y su Relación con el Suelo y Vegetación.

La MOS proviene de los restos de vegetación y organismos que mueren, junto con residuos metabólicos de los organismos vivos que dan origen a lo que se denomina humus. El contenido de MOS disminuye con la profundidad. Sin embargo, las excepciones más importantes se dan en suelos podsólicos y paleosuelos.

Entre las funciones más importantes de la MOS se encuentra la que le da un color oscuro al suelo, lo cual ocasiona mayor temperatura por que absorbe más radiación que en suelos sin cubierta vegetal. Tiene gran importancia en la génesis y protege al suelo de la erosión (Pritchett, 1991).

Según Bautista, (2009). La tasa de descomposición del mantillo y de la MOS ésta en función de la composición de la especie vegetal, misma que también influye en la calidad de sustrato orgánico.

Juega un papel importante en la agregación, capacidad de retención de agua e infiltración y muchas otras características del suelo (Anaya *et al.*, 1991). Es fundamental en los aspectos químicos del suelo y se vincula con su fertilidad, dado que determina el pH del suelo, que a su vez, ejerce influencia en la capacidad de intercambio de cationes y liberación de nutrimentos. Además, dicha liberación depende también de la temperatura, relaciones de aire y agua, textura y tipo de materiales orgánicos, entre otros. Por ejemplo, la tasa de liberación del nitrógeno se usa para estimar la cantidad de este elemento que puede ser proporcionada por el suelo (Bautista, 2009).

### 2.5. Relación de la Materia Orgánica con la Vegetación y con el Suelo.

Como ya se mencionó, la MOS es una de las reservas más importantes de nutrimentos para el suelo y las plantas (Peña, 2009). La degradación de los residuos de plantas y animales en el suelo constituye procesos biológicos y bioquímicos; en los cuales, el C es reciclado a la atmósfera como CO<sub>2</sub>, el N es

transformado a una forma aprovechable por las plantas como  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ ; además de otros elementos asociados como P, S y varios microelementos liberados en forma disponible para las plantas superiores. En ese proceso, parte del C es asimilado en los tejidos microbianos, y otra parte es convertido en sustancias húmicas estables (ácidos húmicos, fúlvicos y huminas). (Pritchett, 1991; Franzluebber, 2002; Sánchez *et al.*, 2005).

## 2.6. pH o Reacción del Suelo.

Es el resultado de complejos equilibrios fisicoquímicos que se da entre compuestos inorgánicos y orgánicos, así como entre procesos de descomposición y fenómenos de intercambio, sobre todo en relación con la actividad de la microflora edáfica que descompone la materia orgánica (Parisi, 1979). Sobre la humificación ejerce una acción directa que influye sobre la cantidad y calidad de humus; además, también interviene en el establecimiento de la población vegetal que sustenta el suelo y por lo tanto a la composición del material orgánico que va a ser luego transformado. El pH está determinado por el material original del suelo, clima con el que se formó éste, vegetación que crece en él y por el tiempo que ha pasado para desarrollarse. Los cambios drásticos en el pH del suelo y sus horizontes dan alguna pista sobre la historia del suelo en ese lugar (Bautista, 2009). El análisis del pH del suelo ha sido empleado, en el caso de la producción forestal, como criterio para fijar las necesidades nutrimentales de las plantas y determinar índices de sitio. La acidez de la mayor parte de los suelos forestales varía solo de manera ligera con los cambios estacionales (Bautista, 2009).

El pH y el nivel de fertilidad de un suelo determinado aumentan en la medida que lo hace el grado de saturación de bases y es consecuencia, no solamente del aumento cuantitativo en las bases del suelo, sino también de la facilidad con que las bases son liberadas por éste y absorbidas por las plantas. Pritchett, (1991) señala que el intervalo de pH de los suelos forestales va de 3.5 a 6.5. El pH adecuado para la mayoría de las especies arbóreas está entre 5.2 y 6.2. La mitad inferior de esta escala parece ser mejor para las coníferas, en tanto que muchos árboles caducifolios crecen bien en un pH de 5.8 a 6.2. Estos intervalos corresponden en consecuencia a la mejor disponibilidad de nutrimentos que son considerados como esenciales para las especies forestales.

## 2.7. Elementos Esenciales.

En presencia de luz, las plantas son capaces de consumir agua, CO<sub>2</sub> y elementos minerales para elaborar su alimento, pero no todos ellos son esenciales para su existencia y bienestar. Los elementos que las plantas requieren para completar sus ciclos vegetativos y reproductivos se llaman elementos esenciales. El C, H y O se obtienen a partir del CO<sub>2</sub> y del H<sub>2</sub>O. Por medio de la fotosíntesis se convierten en carbohidratos simples y con el N, P, y S, forman aminoácidos, proteínas y protoplasma. Existen 17 elementos que son esenciales para el crecimiento de las plantas y que se diferencian en macro y micronutrientes. Entre los macronutrientes se encuentran el B, Ca, Cl, Mg, K, N, P y S, en tanto que los micronutrientes son Fe, Co, Cu, Mn, Mo, Si, Na, V y Zn (Bautista, 2009). Estos son absorbidos por las plantas a través de intercambios iónicos que dependen del pH (Pritchett, 1991).

## 2.8. Suelo.

El suelo puede ser definido como un cuerpo natural, con una mezcla variable de minerales desmenuzados y modificados atmosféricamente, junto con materia orgánica en desintegración y que proporciona soporte mecánico y sustento para la biota en general (Pritchett, 1991). Sirve como hábitat para macro y microorganismos; es donde se intercambian y fijan sustancias nutritivas, y participa como componente fundamental de los factores físicos del ambiente en estrecha interacción con la hidrósfera, atmósfera y litósfera en el ecosistema (Velázquez *et al.*, 2007; Etchevers *et al.*, 2000).

Está formado por material mineral y orgánico no consolidado, que representa el 38 y 12% respectivamente, sumando el 50% de la fase sólida que está presente en los suelos; además, se encuentra una fase líquida (25%) y otra gaseosa (25%); esta última puede variar dependiendo de la primera, por lo que se le considera como un cuerpo trifásico (Peña, 2009).

### 2.8.1. Propiedades del Suelo.

De acuerdo con Parisi (1979) y Morgan y López (1996;), entre las diversas propiedades se encuentran: Físicas (Densidad Aparente, Densidad Real, %Espacio Poroso, Estructura y Color), Químicas (pH activo y potencial, Materia Orgánica del Suelo, Capacidad de Intercambio Catiónico, Conductividad Eléctrica, Nitrógeno total, Fósforo total y disponible), Bioquímicas (enzimas, evolución de CO<sub>2</sub>, Carbono en Biomasa Microbiana, entre otras) y Biológicas (Unidades Formadoras de Colonias, Diversidad edáfica, etc.).

El intemperismo químico sobre el material de origen puede influir en la distribución y desarrollo de la vegetación forestal debido a los cambios en acidez, contenido de bases y la disponibilidad de los nutrientes relacionados con la intensidad de dicho fenómeno. Todos estos factores se relacionan con la capacidad de almacenamiento de agua, su aprovechamiento y la existencia de los diversos tipos de bosques (Lutz y Chandler, 1946; Pritchett, 1991; Parisi, 1979; y López, 2009).

### 2.9. Análisis Estadístico.

#### 2.9.1.-Correlación Simple de Pearson.

Un coeficiente de correlación es significativo si se afirma, con cierta probabilidad, que es diferente de cero. Se dice que la correlación entre dos variables  $X$  e  $Y$  es positiva cuando en la medida que aumenta una de ellas lo hace la otra. Esto sucede cuando la relación entre ambas variables es funcionalmente exacta. Por el contrario, se dice que la relación es negativa cuando en la medida que aumenta una variable disminuye la otra. El coeficiente de correlación de Pearson es un índice cuyos valores absolutos oscilan entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 mayor será la correlación, y menor cuanto más cerca de cero. Una correlación es efectiva si es distinta de cero. Pero una correlación significativa no necesariamente ha de ser una correlación fuerte; simplemente es una correlación diferente de cero. O en otros términos, es una correlación que es poco probable que proceda de una población cuya correlación es cero.

Una vez calculado el valor del coeficiente de correlación interesa determinar si tal valor obtenido muestra que las variables  $X$  e  $Y$  están relacionadas en realidad o tan solo presentan dicha relación como consecuencia del azar (Márquez de Cantú, 1988; Reyes, 1990).

### 2.9.2.-Análisis de Varianza

El análisis de la varianza (o Anova: Analysis of variance) Es una técnica estadística diseñada para medir si existen diferencias entre los valores medios de una variable dependiente calculados para los distintos grupos que se pueden obtener con otra variable independiente y nominal (Abraira y Pérez, 1996 y Allen 2005).

En el caso de que la variable independiente tuviera solo dos alternativas, sería suficiente aplicar un test T de diferencia de medias.

La variable o variables independientes, reciben el nombre de Factor y debe ser variables de tipo nominal, y sus distintos valores el de tratamientos, mientras que la variable dependiente debe ser métrica, puesto que sobre ella se debe calcular los valores medios objetos del análisis de la varianza.

La hipótesis nula a contrastar es que se consideran iguales las medias en todos los grupos, o lo que es lo mismo, no existen diferencias entre las medias obtenidas para cada uno de los grupos formados por la variable independiente o factor.

Se rechaza la hipótesis nula con que al menos una de las medias sea significativamente diferente de las demás

### 3. JUSTIFICACIÓN.

Una de las bases fundamentales para hacer una planeación correcta del manejo de la vegetación y el suelo, es el conocimiento del uso y estado actual de ellos, ya que sufren constantes cambios.

Ambos componentes terrestres han sido tradicionalmente evaluados por interpretación en fotografías aéreas; sin embargo, en años recientes el desarrollo de los sensores remotos ha facilitado nuevos métodos basados en interpretación de imágenes de satélite y el uso de equipo computarizado.

La teledetección ofrece mayor rapidez y confiabilidad en la generación de cartografía, ya que sus técnicas permiten la colección de datos a distancia, lo que trae como ventaja un ahorro en tiempo y dinero, dado que abarca grandes extensiones de superficie.

Una de sus fortalezas radica en el monitoreo de los sistemas terrestres para detectar perturbaciones ocasionadas por plagas, deforestación, estrés hídrico y nutrimental, que producen cambios en su espectro de absorción.

Los suelos y la vegetación del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl han sido perturbados por actividades agrícolas y ganaderas que traen como consecuencia la degradación de sus componentes.

Por lo tanto, el presente trabajo pretende aportar conocimiento del estado que guardan las especies de coníferas (*Pinus* spp. y *Abies religiosa*) y los suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl mediante el uso de imágenes satelitales, índice de vegetación y la relación de éstos con el pH, MOS y porcentaje de N y Mg en tejido foliar, mantillo y suelo.

#### 4. HIPÓTESIS.

Un pH cercano a la neutralidad favorece la disponibilidad de nutrimentos a la biota, razón por lo que las especies de *Pinus* y de *Abies religiosa* desarrolladas sobre suelos menos ácidos tendrán mayor porcentaje de N y Mg foliar, y en consecuencia mayor valor de vigor de la vegetación, además de corresponderse con sitios mejor conservados y con mayor volumen de madera, MOS, N total y Mg intercambiable.

#### 5. OBJETIVOS.

Establecer la relación entre el porcentaje de N y Mg foliar de las especies de *Pinus* y *Abies religiosa* (H. B. K.) *et* Cham y Schlecht con parámetros químicos del suelo e Índice de Vegetación (NDVI) en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

##### 5.1 Particulares.

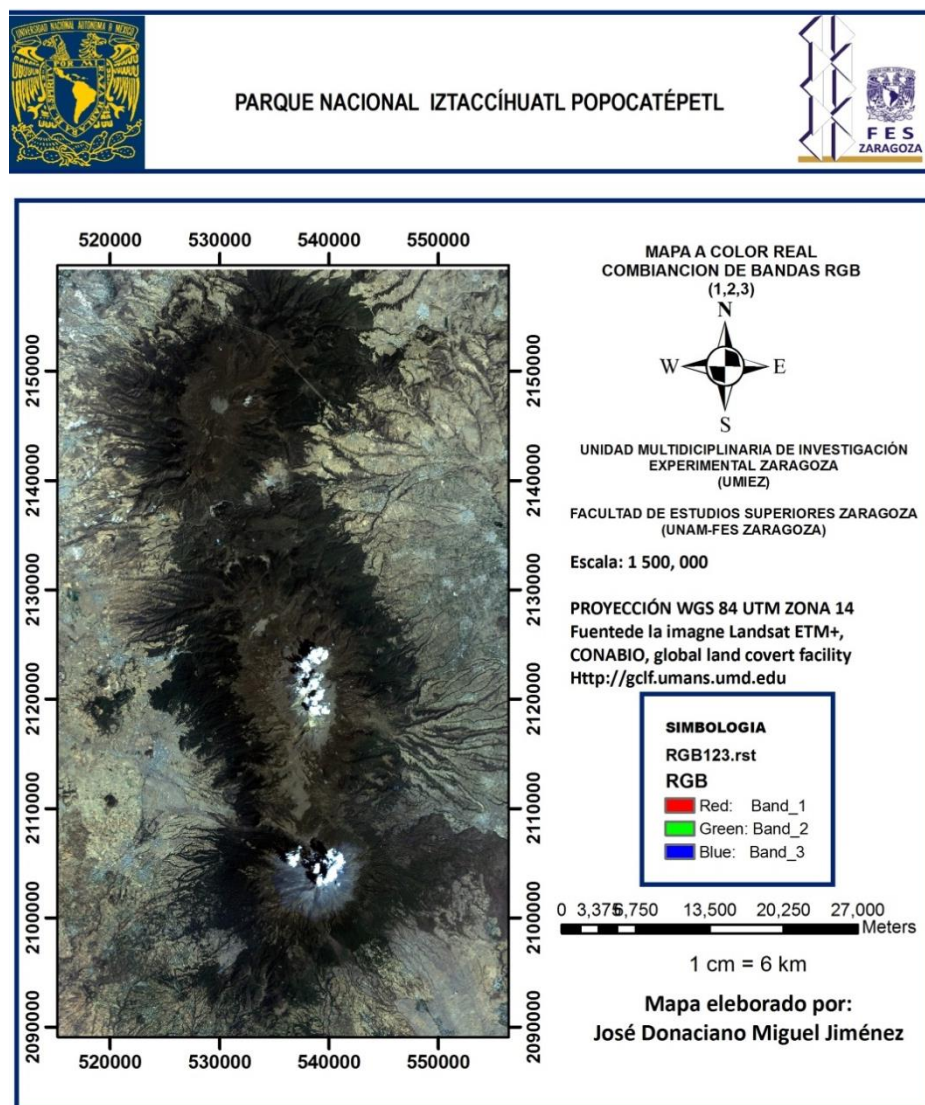
- Obtener el índice de vegetación (NDVI) con imágenes Landsat ETM+ del año 2000.
- Conocer los valores de pH de los suelos de diferentes sitios y establecer su relación con el valor de NDVI.
- Comparar el contenido de materia orgánica, nitrógeno total y magnesio intercambiable con el Índice de Vegetación y conocer su relación.
- Establecer la relación entre el contenido de Mg y N foliar con el índice de vegetación.



## 6.-METODOLOGÍA

### 6.1.-Área de Estudio.

La presente investigación se realizó en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNIP), ubicado en la parte central del eje Volcánico Transmexicano, en las coordenadas geográficas 18° 59' y 19° 25' 45" latitud N y 98° 38' 58" y 98° 52' 58" longitud W. El PNIP ocupa parte de las Sierras Nevada al sur y Río frío al Norte, tiene una superficie de 45,097 hectáreas, distribuidas en 25,679 para Izta-Popo y 19,418 para Zoquiapan. En el PNIP sobresalen los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, que representan a la tercera y segunda cumbres más elevadas del país (Figura 4).



Sus geoformas son de origen volcánico, con rocas ígneas tipo basalto y andesita. El rango altitudinal varía de 1,700 a 5,450 m snm, que corresponde esta última a la cumbre del volcán Popocatepetl (Obieta y Sarukhán, 1981). El origen del volcán se remonta al Oligoceno Superior-Mioceno, aunque es durante el Plioceno Medio y Superior cuando se define su configuración actual (White, 1962; Lorenzo, 1969). Su litología está dominada por toba, andesitas, basaltos y dacitas (Mooser *et al.*, 1996). El último período de actividad del volcán se estima que fue hace unos 25000 años, anterior al último período glaciario (Mooser, 1975). Sobre los materiales comentados se han depositado cenizas de las cinco últimas erupciones del Popocatépetl; con una edad estimada de entre 400 hasta 25000 años la más antigua (Werner, 1978). La cumbre del volcán Popocatépetl está influida por procesos glaciares y periglaciares, pendiente del terreno, materiales no consolidados y cobertura vegetal escasa o ausente. Edafológicamente, los suelos dominantes son andosoles, litosoles y regosoles (Kneib *et al.*, 1973; Arriaga *et al.*, 2000). A lo largo del gradiente altitudinal, la vegetación se dispone en un patrón de pisos con bosques de encino hasta 2800 m snm, oyamel (*Abies religiosa*) y mixtos (*Quercus spp.*, *Pinus spp.*, *Abies religiosa* y *Alnus jorullensis*) hasta 3400 m snm, bosques de *Pinus hartwegii* de 3200 a 4100 m snm (límite de la vegetación arbórea), y zacatonal hasta 4400 m snm (Troll, 1971; Rzedowski, 1978; Azcárate *et al.*, 2003; Escamilla, 2007). La zona está marcada por un régimen típico de alta montaña tropical, con oscilaciones térmicas entre el día y la noche durante el año, en contraste con las temperaturas medias mensuales situadas entre 3 y 4°C (Lauer, 1973; Lauer y Klaus, 1975). La isoterma de 5°C se ubica a 4000 m snm; el mes más frío es febrero y el más caliente abril. El régimen pluviométrico muestra una marcada estacionalidad, típica de zonas tropicales del hemisferio norte, con período lluvioso entre mayo y octubre y otro seco entre noviembre y abril. Los registros máximos se logran alrededor de 3300 m, con 1400 mm de pp, que tiende a decrecer con la altitud (Lauer y Klaus, 1975). Según García (2004), por encima de 4000 m snm se registra un clima frío subhúmedo de alta montaña tipo E(T)HC ( $w_2$ ) y por debajo de ésta se presenta un clima tipo (Cb')( $w_2$ )( $w$ )ig semifrío subhúmedo (Hernández y Granados; 2006, Giménez *et al.*, 2009).

## 6.2.-Trabajo de Campo.

Del análisis edafológico y foliar se estudiaron 77 sitios distribuidos de 2580 a 4100 m snm del año 2001 al 2005. El estudio también incluyó datos realizados a 27 sitios más, visitados del año 2011 a la fecha para validar el índice de vegetación. Todos los sitios representaron un área aproximada de 10.4 ha y fueron localizados con ayuda de la imagen landsat y con cartas topográficas y edafológicas escala 1:50,000 (E14-B41) y (E14-B42) denominada Chalco y (E14-B51) y (B14-B52) denominada Zoquiapan, editadas por el Instituto Nacional de Estadística Geográfica e informática (INEGI), correspondientes al año 2000 del mes de marzo .

Para ubicar los sitios en campo, se realizaron recorridos descendentes a partir del límite de la vegetación arbórea, donde se eligieron lugares con bosques de *Pinus* y de *Abies religiosa* bajo el criterio de presentar una estructura lo menos perturbada posible por actividad humana, y también a aquellos sitios con bosques limítrofes a cultivos y zonas alteradas por caminos, tala o incendios.

En cada sitio se delimitó un cuadrante de 50x20m perpendicular a la pendiente, donde se tomaron datos de ubicación geográfica en sistema de coordenadas UTM NAD27 con GPS marca Garmin. Los atributos del relieve (exposición, porcentaje de pendiente y forma del terreno) se tomaron con ayuda de clisímetro y brújula y la caracterización ecológica se obtuvo mediante la estructura de la vegetación según lo establecido por Romahn *et al.*, (1994).

Para validar el índice de vegetación obtenido de las imágenes Landsat ETM+ de marzo del año 2000, se eligieron cuatro sitios con muy alto vigor y cuatro sitios más con muy bajo vigor. Estos sitios fueron visitados y se les hizo una caracterización ecológica, además de tomar datos dasométricos (altura, cobertura, diámetro a la altura del pecho, densidad de individuos y porcentajes de plaga en la cobertura de los árboles). El volumen de madera se obtuvo mediante el diámetro a la altura del pecho (1.3 m), tomado con cinta métrica y la altura se estimó con lo descrito a continuación:

a) La lectura se tomó a partir de la visual horizontal del observador entre la base y el ápice del árbol. En este caso la altura del árbol fue:  $H = OC (\tan \alpha + \tan \beta)$ : Donde: H = altura del árbol en metros (distancia AB), OC = distancia horizontal al árbol en metros,  $\alpha$  = ángulo del observador al ápice del árbol,  $\beta$  = ángulo del observador a la base del árbol (Romahn *et al.*, 1994).

b) La visual horizontal del observador arriba del ápice del árbol. En este caso la altura del árbol fue:  $H = OC ( \tan \beta - \tan \alpha )$  : Donde: H = altura del árbol en metros (distancia AB), OC = distancia horizontal al árbol en metros,  $\alpha$  = ángulo del observador al ápice del árbol,  $\beta$  = ángulo del observador a la base del árbol.

c) La visual horizontal del observador debajo la base del árbol.  $H = OC ( \tan \alpha - \tan \beta )$  : Donde: H = altura del árbol en metros (distancia AB), OC = distancia horizontal al árbol en metros,  $\alpha$  = ángulo del observador al ápice del árbol,  $\beta$  = ángulo del observador a la base del árbol.

Así mismo, durante los recorridos de validación, se ubicaron sitios con diferente actividad y grado de perturbación para comparar la lectura de la imagen de satélite.

La obtención de muestras foliares se realizó al azar en por lo menos 4 individuos de cada especie, de los que se recolectaron fascículos de las hojas más recientes localizadas en los cuatro puntos cardinales del tronco. Para la toma de muestras procedentes de alturas hasta 3 metros, éstas se recolectaron con tijeras para jardinería, y las ramas ubicadas a mayor altura se obtuvieron con cuerdas con contrapeso para sujetarlas y tomar la muestra.

Las muestras de mantillo se obtuvieron con ayuda de una pala para jardinería y se delimitaron en cada sitio cuatro cuadrantes de 0.25 m X 0.25 m seleccionados al azar. La colecta se llevo a cabo hasta la profundidad correspondiente al horizonte Ao. De las muestras obtenidas se hizo una muestra compuesta *in situ* y se guardó en bolsas de papel estraza del #14 previamente etiquetadas con datos del sitio.

De las muestras de suelo, se recolectaron aleatoriamente al menos cuatro muestras (0-0.2m de profundidad), posteriormente se hizo una muestra compuesta en el lugar y se almacenaron en bolsas de plástico tipo Ziploc previamente etiquetadas para su transporte al laboratorio y determinar características físicas y químicas.

### 6.3.-Trabajo de Laboratorio.

A las muestras de mantillo se les tomo el peso inicial y se secaron en una estufa a 75 °C hasta peso constante, se molieron en un molino marca General Electric modelo 5KH39QN5525A con tamiz de 2 mm, se almacenaron en sobres de papel y después en frascos de polietileno hasta su análisis químico

para determinar magnesio por digestión diácida (nitrógeno-porcelánica) y espectrometría de absorción atómica (Allan, 1971); y nitrógeno por digestión semimicro-Kjeldhal (Bremmer, 1965).

Al igual que el mantillo, a las muestras foliares se les tomo el peso inicial y se pusieron a secar en bolsas de papel estraza a una temperatura de entre 65 y 70 °C hasta peso constante. Después se molieron en un molino General Electric modelo 5KH39QN5525A con tamiz de 2 mm (Figura 5). Posteriormente, el N se determinó por digestión semimicro-Kjeldhal (Bremmer, 1965) y el Mg por digestión diácida (nitrógeno-porcelánica) y espectrometría de absorción atómica (Allan, 1971).

Las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente y se tamizaron en malla de 2 mm para obtener muestras finas. Luego se almacenaron en frascos de polietileno para análisis físicos y químicos, entre ellos: pH activo (suelo-agua relación 1:2) y potencial (en solución salina de KCl 1N relación 1:2, Jackson, 1964), porcentaje de materia orgánica (Walkley y Black, 1934, citados en Jackson, 1964), porcentaje de Nitrógeno total por el método semimicro-kjeldahl (Bremmer, 1965) y extracción de Mg con  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  1N pH 7 y cuantificación por absorción atómica y fotometría de llama (Chapman, 1965).



Figura 5.-Tratamiento de Muestras Foliares.

## 6.4.-Trabajo de Gabinete.

Los resultados de laboratorio se capturaron en hojas de cálculo para integrar la base de datos georeferenciada con valores de pH activo y potencial, porcentaje de MOS, N total y Mg intercambiable del suelo, además de los porcentajes de N y Mg en tejido foliar y mantillo y el valor de vigor de la vegetación (NDVI) de cada sitio. Los resultados fueron analizados estadísticamente con correlación simple de Pearson y análisis de varianza (ANDEVA) para encontrar tendencias y diferencias significativas entre las variables mencionadas.

Las imágenes del satélite Landsat ETM+ del año 2000, con resolución espacial de 30m, fueron obtenidas de la página electrónica de la Global Land Covert Facility. Las imágenes de origen se llevaron a un sistema de información geográfica (SIG), donde se georreferenciaron en proyección NAD 27 y se les realizó un recorte para delimitar la zona de estudio. Posteriormente, a las imágenes de las bandas 1, 2, 3 y 4 se les realizó una corrección atmosférica para minimizar la dispersión de partículas que afectan a los valores radiométricos (Chávez 1988). Si se observa la imagen del histograma de la Figura 6 (Izquierda), se nota que sus valores no comienzan en cero en el eje de las x, lo cual indica un nivel de dispersión de la información radiométrica. Según Fernández y Piñeiro (2008) y García y Pérez (2001), para corregirlo, con el SIG se restó el valor mínimo a los valores de cada pixel de toda la imagen (Figura 6, derecha).

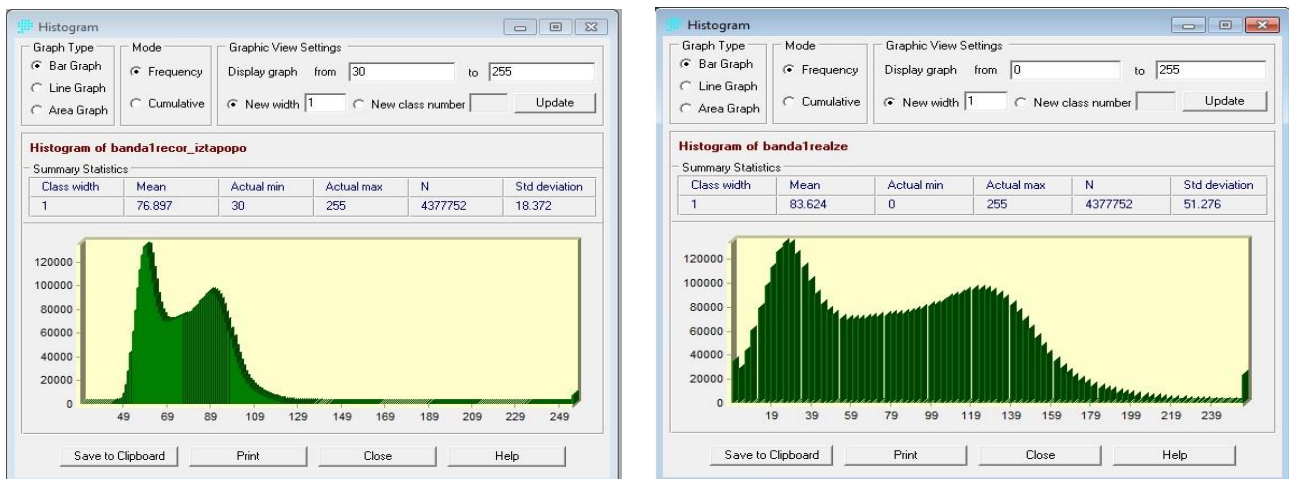


Figura 6.-Histograma banda 1, sin corrección atmosférica (izquierda) y con corrección atmosférica (derecha).

Las imágenes corregidas atmosféricamente fueron convertidas a lenguaje binario y llevadas a valores de 0-255 bits. Posteriormente, a las imágenes se les realizó un realce para mejorar el contraste de cada una, que consistió en, de acuerdo al histograma, identificar el valor de pixel que presentó un

cambio considerable; por ejemplo, en la imagen de la Figura 7 se presenta la banda 1 y sus intervalos de clases fueron de 0 a 112, donde la clase 29 con un valor en el histograma de 188595, se le resto al valor de pixel (Clases) más alto de la imagen y se dividió entre el número máximo  $(112-42)/112=0.63$ , por ultimo se realizo un stretch, donde se alineo la saturación a cada extremo restandole el valor obtenido.

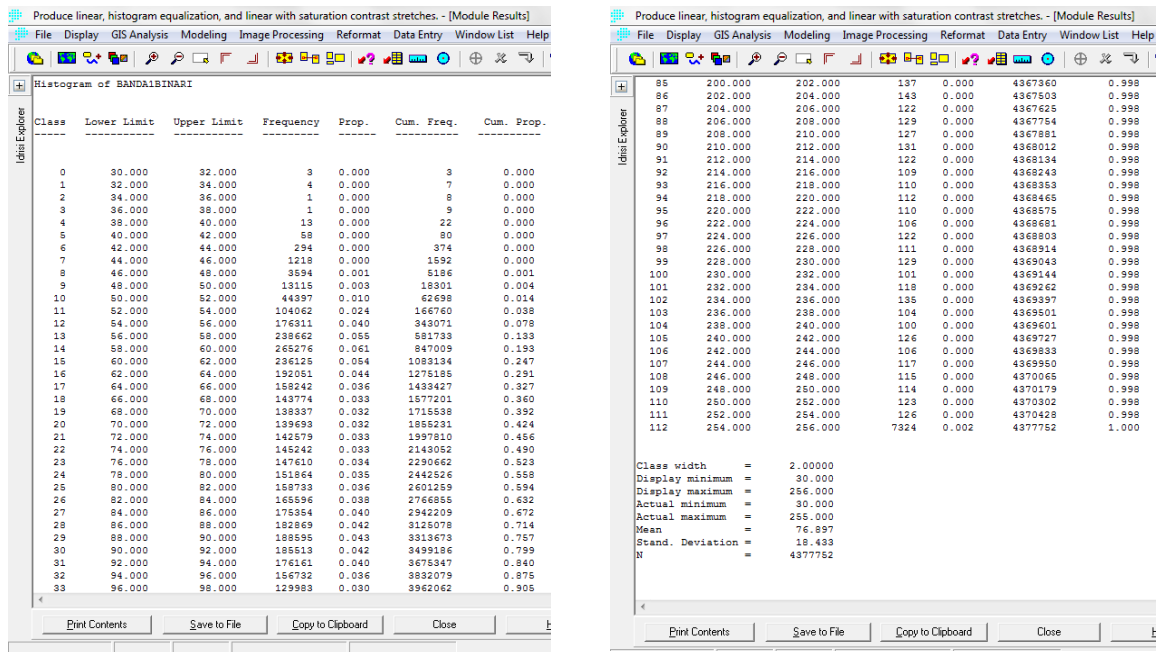


Figura 7.-Realice del histograma

Las composiciones de color consistieron en formar nuevas imágenes al combinar al menos tres bandas, cada una de ellas en el cañón del monitor de la computadora que corresponde a los tonos primarios (azul, verde o rojo). Como ejemplo, la imagen a color real (Figura 4) se realizó para observar la escena tal y como la observa el ojo humano y fue el resultado de la combinación de las bandas 3 (color rojo), 2 (color verde) y 1 (color azul) (Docampo *et al.*, 2002; López *et al.*, 2008). Las composiciones en falso color se realizaron para resaltar algún rasgo que permitiera identificar y distinguir con mejor detalle algún componente de la escena en color real. Así, como se puede observar en el Anexo, se obtuvieron imágenes en color real (combinación de bandas 321, Figura 4), falso color (combinación de bandas 432, Imagen 1 Anexo) y vigor de la vegetación (Figura 10 e Imagen 2 Anexo).

Respecto del vigor de la vegetación, la imagen se obtuvo con la banda 3, que corresponde al rojo (R) y con la banda 4, perteneciente al infrarrojo cercano (NIR) de acuerdo con la siguiente expresión (Alcaraz *et al.*, 2008):

$$\text{NDVI (vigor)} = (\text{banda 4} - \text{banda 3}) / (\text{banda 4} + \text{banda 3}).$$

Tal expresión dió como resultado valores de -1 a 1, donde valores negativos indicaron zonas sin o muy poca vegetación y hacia valores positivos, entre más cercanos a 1 el vigor de la vegetación aumentó (Rodríguez *et al.*, 2004).

La imagen de vigor de la vegetación fue llevada a un SIG, donde se le sobrepuso la base de datos obtenida del análisis de laboratorio. En la base de datos, cada renglón representó a un sitio y las columnas a sus atributos (valores de suelo, mantillo, foliar, etc.). En la imagen, cada pixel representó un valor de vigor de la vegetación. Así, al sobreponer los datos en la imagen, cada sitio dentro del pixel tuvo un valor de vigor.

La validación de la imagen del vigor de la vegetación se realizó con ayuda de imágenes en color real y falso color, además de imágenes de Google Earth, fotografías aéreas escala 1:30,000 del año 1981 editadas por INEGI y cartas topográficas y de uso de suelo y vegetación, junto con el trabajo de campo. Al validar la imagen del vigor de la vegetación, se establecieron clases de vigor y así se pudieron clasificar los sitios con vigor bajo, medio y alto.

Posteriormente, en campo se realizó un recorrido descendente a partir del límite de la vegetación arbórea para identificar sitios que en la imagen tuvieron una clase de vigor alto, medio o bajo, y observar si lo que produjo la imagen correspondía con lo que se veía físicamente. En los sitios visitados se evaluaron la productividad forestal y se realizó la descripción ecológica ya mencionada.

Cada sitio se nombró con referencia a algún atributo físico (rasgo ecológico, orientación de un sitio con respecto a otro, etc.), o con base en la cartografía de la zona. Así, los nombres se refirieron de la siguiente forma:

- **F.-** Indica el sitio donde se presentó un bosque con al menos dos especies.
- **D.-** Señala el sitio en el que se observó algún tipo de disturbio (Tala, incendio, agricultura, infraestructura urbana).
- **O.-** Sitio donde la especie **A. religiosa** domino el dosel.
- **N, S, E, W.-** Se refiere a la orientación geográfica de un sitio con respecto a otro.
- Además de números consecutivos.



## 7.-RESULTADOS.

### 7.1.- Vegetación.

Durante el recorrido de campo se observaron bosques de *Pinus* (pino), *Abies religiosa* (oyamel), *Cupressus sp.* (Cedro), *Quercus* (Encino); además de pastizal y cultivos de avena los cuales pueden observarse en el Cuadro 4.

Cuadro 4.- Descripción de la zona de estudio.

| ID | LOCALIDAD                          | COORDENAS UTM<br>NAD 27 |         | ALTITUD | ANP | PENDIENTE | EXPOSICIÓN | VEGETACIÓN | *UNIDADES<br>DE SUELOS |
|----|------------------------------------|-------------------------|---------|---------|-----|-----------|------------|------------|------------------------|
|    |                                    | X                       | Y       |         |     |           |            |            |                        |
| 1  | 26                                 | 518085                  | 2142330 | 2580    | 2   | 22.5      | S          | 6          | Q                      |
| 2  | W de D 14                          | 529032                  | 2101200 | 2650    | 1   | 35        | W          | 5          | M5                     |
| 3  | W-D14                              | 528925                  | 2101465 | 2650    | 1   | 19        | N          | 8          | M5                     |
| 4  | Cuiloxochitla                      | 527927                  | 2114839 | 2710    | 1   | 10        | S          | 7          | M4                     |
| 5  | 29                                 | 522227                  | 2140551 | 2722    | 2   | 10        | S          | 7          | M3                     |
| 6  | D 14                               | 529850                  | 2101950 | 2800    | 1   | 20        | W          | 5          | D3                     |
| 7  | 2_3                                | 540977                  | 2132834 | 2800    | 2   | 5         | SE         | 2          | M2                     |
| 8  | D 3                                | 530240                  | 2108542 | 2832    | 1   | 16        | NE         | 1          | I3                     |
| 9  | Barranca Apapaxo                   | 532177                  | 2094455 | 2834    | 1   | 60        | NW         | 1-5        | D3                     |
| 10 | 18                                 | 522168                  | 2143256 | 2850    | 2   | 66        | NW         | 1-7        | M3                     |
| 11 | NW de Texola                       | 538309                  | 2139414 | 2876    | 2   | 33        | N          | 9          | M2                     |
| 12 | Pasiontitla                        | 530800                  | 2114850 | 2900    | 1   | 35        | W          | 6-7-8      | I3                     |
| 13 | 25                                 | 522985                  | 2142335 | 2900    | 2   | 25        | NW         | 8          | M3                     |
| 14 | O 17                               | 530582                  | 2112415 | 2918    | 1   | 42        | S          | 5-8        | I3                     |
| 15 | O 18                               | 531440                  | 2112175 | 2932    | 1   | 80        | NE         | 1          | I2                     |
| 16 | La Papa Acatzi                     | 546875                  | 2121540 | 2964    | 1   | 15        | SE         | 5-6        | M1                     |
| 17 | D 11                               | 532240                  | 2107789 | 2965    | 1   | 4         | W          | 1          | D3                     |
| 18 | D11 Cañada La Coquia               | 532792                  | 2107890 | 2965    | 1   | 25        | SW         | 1-3        | D3                     |
| 19 | Las Anomias                        | 531400                  | 2115570 | 3000    | 1   | 25        | W          | 1          | I2                     |
| 20 | 24                                 | 523629                  | 2141260 | 3000    | 2   | 47        | SW         | 8          | M3                     |
| 21 | 35                                 | 522597                  | 2149404 | 3000    | 2   | 37.5      | NW         | 1          | M3                     |
| 22 | Cañada Atlapulco                   | 524251                  | 2149554 | 3003    | 2   | 35        | NE         | 1-11       | L                      |
| 23 | Sn Miguel Tlaxpan                  | 524968                  | 2150047 | 3066    | 2   | 55        | E          | 11         | M3                     |
| 24 | 11                                 | 525026                  | 2136222 | 3086    | 2   | 20        | W          | 9          | M3                     |
| 25 | Sur de el salto                    | 534478                  | 2096137 | 3099    | 1   | 8         | NW         | 1-6        | D3                     |
| 26 | 17                                 | 537794                  | 2146105 | 3100    | 2   | 14        | N          | 5          | L                      |
| 27 | 23                                 | 524358                  | 2141569 | 3100    | 2   | 10        | SW         | 6          | M3                     |
| 28 | La ventana                         | 544221                  | 2109851 | 3127    | 1   | 16        | E          | 8-10       | C1                     |
| 29 | 7                                  | 528594                  | 2137425 | 3150    | 2   | 13.7      | SE         | 9          | L                      |
| 30 | 1                                  | 534887                  | 2141723 | 3155    | 2   | 40        | SE         | 1-7-8      | L                      |
| 31 | 14                                 | 528614                  | 2136185 | 3182    | 2   | 17.5      | SW         | 5-8        | K2                     |
| 32 | O 16                               | 532250                  | 2102150 | 3225    | 1   | 55        | S          | 1          | C1                     |
| 33 | O16                                | 531169                  | 2100270 | 3225    | 1   | 55        | W          | 1          | D3                     |
| 34 | D2 4                               | 532351                  | 2106898 | 3228    | 1   | 20        | SW         | 1          | D3                     |
| 35 | Punto 8                            | 532419                  | 2115364 | 3231    | 1   | 65        | NE         | 1-3        | I2                     |
| 36 | O 1                                | 533236                  | 2108833 | 3250    | 1   | 65        | S          | 1-5        | C1                     |
| 37 | Suereste barranca Tlalquecotchootl | 543181                  | 2114683 | 3281    | 1   | 45        | SE         | 1-3-10     | C1                     |
| 38 | O1 San Pedro                       | 533405                  | 2108985 | 3286    | 1   | 60        | SW         | 1          | C1                     |
| 39 | F 1                                | 533304                  | 2111309 | 3288    | 1   | 30        | W          | 4-8        | C1                     |
| 40 | O 2                                | 533500                  | 2109750 | 3300    | 1   | 35        | W          | 1          | C1                     |
| 41 | Cruce el 8                         | 532250                  | 2115850 | 3300    | 1   | 25        | SW         | 1          | I1                     |
| 42 | Valle                              | 530838                  | 2126706 | 3301    | 1   | 24        | NW         | 1-7        | K1                     |
| 43 | Norte barranca mata leones         | 536262                  | 2097553 | 3312    | 1   | 20        | S          | 1-4        | C1                     |
| 44 | Agua escondida                     | 542286                  | 2110002 | 3333    | 1   | 60        | E          | 5-7        | C1                     |
| 45 | O 15                               | 533082                  | 2106584 | 3336    | 1   | 44        | N          | 1          | D3                     |

Cuadro 3.- *Abies religiosa* 1; *avena* 2; *Cupressus sp.* 3; *P. hartwegii* 4; *P. montezumae* 5; *P. patula* 6; *P. teocote* 7; *P. pseudostrobus* 8; *pinus sp* 9; *P. ayacahuite* 10, *Quercus* 11. ANP= Área Natural protegida 1= Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y 2= Parque Nacional Zoquiapan y Anexa. Los sitios van ordenados de menor a mayor altitud. Las unidades de suelo se describen en el cuadro 5. \* Miehlich (1980). ID=Número del sitio

Cuadro 4.- (Continuación) Descripción de la zona de estudio.

| ID | LOCALIDAD                          | COORDENADAS UTM<br>NAD 27 |         | ALTITUD | ANP | PENDIENTE | EXPOSICIÓN | VEGETACIÓN | *UNIDADES<br>DE SUELOS |
|----|------------------------------------|---------------------------|---------|---------|-----|-----------|------------|------------|------------------------|
|    |                                    | X                         | Y       |         |     |           |            |            |                        |
| 46 | D 5                                | 532932                    | 2106452 | 3390    | 1   | 26        | W          | 1          | D3                     |
| 47 | O1 3                               | 533785                    | 2111786 | 3398    | 1   | 60        | SE         | 1          | C1                     |
| 48 | La venta                           | 541056                    | 2110845 | 3418    | 1   | 20        | E          | 4-7        | C1                     |
| 49 | Sur barranca Tlalquecotchcotl      | 542103                    | 2114526 | 3425    | 1   | 40        | S          | 4_8        | C1                     |
| 50 | O 14                               | 533121                    | 2106124 | 3440    | 1   | 55        | S          | 8          | D3                     |
| 51 | 16                                 | 534000                    | 2145000 | 3450    | 2   | 32        | W          | 4          | L                      |
| 52 | 10                                 | 527132                    | 2139575 | 3469    | 2   | 47        | NE         | 4_8        | L                      |
| 53 | 39                                 | 527699                    | 2150026 | 3500    | 2   | 15        | NE         | 8          | L                      |
| 54 | Tlalcomajada este de Tetorre       | 542529                    | 2121800 | 3512    | 1   | 61        | N          | 4_7_8      | C1                     |
| 55 | 33                                 | 527289                    | 2140367 | 3520    | 2   | 20        | NW         | 4_8        | L                      |
| 56 | F 5                                | 534939                    | 2110074 | 3522    | 1   | 20        | NW         | 4          | C1                     |
| 57 | Puerto Mancilla                    | 526376                    | 2146877 | 3537    | 2   | 28        | SE         | 7_8        | L                      |
| 58 | Suroeste barranca Tlalquecotchcotl | 541221                    | 2114562 | 3540    | 1   | 35        | S          | 4_8        | B2                     |
| 59 | F 11                               | 534716                    | 2111918 | 3550    | 1   | 45        | E          | 4_8        | C1                     |
| 60 | 22                                 | 527712                    | 2141573 | 3550    | 2   | 37.5      | NW         | 8          | L                      |
| 61 | F1                                 | 534534                    | 2111637 | 3553    | 1   | 20        | W          | 4          | C1                     |
| 62 | F 2                                | 534603                    | 2111225 | 3585    | 1   | 35        | SE         | 4_8        | C1                     |
| 63 | 9                                  | 527490                    | 2140444 | 3593    | 2   | 25        | SE         | 8          | L                      |
| 64 | Coronilla                          | 533552                    | 2117782 | 3600    | 1   | 35        | S          | 4          | I1                     |
| 65 | 37                                 | 528145                    | 2144802 | 3600    | 2   | 32.5      | SW         | 4_8        | L                      |
| 66 | Pela gallina                       | 538910                    | 2110546 | 3615    | 1   | 8         | NE         | 2          | C1                     |
| 67 | 20                                 | 529751                    | 2143575 | 3650    | 2   | 12        | N          | 4          | L                      |
| 68 | Sur barranca Tlalquecotchcotl      | 541942                    | 2115007 | 3667    | 1   | 60        | N          | 4          | C1                     |
| 69 | Chalchoapa noreste de Tetorre      | 542010                    | 2121193 | 3696    | 1   | 21        | N          | 4          | B2                     |
| 70 | 15                                 | 531000                    | 2144950 | 3700    | 2   | 60        | W          | 4          | L                      |
| 71 | 8                                  | 527132                    | 2139575 | 3708    | 2   | 30        | S          | 8          | L                      |
| 72 | Paso d Cortés                      | 536125                    | 2111200 | 3723    | 1   | 20        | NE         | 4          | C1                     |
| 73 | 4                                  | 528589                    | 2140806 | 3800    | 2   | 14.1      | N          | 4          | L                      |
| 74 | 38                                 | 529165                    | 2145418 | 3800    | 2   | 35        | S          | 4          | L                      |
| 75 | La Laguna Xahuehualcalco           | 541183                    | 2121616 | 3828    | 1   | 24        | N          | 4          | B2                     |
| 76 | La Joya                            | 536507                    | 2116230 | 3892    | 1   | 51        | N          | 4          | C1                     |
| 77 | 40                                 | 529433                    | 2141702 | 4100    | 2   | 19        |            | 4          | L                      |

Cuadro 3.- *Abies religiosa* 1; *avena* 2; *Cupressus* sp. 3; *P. hartwegii* 4; *P. montezumae* 5; *P. patula* 6; *P. teocote* 7; *P. pseudostrobus* 8; *pinus* sp 9; *P. ayacahuite* 10, *Quercus* 11, ANP= Área Natural protegida 1= Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y 2= Parque Nacional Zoquiapan y Anexa. Los sitios van ordenados de menor a mayor altitud. Las unidades de suelo se describen en el cuadro 2. \* Miehlich (1980). ID= Número del sitio

El género *Pinus* fue la vegetación dominante pues se encontró de 2580 a 4100 msnm. Entre las especies de pino destacaron *P. montezumae* y *P. teocote* (2580 a 2884 msnm), *P. pseudostrobus* (2884 a 3188 msnm), *P. ayacahuite* (3100 a 3200 msnm) y *P. hartwegii* (3492 a 4100 msnm). Por su parte, *A. religiosa* fue la siguiente especie dominante y se observó de 3188 a 3492 msnm, presentando asociación con *Pinus*, *Quercus* y *Cupressus* en 20 sitios (Figura 8).

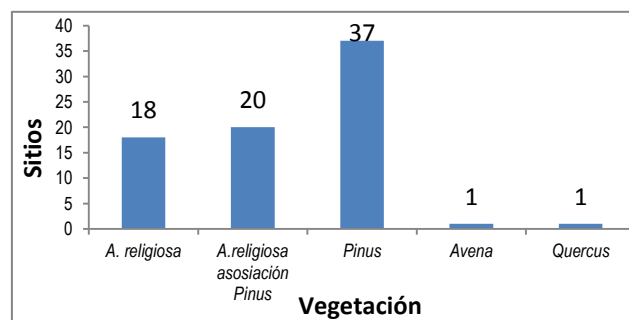


Figura 8.-Frecuencia de vegetación dominante del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

## 7.2.-Tipos de Suelos.

En el Cuadro 5 y Figura 9, se presentaron los suelos descritos como unidades dominantes y acompañantes según la clasificación de Mielich (1980) quien da su equivalencia con WRB (2006).

Con los datos de Mielich (1980), se encontró que los suelos dominantes fueron los Andosoles, Cambisoles, Fluvisoles, Litosoles y Regosoles; resaltando los dos primeros. Entre los Andosoles más frecuentes se encontraron el vítrico, húmico y la asociación húmico/ ocrico y entre los Cambisoles, el districo y eutrico en fase Duripan. Las unidades de suelo con mayor extensión fueron M3 (26006 ha), C1 (24791 ha) y L (22433 ha) y las de menor superficie fueron I2 (2228 ha) e I3 (2071.2 ha).

Cuadro 5.- Suelos descritos por Mielich (1980) y su equivalente con WRB.

| Unidad de Suelos | Mielich (1980)                                     |  | WRB (2006)   |  | S  | Área    |      |
|------------------|--|--|--|--|----|---------|------|
|                  | Dominantes   | Acompañantes   | Dominantes   | Acompañantes   |    | Ha      | %    |
| B2               | Andosol cryandino, Andosol humandico               | Regosol cryicos, Litosol   | Andosol vítrico, Andosol húmico  | Regosol districo, Litosol  | 3  | 4335.3  | 3    |
| C1               | Andosol mesandino.                                 | Fluvisol, Andosol humandico, Andosol cryandino.  | Andosol vítrico.   | Fluvisol, Andosol húmico, Andosol vítrico.   | 21 | 24791.3 | 17.1 |
| D3               | Andosol termandino, Andosol mesandino.             | Fluvisol.  | Andosol vítrico Andosol vítrico.   | Fluvisol.  | 10 | 7891.5  | 5.4  |
| I1               | Andosol humandico, Cambisol districo.              | Litosol.   | Andosol húmico, Cambisol districo.   | Litosol.   | 2  | 6847.7  | 4.7  |
| I2               | Andosol humandico, Cambisol districo.              | Andosol humandos.  | Andosol húmico, Cambisol districo.   | Andosol vítrico.   | 3  | 2228.1  | 1.5  |
| I3               | Andosol cambandico, Andosol cambandos.             | Andosol termandino   | Andosol húmico, Andosol humico/ocrico.   | Andosol vítrico.   | 3  | 2071.2  | 1.4  |
| K1               | Andosol humandos.                                  | Andosol silhumandos, cambisol districo, Fluvisol.  | Andosol vítrico.   | Andosol húmico, Cambisol districo, Fluvisol.   | 1  | 7864.7  | 5.4  |
| K2               | Andosol humandos, Andosol-silhumandos.             | Andosol cambandos, Litosol.  | Andosol vítrico.   | Andosol húmico/ocrico, Litosol.  | 1  | 4656.1  | 3.2  |
| L                | Andosol cambandico, Andosol humandos.              | Litosol, Fluvisol.   | Andosol húmico, Andosol vítrico.   | Litosol, Fluvisol.   | 18 | 22432.5 | 15.4 |
| M1               | Andosol cambtixico, Andosol cambandos.             | Andosol durcambtixico, Andosol cambandico, Regosol termico                               | Andosol molico, Andosol húmico/ocrico.   | Andosol ócricos-fase duripan, Andosol húmico, regosol eútrico.   | 1  | 3085.2  | 2.1  |
| M2               | Andosol cambtixico, Andosol cambandos.             | Cambisol dureutrico, Duripan.  | Andosol molico, Andosol húmico/ocrico.   | Cambisol eutrico fase duripan, Duripan.  | 2  | 9142.9  | 6.3  |
| M3               | Andosol cambtixico, Andosol cambandos.             | Andosol cambandico, Regosol districo, Cambisol dureutrico, Andosol silhumandos, Litosol. | Andosol molico, Andosol húmico/ocrico.   | Andosol húmico, regosol districo, Cambisol districo, Cambisol eutrico fase duripan, Andosol húmico, Litosol. | 8  | 26006.2 | 17.9 |
| M4               | Andosol cambandos, Andosol humandos.               | Andosol cambtixico, Cambisol eutrico, Cambisol dureutrico.                               | Andosol húmico/ocrico, Andosol vítrico.  | Andosol molico, Andosol vítrico, Cambisol eutrico fase duripan.  | 1  | 9786.9  | 6.7  |
| M5               | Andosol cambandos, Andosol humandos.               | Andosol cambtixico, Regosol termico, Cambisol eutrico.                                   | Andosol humico/ocrico, Andosol vítrico.  | Andosol molico, Regosol eutrico, Cambisol vítrico.   | 2  | 4561.1  | 3.1  |
| Q                | Duripan, cambisol dureutrico, Cambisol durvertico. | Andosol cambtixico.  | Cambisol eutrico, fase de duripan, Cambisol eutrico fase duripan, Cambisol verticos, fase duripan. | Andosol molico.  | 1  | 9437.8  | 6.5  |

Cuadro 5.-S.- Sitios.



PARQUE NACIONAL IZTACÍHUATL POPOCATÉPETL

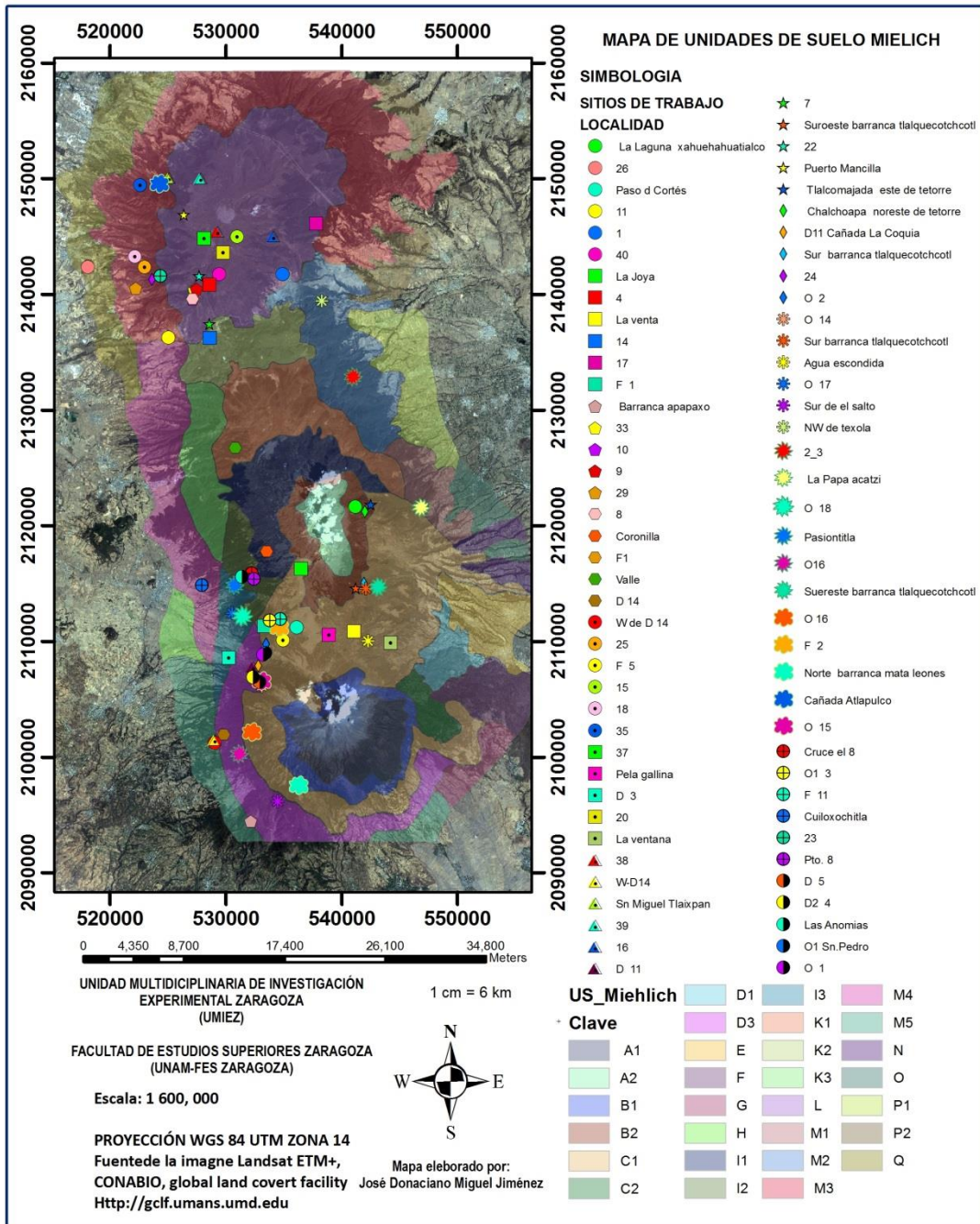


Figura 9.-Mapa de suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl descritos por Mielich (1980). US= unidades de suelo.

### 7.3.-Interpretación del Vigor de la Vegetación en las Imágenes Landsat ETM +.

El vigor de la vegetación (NDVI) tuvo valores de -1 a 1, donde -1 a -0.09 indicaron zonas sin o muy poca vegetación y se observa en la Figura 10 que las zonas con vegetación tuvieron tonos verdes (mayor vigor) y amarillos (menos vigor). Las zonas con mayor vigor corresponden a bosque denso y las amarillas a sitios con bosque abierto o pastizal (Maruri 2005, Alcaraz et al., 2008, Paruelo 2008).

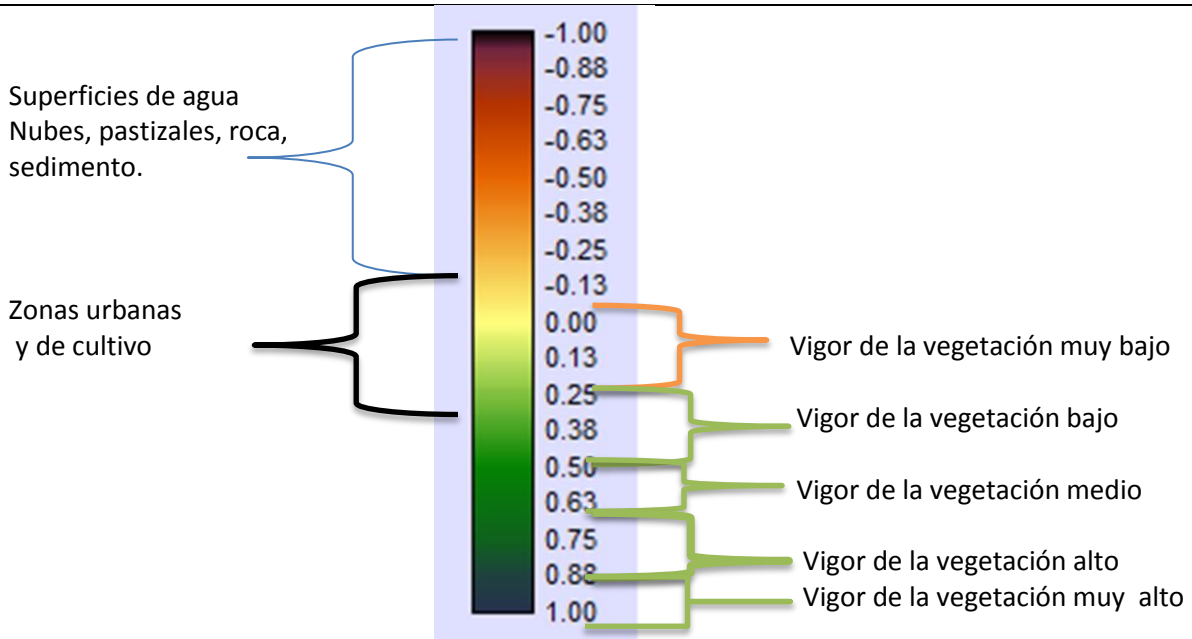


Figura 10.-Vigor de la vegetación.

Así, se encontró que valores de -1 a -0.7 indicaron superficies con cuerpos de agua, de 0 a -0.13 señalaron zonas de cultivo limitando con bosque. Regiones de cultivo colindantes con centros de población tuvieron un valor de vigor de 0 a -0.15 y en zonas urbanas, el vigor de la vegetación tuvo valores de -0.35 a 0 (Figura 11).

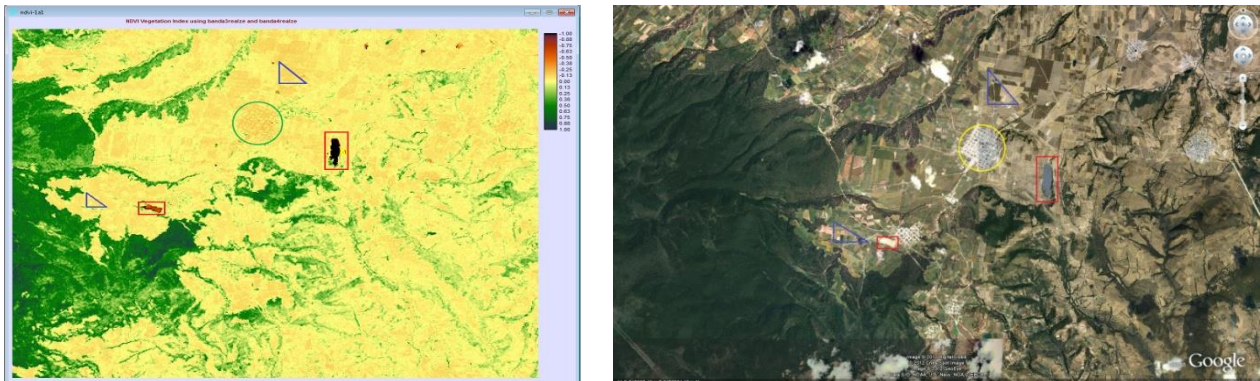


Figura 11.-Comparación de la Imagen de NDVI (Izquierda) con imagen de Google Earth año 2008 (Derecha).

Las clases de vigor de la vegetación fueron establecidas en función de la comparación de la imagen obtenidas del NDVI con mapas de uso de suelo y vegetación; imagen a color real y también con imágenes de Google Earth; además de las vistas a campo.

De -0.098, y conforme aumentó el vigor, a partir de 0.2 (verdor), la cobertura vegetal aumentó en la imagen (Figura 12 y Cuadro 6).

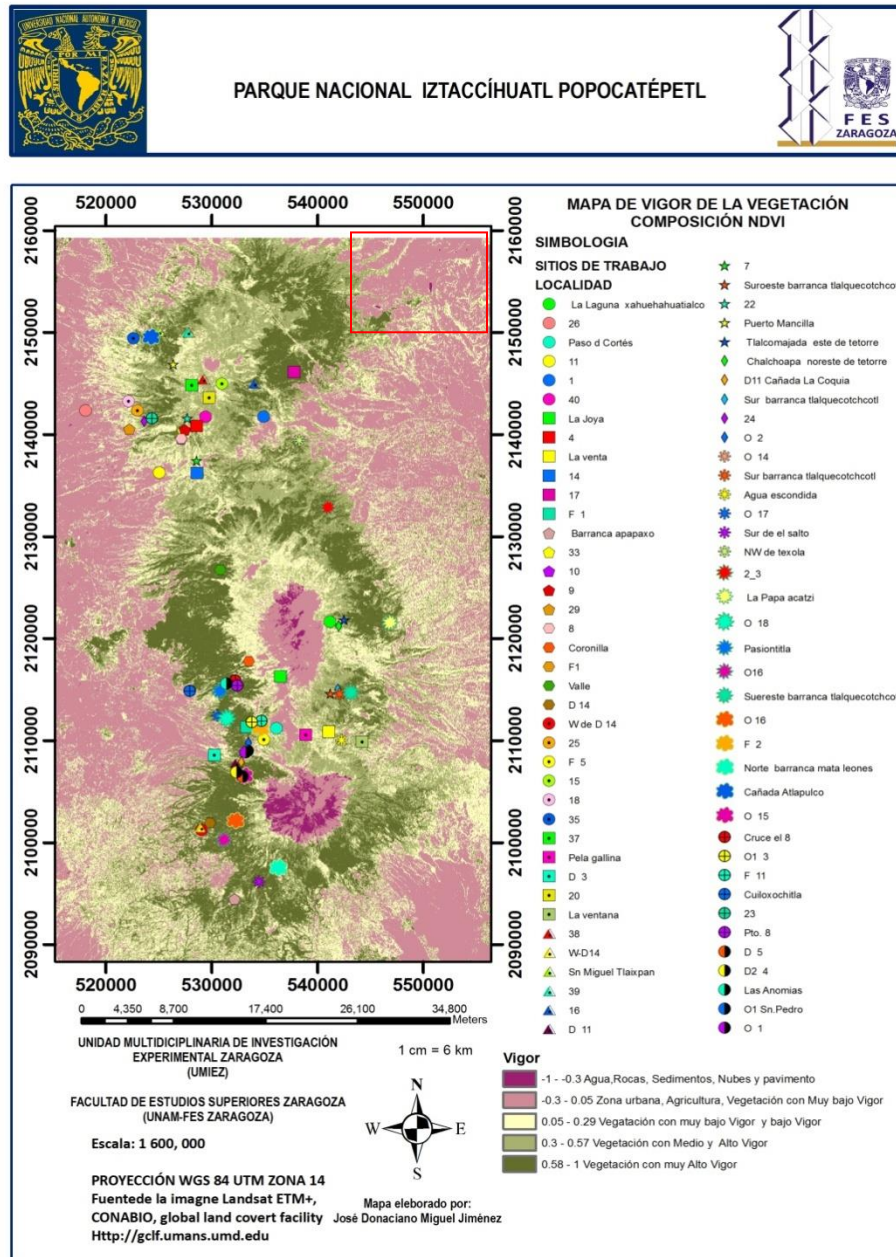


Figura 12.-Mapa del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, composición (NDVI) y puntos de muestreo y de Validación.

Cuadro 6.-Sitios de estudio y valor de vigor de la vegetación.

| LOCALIDAD                          | COORDENADAS |         | ANP | PENDIENTE | EXPOSICIÓN | VEGETACIÓN | ALTITUD | VIGOR  | NIVEL DE VIGOR |
|------------------------------------|-------------|---------|-----|-----------|------------|------------|---------|--------|----------------|
|                                    | UTM NAD 27  | X Y     |     |           |            |            |         |        |                |
| La Laguna xahuehualco              | 541183      | 2121616 | 1   | 24        | N          | 4          | 3828    | -0.098 | muy bajo       |
| 26                                 | 518085      | 2142330 | 2   | 22.5      | S          | 6          | 2580    | -0.040 | muy bajo       |
| Paso d Cortés                      | 536125      | 2111200 | 1   | 20        | NE         | 4          | 3723    | 0.011  | muy bajo       |
| 11                                 | 525026      | 2136222 | 2   | 20        | W          | 7          | 3086    | 0.017  | muy bajo       |
| 1                                  | 534887      | 2141723 | 2   | 40        | SE         | 2_3_8      | 3155    | 0.040  | muy bajo       |
| 40                                 | 529433      | 2141702 | 2   | 19        |            | 4          | 4100    | 0.046  | muy bajo       |
| La Joya                            | 536507      | 2116230 | 1   | 51        | N          | 4          | 3892    | 0.115  | muy bajo       |
| 4                                  | 528589      | 2140806 | 2   | 14.1      | N          | 4          | 3800    | 0.120  | muy bajo       |
| La venta                           | 541056      | 2110845 | 1   | 20        | E          | 2_4        | 3418    | 0.140  | muy bajo       |
| 14                                 | 528614      | 2136185 | 2   | 17.5      | SW         | 1_3        | 3182    | 0.177  | muy bajo       |
| 17                                 | 537794      | 2146105 | 2   | 14        | N          | 1          | 3100    | 0.190  | muy bajo       |
| F 1                                | 533304      | 2111309 | 1   | 30        | W          | 3_4        | 3288    | 0.198  | bajo           |
| Barranca apapaxo                   | 532177      | 2094455 | 1   | 60        | NW         | 1_8        | 2834    | 0.205  | bajo           |
| 33                                 | 527289      | 2140367 | 2   | 20        | NW         | 4_8        | 3520    | 0.208  | bajo           |
| 10                                 | 527132      | 2139575 | 2   | 47        | NE         | 4_8        | 3469    | 0.210  | bajo           |
| 9                                  | 527490      | 2140444 | 2   | 25        | SE         | 8          | 3593    | 0.213  | bajo           |
| 29                                 | 522227      | 2140551 | 2   | 10        | S          | 2          | 2722    | 0.225  | bajo           |
| 8                                  | 527132      | 2139575 | 2   | 30        | S          | 8          | 3708    | 0.235  | bajo           |
| Coronilla                          | 533552      | 2117782 | 1   | 35        | S          | 4          | 3600    | 0.238  | bajo           |
| F1                                 | 534534      | 2111637 | 1   | 20        | W          | 4          | 3553    | 0.248  | bajo           |
| Valle                              | 530838      | 2126706 | 1   | 24        | NW         | 2_8        | 3301    | 0.265  | bajo           |
| D 14                               | 529850      | 2101950 | 1   | 20        | W          | 1          | 2800    | 0.267  | bajo           |
| W de D 14                          | 529032      | 2101200 | 1   | 35        | W          | 1          | 2650    | 0.270  | bajo           |
| 25                                 | 522985      | 2142335 | 2   | 25        | NW         | 3          | 2900    | 0.275  | bajo           |
| F 5                                | 534939      | 2110074 | 1   | 20        | NW         | 4          | 3522    | 0.280  | bajo           |
| 15                                 | 531000      | 2144950 | 2   | 60        | W          | 4          | 3700    | 0.288  | bajo           |
| 18                                 | 522168      | 2143256 | 2   | 66        | NW         | 2_8        | 2850    | 0.290  | bajo           |
| 35                                 | 522597      | 2149404 | 2   | 37.5      | NW         | 8          | 3000    | 0.300  | bajo           |
| 37                                 | 528145      | 2144802 | 2   | 32.5      | SW         | 4_8        | 3600    | 0.300  | bajo           |
| Pela gallina                       | 538910      | 2110546 | 1   | 8         | NE         | 2          | 3615    | 0.300  | bajo           |
| D 3                                | 530240      | 2108542 | 1   | 16        | NE         | 8          | 2832    | 0.308  | bajo           |
| 20                                 | 529751      | 2143575 | 2   | 12        | N          | 4          | 3650    | 0.330  | bajo           |
| La ventana                         | 544221      | 2109851 | 1   | 16        | E          | 3_5        | 3127    | 0.340  | bajo           |
| 38                                 | 529165      | 2145418 | 2   | 35        | S          | 4          | 3800    | 0.343  | bajo           |
| W-D14                              | 528925      | 2101465 | 1   | 19        | N          | 3          | 2650    | 0.348  | bajo           |
| Sn Miguel Tlaixpan                 | 524968      | 2150047 | 2   | 55        | E          | 11         | 3066    | 0.355  | bajo           |
| 39                                 | 527699      | 2150026 | 2   | 15        | NE         | 8          | 3500    | 0.355  | bajo           |
| 16                                 | 534000      | 2145000 | 2   | 32        | W          | 4          | 3450    | 0.360  | bajo           |
| D 11                               | 532240      | 2107789 | 1   | 4         | W          | 8          | 2965    | 0.370  | bajo           |
| 7                                  | 528594      | 2137425 | 2   | 13.7      | SE         | 7          | 3150    | 0.370  | bajo           |
| Suroeste barranca tlalquecotchcotl | 541221      | 2114562 | 1   | 35        | S          | 4_8        | 3540    | 0.385  | bajo           |
| 22                                 | 527712      | 2141573 | 2   | 37.5      | NW         | 8          | 3550    | 0.400  | Medio          |
| Puerto Mancilla                    | 526376      | 2146877 | 2   | 28        | SE         | 7_8        | 3537    | 0.410  | Medio          |
| Tlalcomajada este de tetorre       | 542529      | 2121800 | 1   | 61        | N          | 4_7_8      | 3512    | 0.422  | Medio          |
| Chalchoapa noreste de tetorre      | 542010      | 2121193 | 1   | 21        | N          | 4          | 3696    | 0.423  | Medio          |
| D11 Cañada La Coquia               | 532792      | 2107890 | 2   | 25        | SW         | 8_12       | 2965    | 0.430  | Medio          |
| Sur barranca tlalquecotchcotl      | 541942      | 2115007 | 1   | 60        | N          | 4          | 3667    | 0.433  | Medio          |
| 24                                 | 523629      | 2141260 | 2   | 47        | SW         | 3          | 3000    | 0.467  | Medio          |
| O 2                                | 533500      | 2109750 | 1   | 35        | W          | 8          | 3300    | 0.475  | Medio          |
| O 14                               | 533121      | 2106124 | 1   | 55        | S          | 8          | 3440    | 0.480  | Medio          |
| Sur barranca tlalquecotchcotl      | 542103      | 2114526 | 1   | 40        | S          | 4_8        | 3425    | 0.495  | Medio          |
| Agua escondida                     | 542286      | 2110002 | 1   | 60        | E          | 1_2        | 3333    | 0.503  | Medio          |
| O 17                               | 530582      | 2112415 | 1   | 42        | S          | 1_3        | 2918    | 0.508  | Medio          |
| Sur de el salto                    | 534478      | 2096137 | 1   | 8         | NW         | 6_8        | 3099    | 0.540  | Medio          |
| NW de texola                       | 538309      | 2139414 | 2   | 33        | N          | 7          | 2876    | 0.550  | Medio          |
| 2_3                                | 540977      | 2132834 | 2   | 5         | SE         |            | 2800    | 0.580  | Medio          |

Cuadro 7.- Vegetación= *Abies religiosa* 1; *avena* 2; *Cupressus* sp. 3; *P. hartwegii* 4; *P. montezumae* 5; *P. patula* 6; *P. teocote* 7; *P. pseudostrabus* 8; *Pinus* sp. 9; *P. ayacahuite* 10, *Quercus* 11. ANP= Área Natural protegida 1= Parque Nacional Iztacchuatl-Popocatepetl y 2= Parque Nacional Zoquiapan y Anexa. Datos ordenados conforme al vigor.

Cuadro 6.- (continuación) Sitios de estudio y valor de vigor de la vegetación.

| LOCALIDAD                          | COORDENADAS     |         | ANP | PENDIENT<br>E | EXPOSICIÓN<br>N | VEGETACIÓN<br>N | ALTITUD<br>D | VIGOR | NIVEL DE<br>VIGOR |
|------------------------------------|-----------------|---------|-----|---------------|-----------------|-----------------|--------------|-------|-------------------|
|                                    | UTM NAD 27<br>X | Y       |     |               |                 |                 |              |       |                   |
| La Papa acatzi                     | 546875          | 2121540 | 1   | 15            | SE              | 1_6             | 2964         | 0.580 | Medio             |
| O 18                               | 531440          | 2112175 | 1   | 80            | NE              | 8               | 2932         | 0.660 | Alto              |
| Pasiontitla                        | 530800          | 2114850 | 1   | 35            | W               | 2_3_6           | 2900         | 0.670 | Alto              |
| O16                                | 531169          | 2100270 | 1   | 55            | W               | 8               | 3225         | 0.680 | Alto              |
| Suereste barranca tlalquecotchcotl | 543181          | 2114683 | 1   | 45            | SE              | 5_8_12          | 3281         | 0.680 | Alto              |
| O 16                               | 532250          | 2102150 | 1   | 55            | S               | 8               | 3225         | 0.712 | Alto              |
| F 2                                | 534603          | 2111225 | 1   | 35            | SE              | 4_8             | 3585         | 0.725 | Alto              |
| Norte barranca mata leones         | 536262          | 2097553 | 1   | 20            | S               | 4_8             | 3312         | 0.753 | Alto              |
| Cañada Atlapulco                   | 524251          | 2149554 | 2   | 35            | NE              | 8_11            | 3003         | 0.770 | Alto              |
| O 15                               | 533082          | 2106584 | 1   | 44            | N               | 8               | 3336         | 0.775 | Alto              |
| Cruce el 8                         | 532250          | 2115850 | 1   | 25            | SW              | 8               | 3300         | 0.783 | Alto              |
| O1 3                               | 533785          | 2111786 | 1   | 60            | SE              | 8               | 3398         | 0.790 | Alto              |
| F 11                               | 534716          | 2111918 | 1   | 45            | E               | 4_8             | 3550         | 0.790 | Alto              |
| Cuiloxochitla                      | 527927          | 2114839 | 1   | 10            | S               | 2               | 2710         | 0.800 | muy alto          |
| 23                                 | 524358          | 2141569 | 2   | 10            | SW              | 6               | 3100         | 0.800 | muy alto          |
| Pto. 8                             | 532419          | 2115364 | 2   | 65            | NE              | 8_12            | 3231         | 0.800 | muy alto          |
| D 5                                | 532932          | 2106452 | 1   | 26            | W               | 8               | 3390         | 0.800 | muy alto          |
| D2 4                               | 532351          | 2106898 | 1   | 20            | SW              | 8               | 3228         | 0.870 | muy alto          |
| Las Anomias                        | 531400          | 2115570 | 1   | 25            | W               | 8               | 3000         | 0.930 | muy alto          |
| O1 Sn.Pedro                        | 533405          | 2108985 | 2   | 60            | SW              | 8               | 3286         | 0.960 | muy alto          |
| O 1                                | 533236          | 2108833 | 1   | 65            | S               | 1_8             | 3250         | 1.000 | muy alto          |

Cuadro 7.- Vegetación= *Abies religiosa* 1; *avena* 2; *Cupressus* sp. 3; *P. hartwegii* 4; *P. montezumae* 5; *P. patula* 6; *P. teocote* 7; *P. pseudostrabus* 8; *Pinus* sp. 9; *P. ayacahuite* 10, *Quercus* 11. ANP= Área Natural protegida 1= Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y 2= Parque Nacional Zoquiapan y Anexa. Datos ordenados conforme al vigor.

Como pudo verse, en el Cuadro 6, el vigor del PNIP se ubicó de -0.098 a 1 con promedio de 0.43. El vigor más bajo se localizó en el sitio conocido como **La Laguna Xahuehualco** a 3828 m snm, con ***P. hartwegii*** como vegetación dominante y el mayor vigor se ubicó en el sitio denominado **O 1**, a 3250 m snm y en donde el bosque fue de ***A. religiosa*** asociado con ***P. motezumae***.

Del análisis estadístico, la varianza demostró diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) entre el vigor de bosques con ***A. religiosa*** en comparación con los de ***Pinus*** (Figura 13).

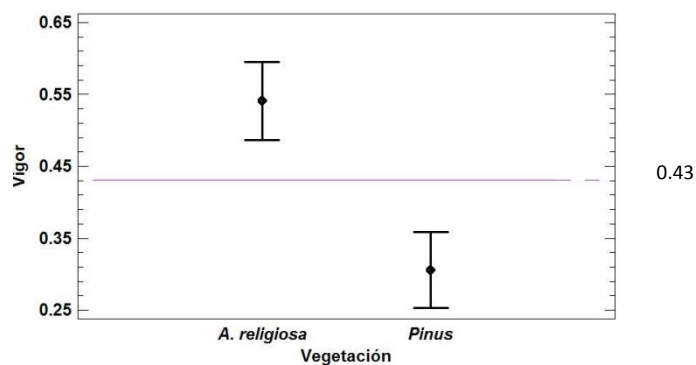


Figura 13.-Vigor de bosques de *A. religiosa* con respecto a los de *Pinus*. Diferencia estadística= 0.2,  $\pm 0.10$  unidades de limite.

Se encontró que el vigor de la vegetación fue mayor en el intervalo de 2800 a 3500 m snm y a mayor altitud disminuyó, coincidiendo con el vigor más bajo a 4100 m snm.



### 7.3.1.-Validación del Vigor de la Vegetación

Como parte de la validación de resultados de las imágenes Landsat ETM+, se visitaron un total de veintisiete sitios (diez del lado de Zoquiapan y Anexas y diecisiete de IztaPopo) para observar físicamente lo obtenido a través del índice de vegetación (Figura 14).

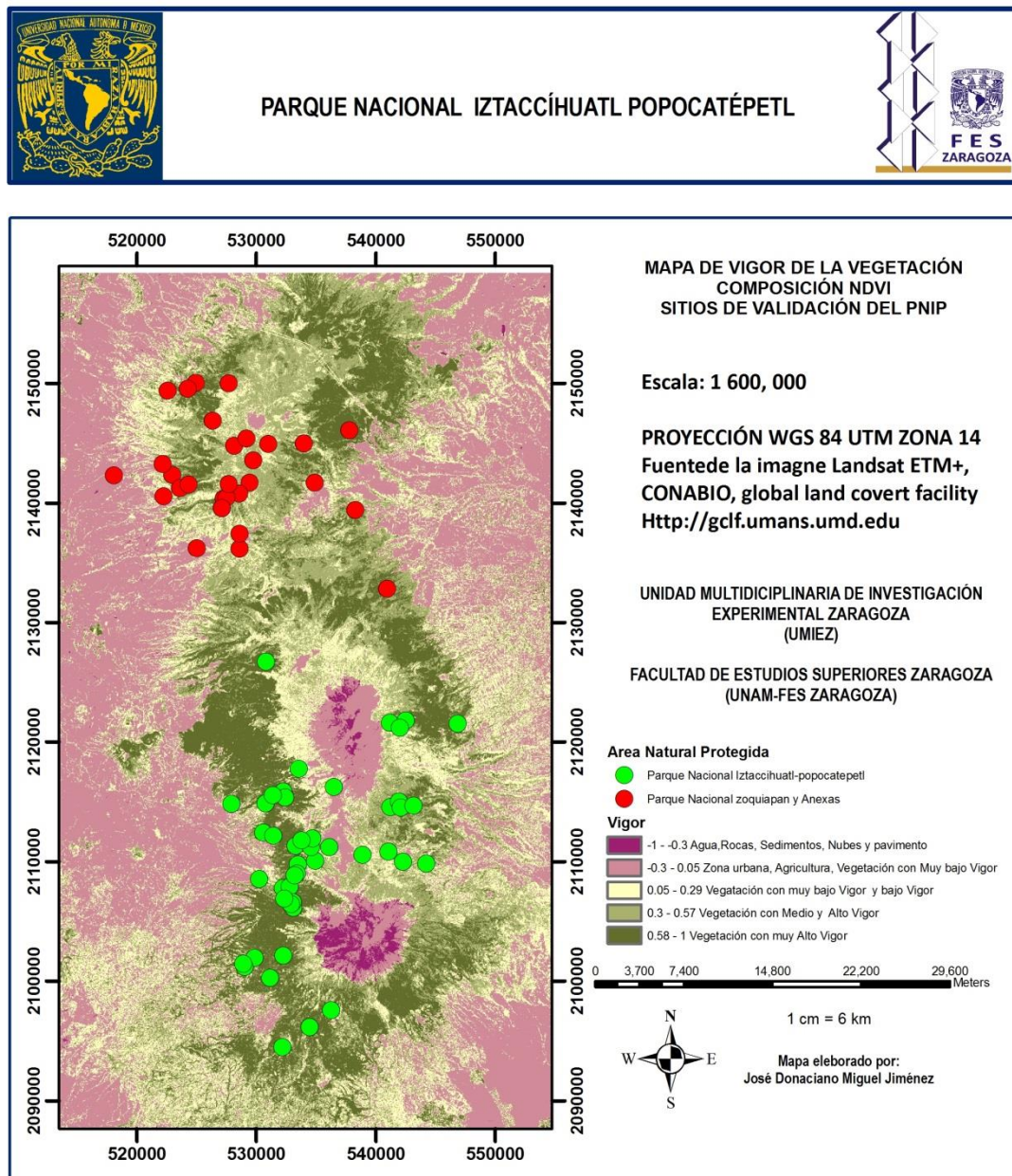


Figura 14.-Mapa del PNIP combinación NDVI y los puntos de validación.

### 7.3.2.-Vigor de la Vegetación en Zoquiapan y Anexas.

En las visitas a campo se encontró que, en general, sitios con bajo vigor en la imagen correspondieron con lugares donde el bosque presentó una estructura abierta, alta densidad de vegetación secundaria y en algunos lugares, evidencia de tala, incendio, actividad agrícola, desechos de basura o construcción y actividad antrópica. Del lado de la Sierra de Río Frío, en Zoquiapan y Anexas (PNZA), destacaron por su bajo vigor los sitios denominados como Sitio 26, La Mina (en la zona del punto 26), Sitio 24 y Cuadrante 3 (Figura 15 y Cuadro 7).

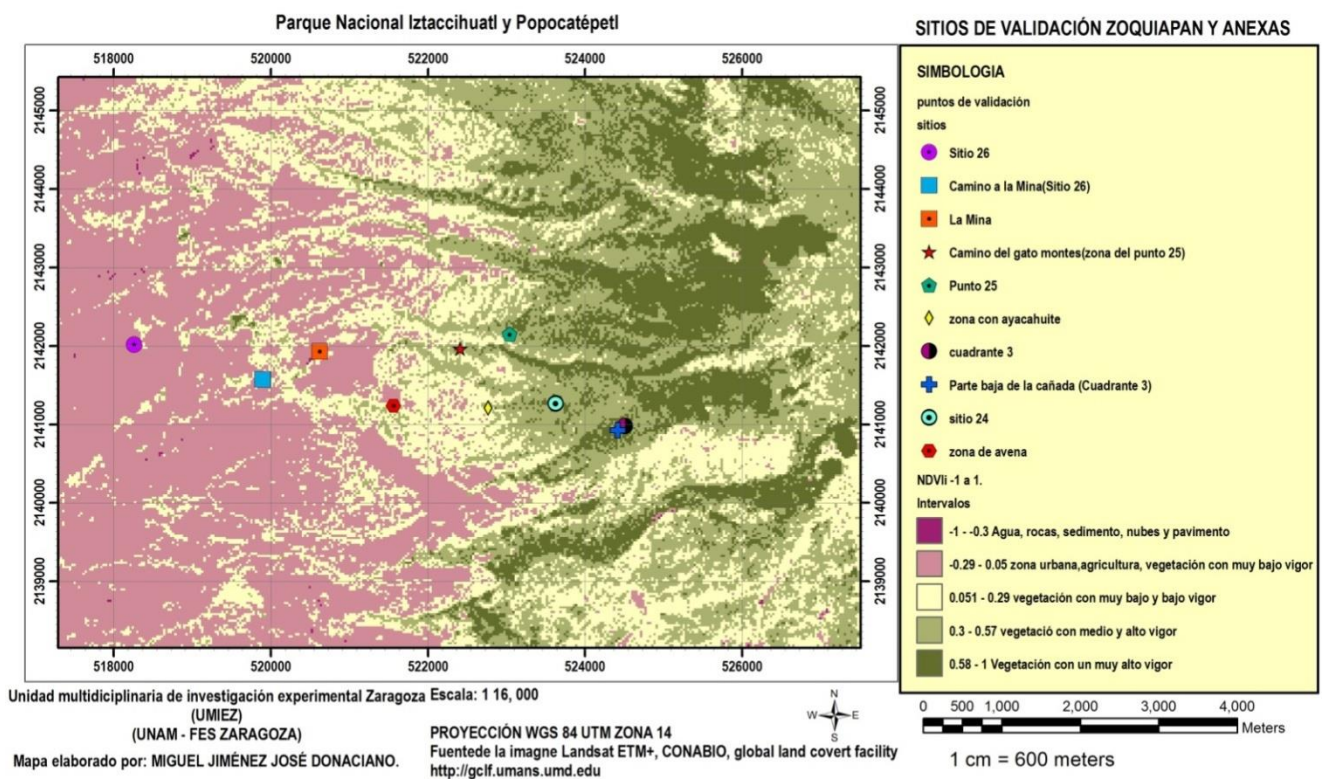


Figura 15.-Mapa del PNZA composición NDVI y los puntos de validación.

Cuadro 7.- Sitios de validación del Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

| Sitios                                     | COORDENADAS NAD 27 |         |       | ALTITUD | VIGOR    | NIVEL DE VIGOR  | VEGETACIÓN |
|--|--------------------|---------|-------|---------|----------|---|------------|
|  | X                  | Y       | m snm |         |          |   |            |
| Sitio 26                                   | 518265             | 2142012 | 2504  | -0.09   | MUY BAJO | <i>Eucalyptus</i> sp y <i>Cupressus</i>   |            |
| Camino a la Mina (zona del sitio 26)       | 519900             | 2141572 | 2601  | -0.025  | MUY BAJO | <i>Eucalyptus</i> pp y <i>Cupressus</i>   |            |
| Mina (zona del sitio 26)                   | 520627             | 2141927 | 2608  | -0.11   | MUY BAJO | Sin Vegetación  |            |
| Camino Del Gato Montes (zona del punto 25) | 522412             | 2141965 | 2800  | 0.09    | MUY BAJO | <i>Arbustus</i> , <i>Buddleja cordata</i> , <i>Quercus</i> , <i>Prunus serotina</i> , <i>Jarilla</i> , <i>Simphoricarpus</i> sp, <i>Eupatorium</i> , <i>Avena</i> , <i>Amaranthacea</i> y <i>Bacharis</i> , |            |
| Punto 25                                   | 523045             | 2142152 | 2828  | 0.6     | ALTO     | <i>A. religiosa</i> , <i>P. hayacahuite</i> , <i>Eucaliptus</i>   |            |
| Zona Con ayacahuite                        | 522767             | 2141204 | 2870  | 0.13    | MUY BAJO | <i>P. teocote</i> , <i>P. hayacahuite</i>   |            |
| Cuadrante 3                                | 524511             | 2140977 | 3149  | 0.65    | ALTO     | <i>Pinus</i> . sp, <i>Aile</i> , <i>P. teocote</i> , <i>vacaris</i>   |            |
| Parte Baja De La Cañada                    | 524420             | 2140921 | 3700  | 0.58    | MEDIO    | <i>Pinus</i> sp y <i>A. religiosa</i>   |            |
| Sitio 24 (Cuadrante 4)                     | 523629             | 2141260 | 3003  | 0.47    | MEDIO    | <i>Aile madronño</i> <i>Quercus</i> , <i>Pinus</i> sp.  |            |
| Zona De Avena                              | 521567             | 2141234 | 2680  | -0.05   | MUY BAJO | <i>Avena</i>  |            |

ANP= Área natural protegida

Las fotos observadas en la Figura 16 muestran al sitio 26 ubicado en una zona con campos de cultivo de avena y en su periferia un bosque con reforestación de ***Eucalyptus sp.*** y presencia de ***Cupressus sp.*** También se ve en el sitio donde se ubicó una zona con actividad minera. En ambos casos se puede verificar con la imagen de vigor que zonas con estas características tuvieron valores de vigor bajos y tonalidades amarillas y moradas (Cuadro 7).

En la figura 16, la imagen del vigor de la vegetación presentó una gama de color que va de rosa a morado y un valor de vigor -0.098 (Cuadro 7). Para el sitio donde se localizó la mina (zona del sitio 26), el valor de vigor en la imagen fue muy bajo con una tonalidad morado oscuro (Figura 16 y Cuadro 7).

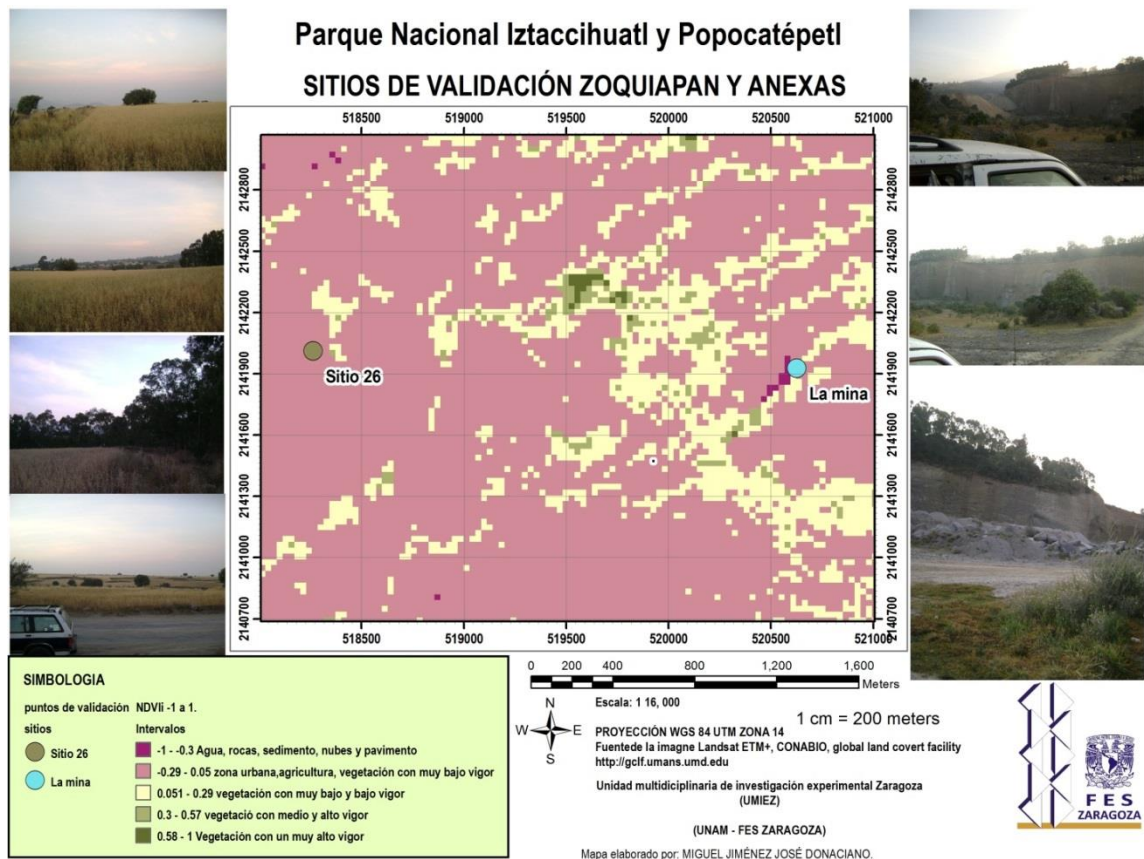


Figura 16.-Sitios de validación Zoquiapan y Anexas, punto 26 y La Mina.

El sitio de verificación denominado como Cuadrante 3 (ubicado en la zona del sitio 24) presentó una inclinación de 70 % y un difícil acceso al área, dada la densidad del sotobosque. Aquí se encontró un bosque de *P. teocote-Pinus sp.* dominando el estrato arbóreo alto. En general, el sitio tubo una estructura diversa, puesto que también se encontró *Alnus sp.* en el estrato arbóreo medio y *Bacharis* en el arbustivo. A pesar de la inclinación del terreno, en la parte media de la pendiente la materia orgánica se acumula, por lo que la profundidad del mantillo fue de 7 cm. Esta zona en la imagen del vigor de la vegetación presentó color de verde claro a verde oscuro y un valor de 0.65 (Figura 17). En otro punto de la zona del PNZA, en el Sitio 24 se observó un bosque de *Pinus sp.*, donde se estableció un estrato arbóreo alto dominado por esta especie y uno medio con *Arbutus sp.* En la imagen de vigor (Figura 17), se observó que pixels con colores verdes claros (Valor de vigor 0.47) corresponden a puntos donde se observó vegetación de hoja ancha (*Alnus*, *Arbutus* y *Quercus*) y los pixels con colores verde oscuro (valor de vigor de 0.6) corresponde a zonas con árboles de *Pinus sp.*

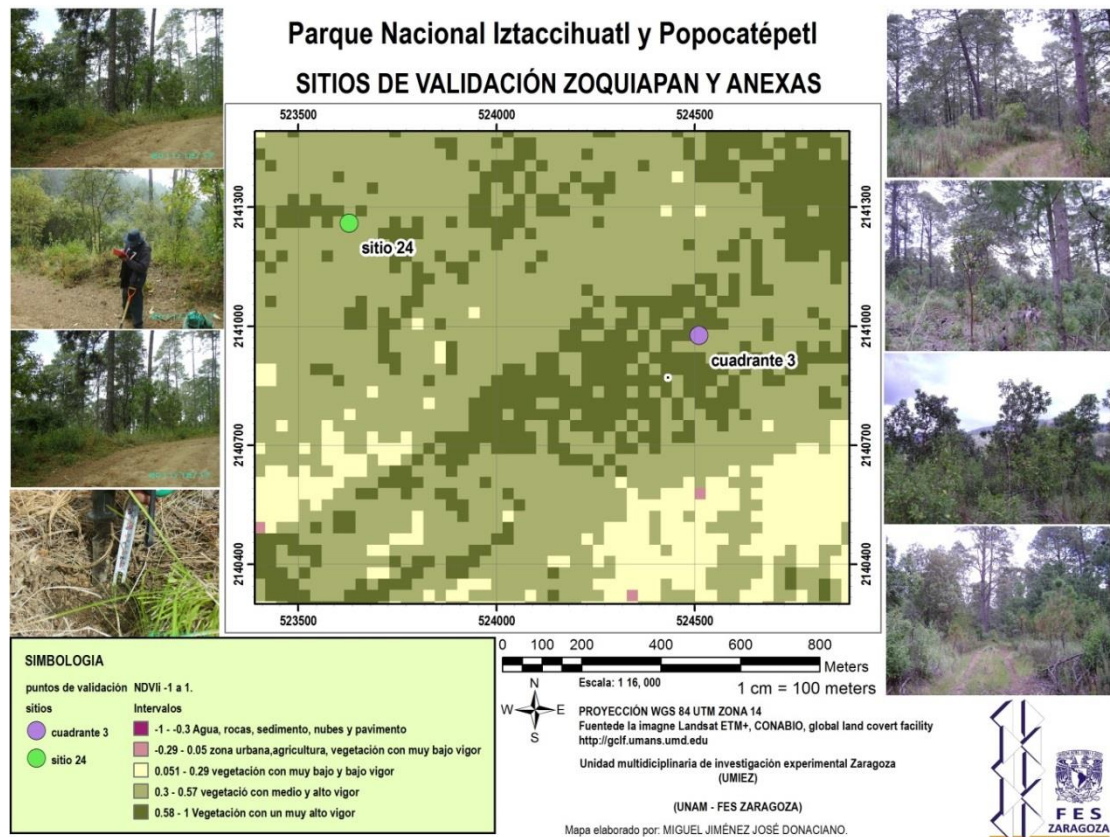


Figura 17.-Sitios de validación Zoquiapan y Anexas, sitio 24 y (Cuadrante 3).

### 7.3.3.-Vigor de la Vegetación en la zona de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl.

Dentro de los puntos visitados para validar la imagen del vigor de la vegetación en esta zona, destacaron por su alto vigor los sitio Santa Isabel (Cuadrante 1) y Potrero (Cuadrante 2), por su vigor medio el sitio F1 (Torre 1 y 2) y por su bajo vigor el sitio Tomacocos2, en el cual, en la visita de campo se observó una zona con tiradero de basura y cascajo, y en la periferia estuvo rodeado por zonas de cultivo, explicando su bajo vigor de vegetación (Cuadro 8 y Figura 18).

Cuadro 8.- Sitios de validación del Parque Nacional Izta-Popo.

| SITIOS                             | COORDENADAS NAD |         | ALTITUD<br>m snm | VIGOR | NIVEL DE<br>VIGOR | VEGETACIÓN   |
|------------------------------------|-----------------|---------|------------------|-------|-------------------|--|
|                                    | 27 X            | 27 Y    |                  |       |                   |  |
| Población de Santa Isabel          | 525021          | 2118386 | 2483             | 0.22  | BAJO              | Uso urbano limite con bosque   |
| Santa Isabel (Cuadrante 1)         | 529712          | 2119977 | 3061             | 0.67  | ALTO              | <i>A. religiosa, Cupressus, Quercus</i>                                  |
| Camino a Peña verde                | 528188          | 2118788 | 2664             | 0.86  | MUY ALTO          | <i>A. religiosa, Cupressus, P. ayacahuite, aile</i>                      |
| peña verde                         | 528255          | 2118794 | 2663             | 0.9   | MUY ALTO          | * <i>claucapalia, Coutarea sp</i> (palo amargo)                          |
| la caja                            | 528601          | 2119062 | 2663             | 0.9   | MUY ALTO          | * <i>claucapalia, Coutarea sp</i> (palo amargo)                          |
| campo de cultivo                   | 524563          | 2117448 | 2489             | -0.03 | MUY BAJO          | campo de cultivo de maíz   |
| cruce de via ameca                 | 523020          | 2114441 | 2471             | 0.03  | MUY BAJO          | <i>Eucalyptus cineraroides</i>   |
| F1                                 | 533307          | 2111315 | 3325             | 0.24  | BAJO              | suelo desnudo  |
| torre dos(zona F1)                 | 533199          | 2111316 | 3296             | 0.13  | MUY BAJO          | <i>P. ayacahuite, A. religiosa, buddleja cordata.</i>                    |
| torre uno (zona F1)                | 533351          | 2111325 | 3333             | 0.33  | BAJO              | <i>P. ayacahuite, A. religiosa, buddleja cordata</i>                     |
| Potrero                            | 533890          | 2111663 | 3341             | 0.17  | MUY BAJO          | <i>A. religiosa</i>  |
| Entrada a potrero                  | 533564          | 2111463 | 3365             | 0.4   | MEDIO             | <i>A. religiosa</i>  |
| Potrero (cuadrante 2)              | 533602          | 2111542 | 3346             | 0.61  | ALTO              | <i>A. religiosa</i>  |
| Tomacocos iglesia                  | 527346          | 2112639 | 2548             | -0.12 | MUY BAJO          |  |
| Tomacocos aposonalco               | 528899          | 2113656 | 2673             | 0.75  | ALTO              | <i>A. religiosa, P. teocote, Cupressus, Arbutus jalapensis, Bromelia</i> |
| Tomacocos basurero-zona de cultivo | 525729          | 2113013 | 2508             | -0.1  | MUY BAJO          | zona de cultivo y basurero   |

\*nombre común

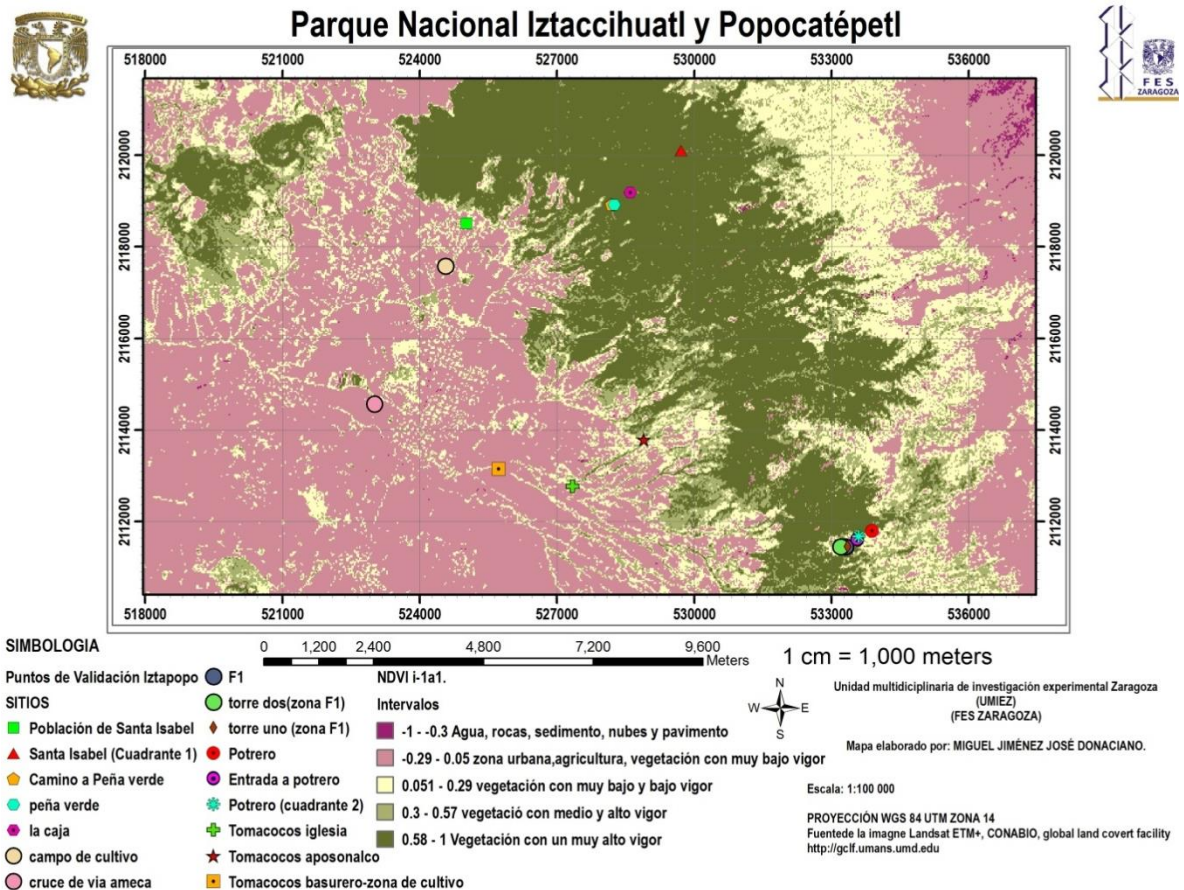


Figura 18.-Mapa del PNIP composición NDVI y los puntos de validación.

Se pudo constatar en la visita de campo que el sitio denominado Santa Isabel (Cuadrante 1) tuvo bosque de *A. religiosa* con presencia de *Cupressus* y *Quercus*. En la imagen de vigor, la zona de este sitio presentó tonalidades verde oscuro como dominantes y en consecuencia un vigor alto (Figura 19). De acuerdo con el registro dasométrico, este sitio tuvo la densidad arbórea y el volumen maderable más alto (Cuadro 9), lo cual corresponde con un alto vigor de la vegetación (0.7).

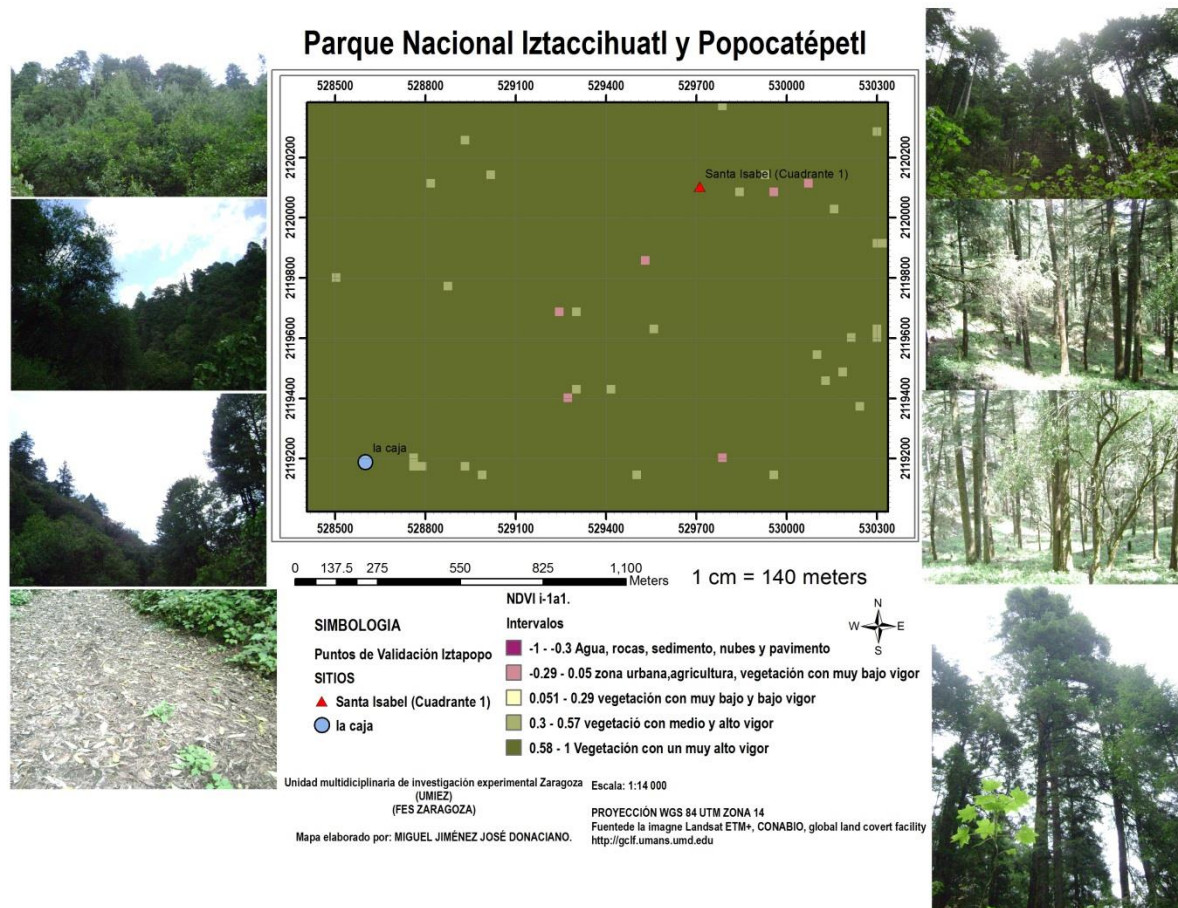


Figura 19.-Sitios de validación del PNIP. Puntos La Caja y Santa Isabel (Cuadrante 1).

Del sitio de validación denominado F1 (Torre uno y dos), en la imagen de vigor se obtuvo un valor bajo (0.24) con tonalidades amarillo claro y en los alrededores verde oscuro (mejor vigor) debido al establecimiento de oyamel. Al realizar la visita física, se observó una zona abierta, con perturbación de incendio, además de torres y cables de luz y zanjas. Los árboles de pino y oyamel establecidos dentro de esta zona presentaron signos de clorosis en sus hojas, mejorando su estado en la periferia (Figura 20).

En el sitio denominado Potrero (Cuadrante 2) se presentó un vigor alto en la imagen de satélite. En campo se constato un buen estado de conservación de la vegetación, dominada por un bosque de *A. religiosa* y en la cubierta del suelo una abundante capa de mantillo. En esta zona, las tonalidades de la imagen fueron verde oscuro y en menor proporción pixels con colores verde y amarillo claro debido a superficies sin o con poca vegetación (Figura 20).

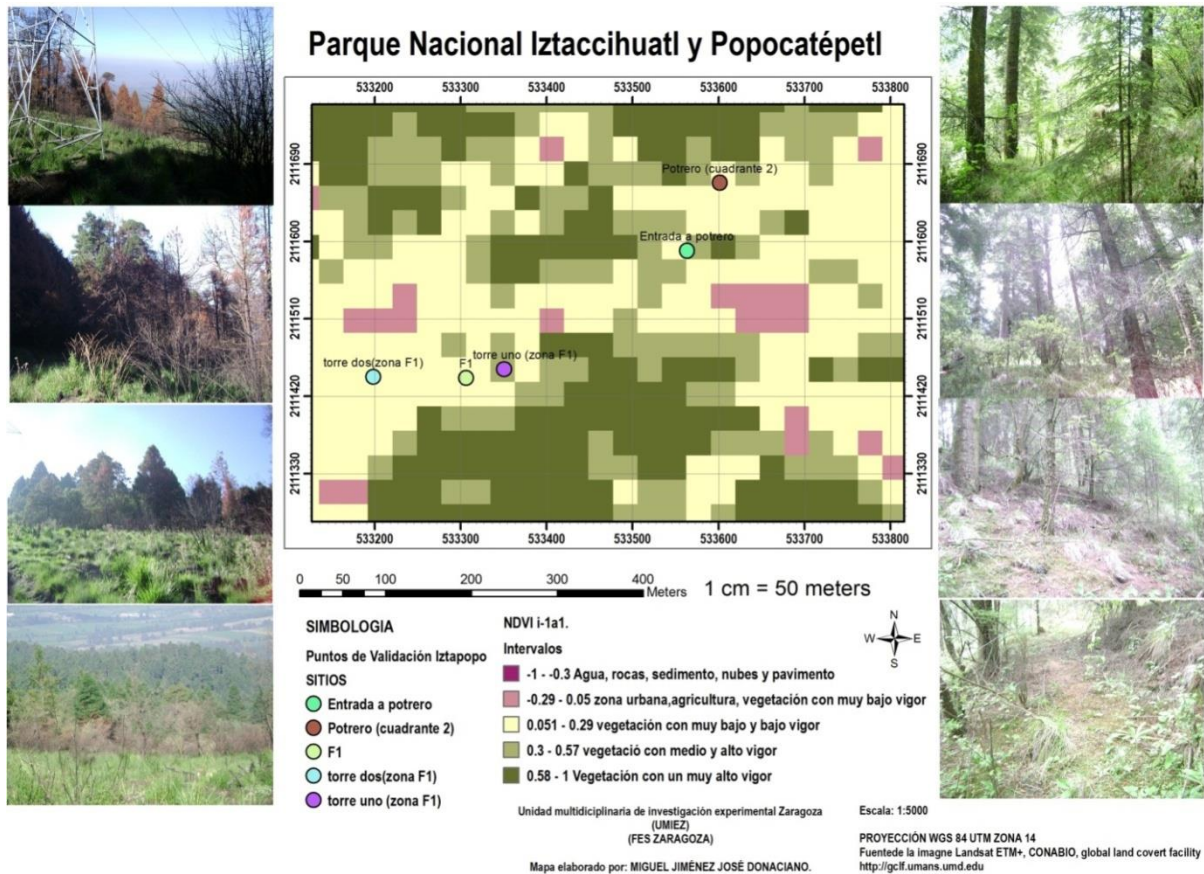


Figura 20.-Sitios de validación PNIP. Puntos Potrero y F1.

En otro punto de esta zona, el sitio denominado Tomacoco 2, se caracterizó, en la imagen de vigor, por colores de pixel rosas y con poca frecuencia morados claros. En la validación física, este sitio presentó zonas de cultivo con basura en las zonas circundantes (Figura 21).



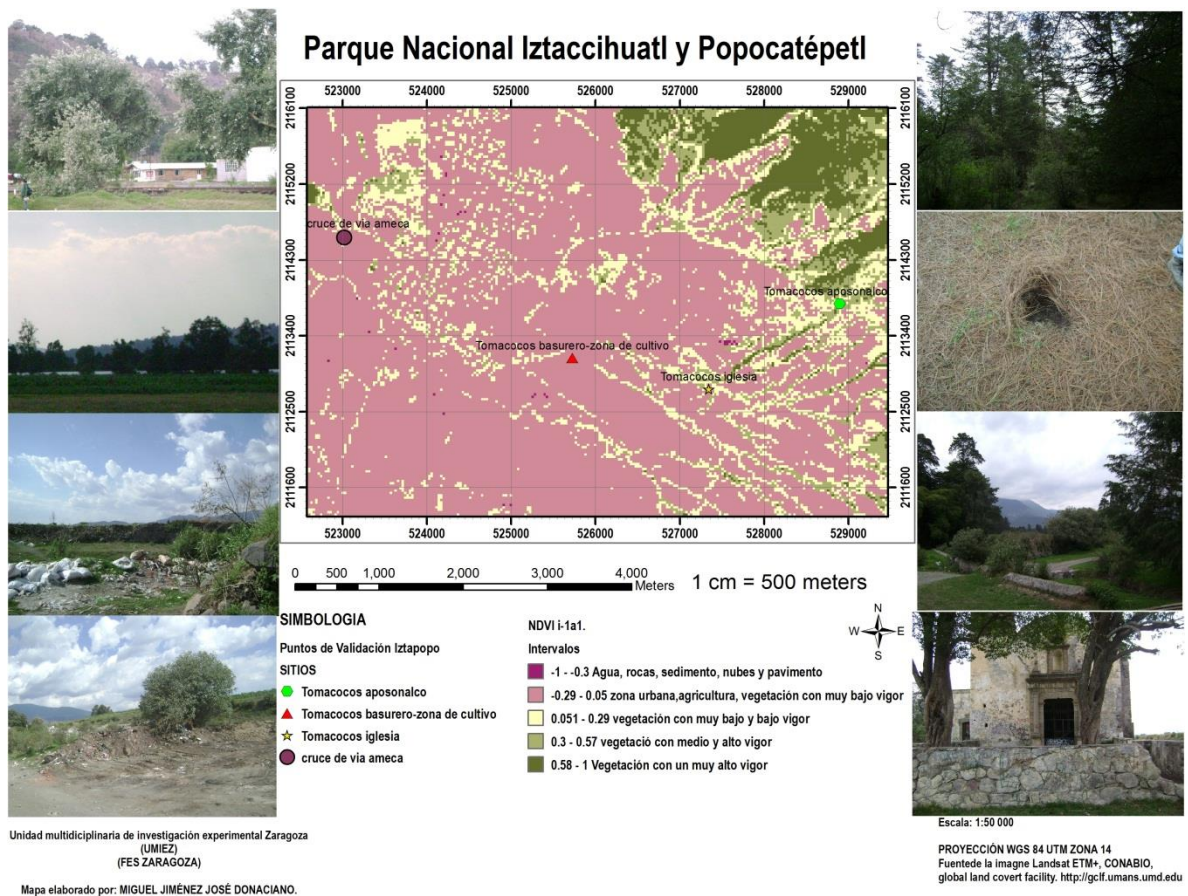


Figura 21.-Sitios de validación PNIP. Puntos Tomacoco y Cruce via Ameca.

#### 7.4.-Producción Maderable y su Relación con el Vigor de la Vegetación.

Respecto del volumen maderable en la zona de IztaPopo se encontró, con el levantamiento ecológico y dasométrico, que el sitio denominado Santa Isabel tuvo un volumen maderable de  $84.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . En este sitio se cuantificaron 95 árboles, de los cuales diez fueron del género *Cupressus* y cuatro del género *Garrya*, los restantes pertenecieron a la especie *A. religiosa*. También, se observó un 18% de tala, pero con repoblamiento de brinzales de oyamel en mayor proporción (Cuadro 9), coincidiendo así con un valor de vigor alto (0.7) en la zona.

En el otro punto de validación en IztaPopo (Potrero), ubicado en la zona de los sitios denominados F1 y O 1 3, se cuantificaron 89 árboles de los cuales uno fue de *Pinus sp* y el resto de *A. religiosa*. En este sitio, se observó un estrato arbóreo alto con una altura promedio de 14.8 m y una cobertura de 5.5 m. En este lugar se encontró un 26% de tala, mientras que la producción de madera fue de  $64.4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  y al igual que el sitio anterior, un vigor alto (0.61).

De la zona de Zoquiapan y Anexas, en el sitio conocido como Punto 24 (correspondiente al Cuadrante 4), se contaron 55 individuos con mayor porcentaje de juveniles. Se observaron individuos de **Cupressus sp**, **Pinus sp**. y **Arbutus**. El volumen maderable fue de 25.1 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> y según la imagen del vigor, se tuvo un valor medio (0.47). En esta misma zona, hacia el este se tomo otro punto respecto del Sitio 24, ubicado a 3149m snm y que correspondió al cuadrante tres. En este punto, la vegetación más frecuente fue **P. teocote** y **Pinus sp**. y se apreció abundante vegetación sana, con árboles de aproximadamente 35 m de alto, reflejando un vigor alto (0.65) en la imagen de satélite.

Cuadro 9.- Sitios de validación ecológica y productividad forestal.

| SITIOS       | COORDENADAS |         | ALTITUD<br>m snm | ANP | VIGOR | NIVEL DE<br>VIGOR | DENSIDAD             |    |    |       | TOCONES | COBERTURA                       |       |        | VOLUMEN DE<br>MADERA<br>m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> |
|--------------|-------------|---------|------------------|-----|-------|-------------------|----------------------|----|----|-------|---------|---------------------------------|-------|--------|---|
|              | NAD 27      |         |                  |     |       |                   | Ind ha <sup>-1</sup> |    |    |       |         | m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> |       |        |   |
|              | X           | Y       |                  |     |       |                   | B                    | J  | A  | TOTAL |         | B                               | J     | A      |   |
| Santa Isabel | 529712      | 2119977 | 3061             | 1   | 0.7   | ALTO              | 18                   | 37 | 17 | 95    | 23      | NP                              | 337   | 904    | 84.58   |
| Potrero      | 533602      | 2111542 | 3346             | 1   | 0.61  | ALTO              | 12                   | 41 | 20 | 89    | 16      | NP                              | 1031  | 16415  | 64.43   |
| 3            | 524511      | 2140977 | 3149             | 2   | 0.65  | ALTO              | SD                   | SD | SD | SD    | SD      | SD                              | SD    | SD     | SD  |
| Punto 24     | 523629      | 2141260 | 3003             | 2   | 0.47  | MEDIO             | 6                    | 42 | 7  | 55    | 0       | 1.33                            | 29.55 | 251.86 | 25.1  |

B= brinjal, J= juvenil; A= adulto; Ind= individuos. ANP= Área Natural Protegida 1= Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y 2= Parque Nacional Zoquiapan y Anexa. NP= NO PRESENTO. SD= SIN DATO

Además de los datos de volumen maderable ya presentados, éstos se complementaron con los del estudio de Valderrábano (2012) en el Parque Nacional Iztacpopo (en proceso de impresión). Con ambos datos se estructuró el Cuadro 10. En él se encontró que los sitios con mayor volumen de madera corresponden con valores de vigor alto, con bosques de **A. religiosa** y pH del suelo ligeramente ácido y mayor acumulación de materia orgánica.

Cuadro 10.- Sitios de validación ecológica descrito por Valderrábano (2012) y productividad forestal de menor a mayor volumen maderable.

| NOMBRE                        | COORDENADAS NAD 27 |         | ALTITUD<br>m snm | PENDIENTE<br>% | pH<br>(H <sub>2</sub> O) | MOS<br>% | NITRÓGENO           |                       | C=N    | VOLUMEN<br>MADERABLE | VIGOR  | NIVEL DE<br>VIGOR | VEGETACIÓN  |
|-------------------------------|--------------------|---------|------------------|----------------|--------------------------|----------|---------------------|-----------------------|--------|----------------------|--------|-------------------|---|
|                               | X                  | Y       |                  |                |                          |          | TOTAL EN SUELO<br>% | EN TEJIDO FOLIAR<br>% |        |                      |        |                   |   |
| La Venta                      | 542010             | 2121193 | 3696             | 21             | 5.2                      | 4.9      | 0.97                | 0.84                  | 58.03  | 202.68               | 0.423  | MEDIO             | <i>P. hartwegii</i>   |
| SW Barranca Tlalquecotchcotl  | 534716             | 2111918 | 3550             | 45             | 5.4                      | 12.11    | 4.82                | 1.3485                | 26.219 | 1386.72              | 0.79   | ALTO              | <i>P. hartwegii</i> ,<br><i>A. religiosa</i>  |
| La Ventana                    | 538910             | 2110546 | 3615             | 8              | 6.1                      | 5.13     | 3.74                | 1.04                  | 15.75  | 1486.83              | 0.3    | BAJO              | <i>P. hartwegii</i>   |
| S Barranca Tlalquecotchcotl 1 | 542286             | 2110002 | 3333             | 60             | 5.2                      | 7.43     | 5.68                | 0.76                  | 15.01  | 1929.20              | 0.503  | MEDIO             | <i>Pinus sp.</i>  |
| D 11                          | 541221             | 2114562 | 3540             | 35             | 5.6                      | 10.05    | 3.66                | 0.9                   | 31.54  | 2662.09              | 0.385  | BAJO              | <i>P. hartwegii</i> ,<br><i>A. religiosa</i>  |
| F 11                          | 532177             | 2094455 | 2834             | 60             | 5.9                      | 8.45     | 2.49                | 0.99                  | 38.92  | 3360.45              | 0.205  | BAJO              | <i>Pinus sp.</i> ,<br><i>A. religiosa</i> ,<br><i>Quercus sp.</i> ,<br><i>Aile</i> ,<br><i>Cupressus lusitánica</i> . |
| O 16                          | 544221             | 2109851 | 3127             | 16             | 5.6                      | 0.95     | 0.83                | 0.76                  | 13.06  | 3645.52              | 0.34   | BAJO              | <i>Pinus sp.</i>  |
| O 18                          | 543181             | 2114683 | 3281             | 45             | 6.3                      | 2.39     | 1.11                | 0.73                  | 24.78  | 4099.61              | 0.68   | ALTO              | <i>A. religiosa</i> ,<br><i>Pinus sp.</i> ,<br><i>Cupressus lusitánica</i> ,<br>cultivo y pastizal                    |
| Tlalcomajada E de Tetorre     | 541942             | 2115007 | 3667             | 60             | 5.8                      | 8.45     | 3.88                | 1.03                  | 25.02  | 4744.27              | 0.433  | MEDIO             | <i>P. hartwegii</i>   |
| Pela Gallina                  | 532240             | 2107789 | 2965             | 4              | 6.5                      | 6.25     | 5.79                | 1.33                  | 11.27  | 6684.49              | 0.37   | BAJO              | <i>A. religiosa</i> ,<br><i>Pinus sp.</i> ,<br><i>Cupressus lusitanica</i>  |
| La Laguna Xahuehahuatlalco    | 542529             | 2121800 | 3512             | 61             | 4.9                      | 6.86     | 2.22                | 0.66                  | 35.54  | 7593.19              | 0.422  | MEDIO             | <i>Pinus sp.</i> ,<br><i>A. religiosa</i>   |
| SE Barranca Tlalquecotchcotl  | 541056             | 2110845 | 3418             | 20             | 6.2                      | 5.67     | 4.16                | 0.86                  | 15.67  | 7791.54              | 0.14   | MUY BAJO          | <i>Pinus sp.</i>  |
| Barranca Apapaxco             | 534939             | 2110074 | 3522             | 20             | 5.4                      | 4.2      | 3.87                | 1.73                  | 11.33  | 8463.70              | 0.28   | BAJO              | <i>P. hartwegii</i>   |
| F 5                           | 542103             | 2114526 | 3425             | 40             | 5.7                      | 7.98     | 4.99                | 0.91                  | 18.36  | 14404.60             | 0.495  | MEDIO             | <i>A. religiosa</i> ,<br><i>P. hartwegii</i>  |
| S Barranca Tlalquecotchcotl 2 | 541183             | 2121616 | 3828             | 24             | 4.6                      | 7.35     | 2.77                | 0.81                  | 30.47  | 14960.08             | -0.098 | MUY BAJO          | <i>P. hartwegii</i>   |
| Chalchoapa NE de Tetorre      | 531440             | 2112175 | 2932             | 80             | 6.8                      | 3.216    | 3.74                | 1.32                  | 9      | 20297.63             | 0.66   | ALTO              | <i>A. religiosa</i>   |
| Agua Escondida                | 532250             | 2102150 | 3225             | 55             | 6.2                      | 7.48     | 1.26                | 0.6                   | 62.07  | 26218.81             | 0.712  | ALTO              | <i>A. religiosa</i>   |

C:N= relación Carbono-Nitrógeno del suelo.

## 7.5.-Reacción del Suelo y su Relación con el Vigor de la Vegetación.

### 7.5.1.-pH Activo

El pH activo del PNIP se encontró de 4.4 a 6.8 con promedio de 5.9 unidades (de ligeramente a extremadamente ácido). Los suelos más ácidos se observaron en el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas, mientras que del lado del Parque Iztapopo se encontraron las zonas menos ácidas y con más verdor (Figura 22).

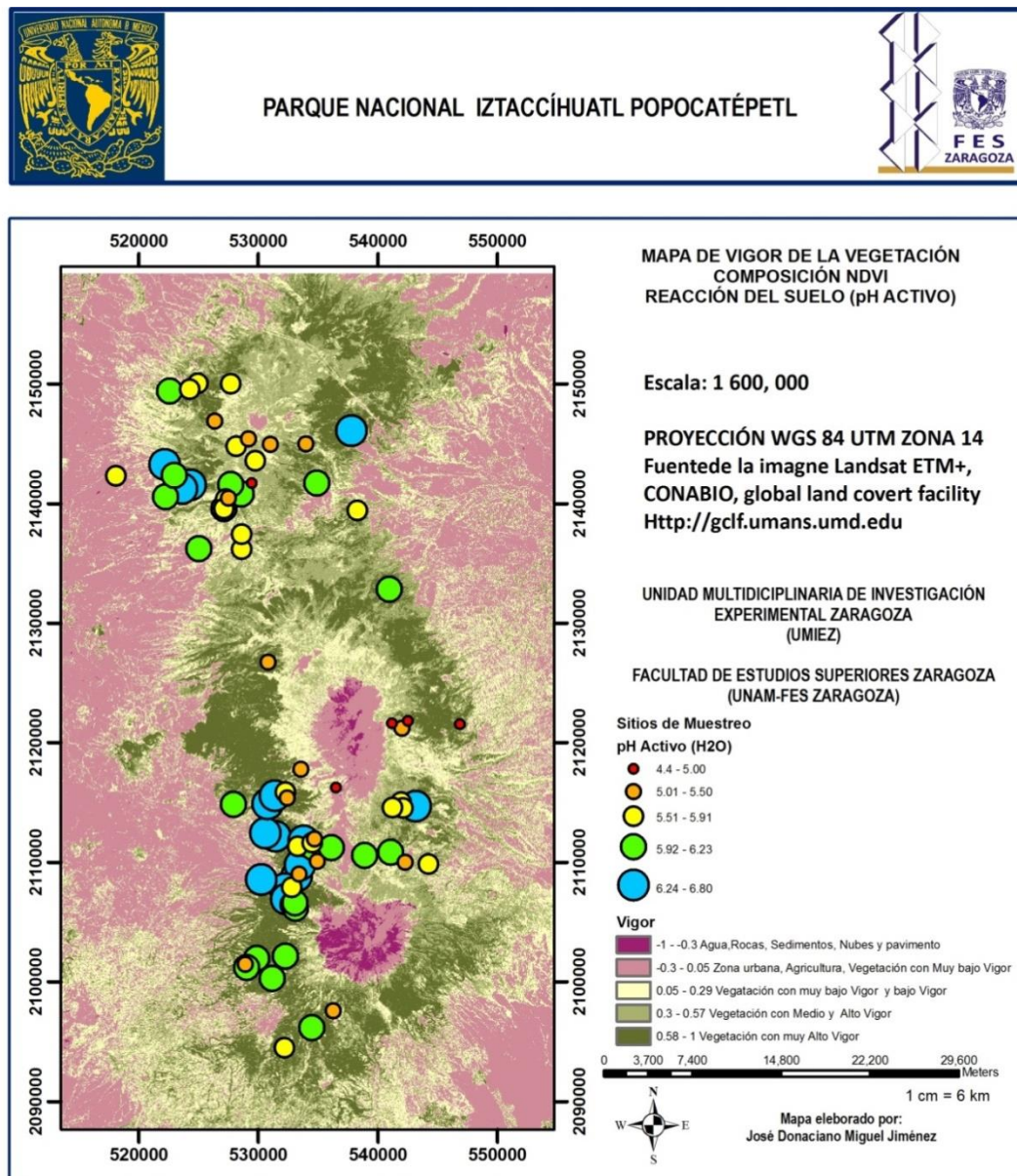


Figura 1.-Reacción del suelo (pH Activo) y vigor de la vegetación.

De 77 sitios evaluados, 32 se ubicaron entre 5.9 y 6.4 unidades de pH y de acuerdo con Anaya *et al.*, (1991) se clasificaron como moderadamente ácidos (Cuadro 11).

Cuadro 11.- Grado de acidez de los suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

| pH activo  | No. Sitios | Sitios<br>% | pH           |  | Grado de Acidez       |
|------------|------------|-------------|--------------|--|-----------------------|
|            |            |             | Anaya (1990) |  |                       |
| 4,4 a 4,9  | 4          | 5           | <4.5         |  | Extremadamente ácido  |
| >4,9 a 5,4 | 9          | 12          | 4.6 a 5.0    |  | Muy fuertemente ácido |
| >5,4 a 5,9 | 25         | 32          | 5.1 a 5.5    |  | Fuertemente ácido     |
| >5,9 a 6,4 | 32         | 42          | 5.6 a 6.0    |  | Moderadamente ácido   |
| >6,4 a 6,9 | 7          | 7           | 6.1 a 6.5    |  | Ligeramente ácido     |
|            |            |             | 6.6 a 7.3    |  | Neutro                |

PNIP= Parque Nacional Iztaccíhuatl y Popocatepetl; No.= Número de sitios en el intervalo.

El valor mínimo de pH activo se localizó en el sitio **40** (cumbre del volcán Tláloc) de la zona de Zoquiapan y Anexas a 4100 m snm, con pendiente igual a 19% y con *P. hartwegii* sobre suelo Andosol húmico-Andosol vítrico. Por otro lado, el valor máximo se estableció en el sitio **O-18**, ubicado en la zona de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, a 2932 m snm, con pendiente de 80%, exposición NE y *A. religiosa* sobre suelo Andosol húmico-Andosol dístico (Miehlich 1980). La relación entre pH activo y altitud demostró tendencia negativa ( $r=-0.5$ ) y significativa ( $p\leq 0.05$ ) en la cual indica que conforme aumenta la altitud el pH activo se acidifica (Figura 23).

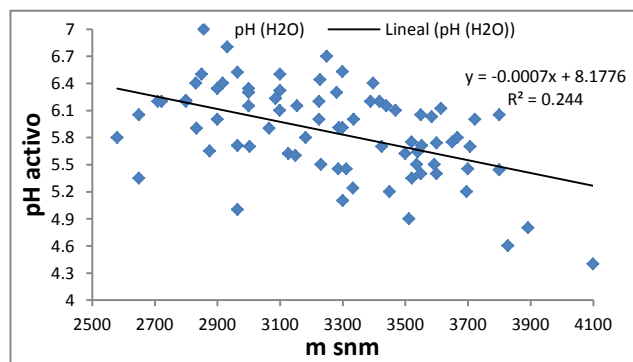


Figura 22.- Relación entre altitud y pH activo.

El estudio por intervalo altitudinal demostró que de 2580 a 2884 m snm y de >2884 a 3188 m snm el grado de acidez fue ligeramente ácido, ya que el primero fue de 6.04 y el segundo de 6.07. En el primer intervalo se encontró *P. teocote* y *P. montezumae* sobre suelo Andosol molico y en el segundo se observó *P. pseudostrobus*, sobre Andosol húmico-Andosol vítrico y Andosol molico-Andosol húmico/ocrico (Miehlich 1980). Los intervalos de >3188 a 3492 y de >3492 a 3796 m snm se clasificaron como moderadamente ácidos y tal diferencia con los intervalos anteriores se atribuye al

tipo de vegetación y suelo, ya que en los dos últimos intervalos se encontró *Abies religiosa* sobre Andosol vítrico y *P. hartwegii* sobre Andosol húmico-Andosol vítrico respectivamente.

En el último intervalo altitudinal (>3796 a 4100 m snm) el pH activo disminuyó a 5.06 (fuertemente ácido) y corresponde a la zona donde domina *P. hartwegii* sobre suelo Andosol húmico-Andosol vítrico (Cuadro 12).

Cuadro 12.- Grados de acidez por intervalo altitudinal de los suelos de Parque Nacional Iztaccíhuatl y Popocatepetl.

| Altitud       | pH activo H <sub>2</sub> O 1:2 | Acidez (Anaya, 1991) | Vegetación                                 | Suelo dominante   |   |
|---------------|--------------------------------|----------------------|--|---|---|
|               |                                |                      |  | WRB (2006)  | (Miehlich, 1980)  |
| 2580 a 2884   | 6.04                           | Ligeramente ácido    | <i>P. teocote</i> y <i>P. montezumae</i> . | Andosol molico, Andosol húmico/ocrico, Andosol vítrico. | Andosol cambitxico, Andosol cambandos, Andosol humandos |
| >2884 a 3188  | 6.07                           | Ligeramente ácido    | <i>P. pseudostrobus</i>                    | Andosol molico, Andosol húmico/ocrico.                  | Andosol cambitxico, Andosol cambandos,                  |
| >3188 a 3492  | 5.94                           | Moderadamente ácido  | <i>A. religiosa</i>                        | Andosol vítrico.  | Andosol humandos  |
| >3492 a -3796 | 5.63                           | Moderadamente ácido  | <i>P. hartwegii</i>                        | Andosol húmico, Andosol vítrico.                        | Andosol cambandos, Andosol humandos                     |
| >3796 a 4100  | 5.06                           | Fuertemente ácido    | <i>P. hartwegii</i>                        | Andosol húmico, Andosol vítrico.                        | Andosol cambandos, Andosol humandos                     |

Con respecto al pH activo y su relación con los diferentes tipos de suelo del PNIP, el análisis de varianza demostró diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) entre las unidades de suelo B2, C1, D3, K1, I2, L, I3, y M1. El análisis de la Figura 24, indicó que las unidades de suelo K1 (Andosol vítrico) y M1 (Andosol molico-Andosol húmico/ocrico) tuvieron los valores de pH activo más ácidos, mientras que las unidades de suelo I2 (Andosol húmico-Cambisol dístico) e I3 (Andosol húmico-Andosol húmico/ocrico) fueron los suelos menos ácidos.

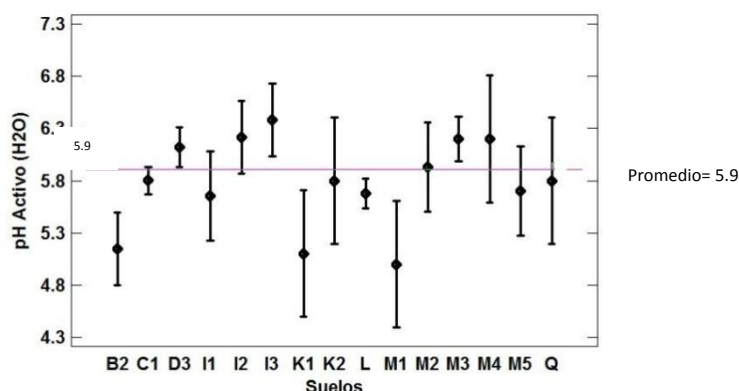


Figura 23.-Análisis de varianza entre suelos y pH activo. (Unidades de suelo en el Cuadro 3)

Como se aprecia en la Figura 24, la mayor parte de los suelos presentaron un nivel ácido, característico de este tipo de suelos y vegetación. Por lo tanto se consideró importante analizar la relación entre el pH activo en función de la vegetación del PNIP. En este sentido, el análisis de varianza demostró diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) entre los suelos bajo bosques de *Pinus* con los de

**A. religiosa**, dado que suelos bajo esta especie tuvieron un valor promedio de pH activo igual a 6.2 y suelos bajo **Pinus** de 5.7 (Figura 25).

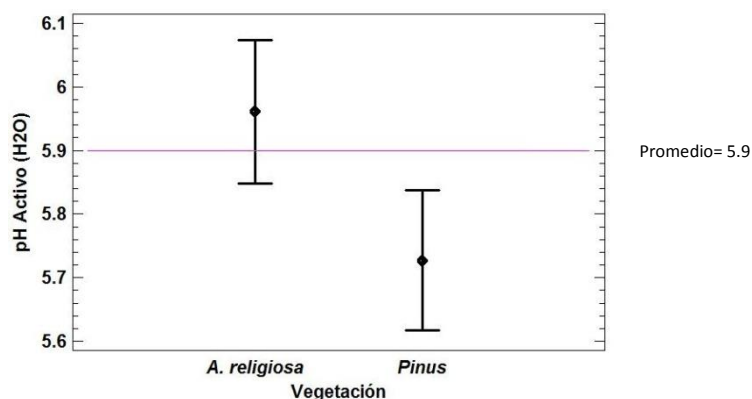


Figura 24.-Análisis de Varianza para pH Activo y *A. religiosa* y *Pinus*. Diferencia estadística= 0.24,  $\pm$  0.22 unidades de limite.

De la orientación de la pendiente en los sitios, que tiene repercusiones en la intensidad lumínica y funcionamiento de las comunidades debido a cambios en la tasa fotosintética, productividad, temperatura, disponibilidad de agua y actividad de los microorganismos del suelo, se consideró un factor importante en relación con la reacción del suelo. Para ello, mediante un análisis de varianza, se encontró que los sitios con exposición N tuvieron pH activo más ácido (Figura 26).

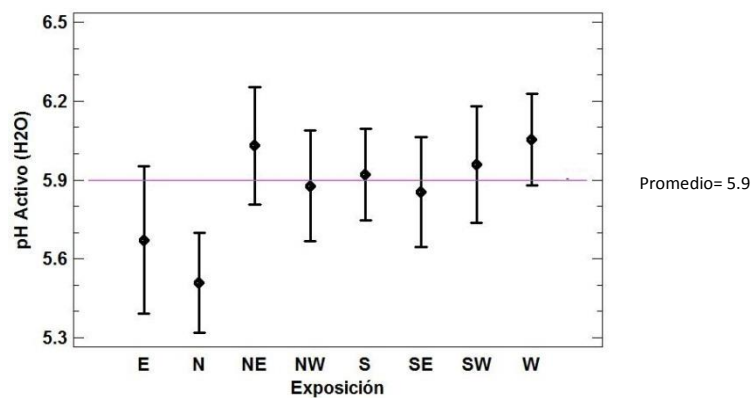


Figura 25.-Análisis de Varianza para pH Activo y exposición.

### 7.5.2-pH Potencial.

El pH potencial del PNIP se encontró en un intervalo de 3.6 unidades (sitio **La Papa Acatzi**) a 5.9 (sitio **O-1**) con promedio de 4.82. De 77 sitios estudiados, 27 se establecieron en el intervalo de 4.99 a 5.44. Así, los sitios menos ácidos se ubicaron en la vertiente occidental del Parque (Figura 27). En la misma figura se pudo observar que la mayor frecuencia de sitios con pH menor a 4.6 corresponde con las zonas de mayor altitud y menor vigor.

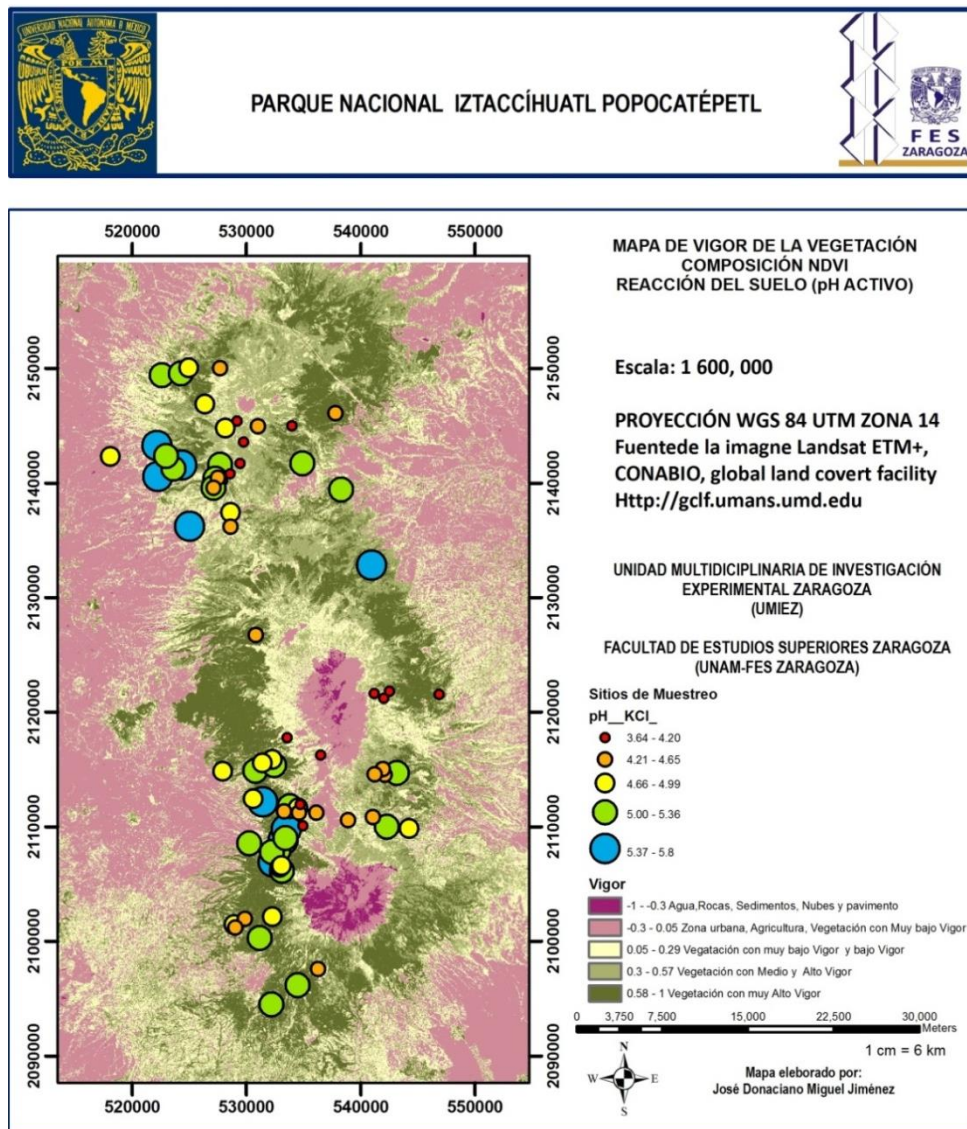


Figura 26.- Reacción del suelo (pH Potencial) y vigor de la vegetación.



El sitio con el pH potencial mínimo se localizó en la zona de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl a 2964 m snm, pendiente de 15%, exposición SE y con *P. montezumae*-*P. patula* como vegetación dominante; mientras que, el pH potencial menos ácido se ubicó en la misma zona a 3250 m snm, con una inclinación del terreno de 65%, exposición S y con *P. montezumae* y *A. religiosa*.

Con la Figura 28, se observó la relación entre pH potencial y altitud, cuya tendencia, según el análisis estadístico, fue negativa ( $r = -0.53$ ) y significativa ( $p \leq 0.05$ ).

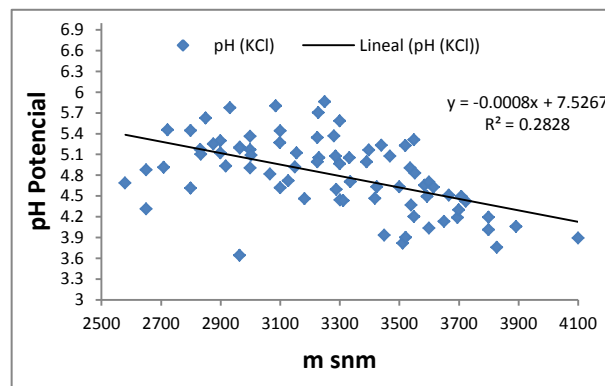


Figura 27.-Relación entre altitud y pH potencial.

Similar a lo observado entre el pH activo y la vegetación, el pH potencial más ácido se encontró en suelos bajo bosques de *Pinus* con un pH promedio de 4.6, en tanto que, en suelos bajo *A. religiosa* tuvo un valor promedio de 5.13 unidades de pH (Figura 29).

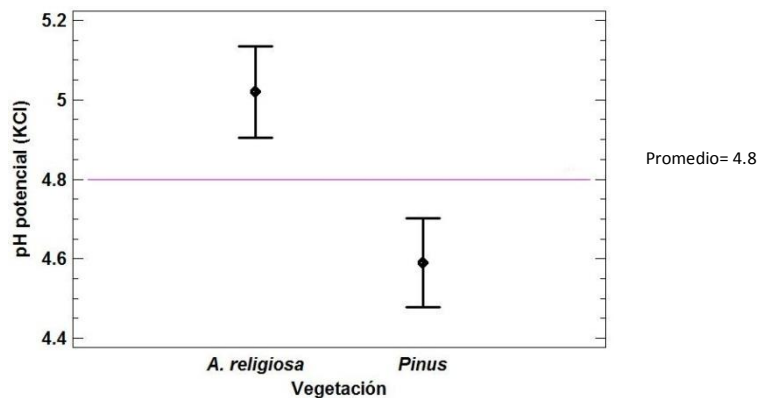


Figura 28.-pH potencial en bosques de *Pinus* y *A. religiosa*. Diferencia estadística de 0.43.,  $\pm 0.22$  unidades de límite.

Con respecto al efecto de la exposición a lo largo del gradiente altitudinal, se realizó un análisis de varianza para determinar las diferencias existentes entre la exposición y el pH potencial. El análisis de varianza demostró diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) con las exposiciones N, indicando que esta orientación tuvo los suelos más ácidos (Figura 30).

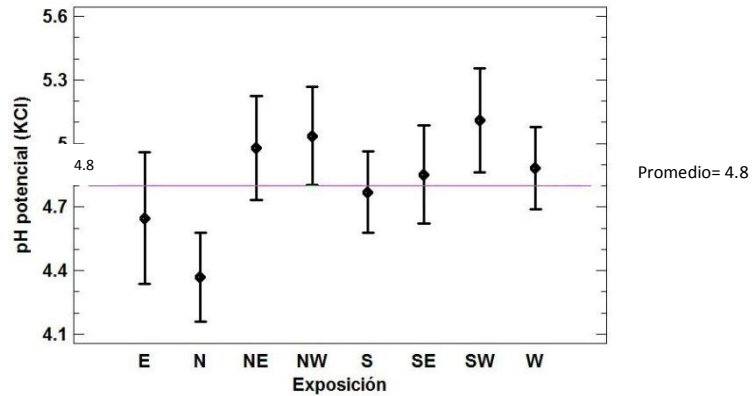


Figura 29.-Análisis de varianza de exposición y pH potencial.

### 7.5.3.-Vigor de la Vegetación y la Reacción del Suelo.

Con referencia al vigor de la vegetación (NDVI) y su relación con la reacción del suelo, se sabe que la disponibilidad de los nutrientes tomados del suelo por las plantas están en función directa del pH del suelo (Ibarra *et al.*, 2009), lo cual se refleja en la productividad y vigor de la vegetación. En este trabajo se encontró una tendencia positiva entre el vigor de la vegetación con el pH activo ( $r=0.3$ ) (Figura 31) y pH potencial ( $r=0.4$ ) (Figura 32), en ambos casos, el nivel de significancia fue ( $p \geq 0.05$ ).

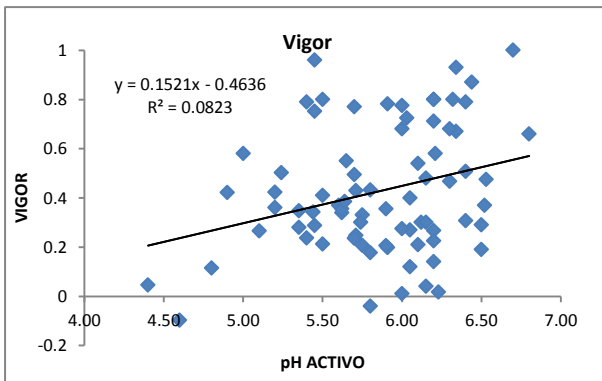


Figura 30.- Relación del vigor de la vegetación y el pH activo.

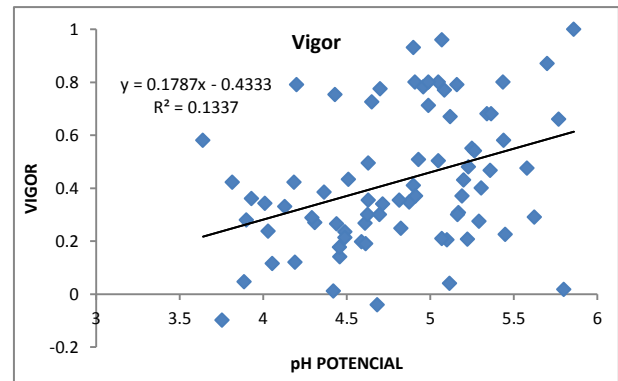


Figura 31.- Relación del vigor de la vegetación y el pH potencial.

Al analizar los datos de pH por intervalo altitudinal (Cuadro 13) se observó que a mayor acidez, el vigor de la cobertura vegetal disminuye. Se encontró que a más de 3500 m snm, donde domina ***P. hartwegii***, corresponde a la región con los suelos más ácidos y con menor vigor de la vegetación.

Cuadro 13.- Promedio por intervalo altitudinal de NDVI y pH Potencial .

| Altitud<br>m snm | pH potencial         |         | Vigor de la Vegetación | Vegetación más frecuente                 |
|------------------|----------------------|---------|------------------------|--|
|                  | H <sub>2</sub> O 1:2 | KCl 1:2 |                        |  |
| 2580-2884        | 6.04                 | 5.04    | 0.35                   | <i>P. teocote</i> y <i>P. montezumae</i> |
| 2884-3188        | 6.07                 | 5.04    | 0.44                   | <i>P. pseudostrabus</i>                  |
| 3188-3492        | 5.94                 | 4.98    | 0.61                   | <i>A. religiosa</i>                      |
| 3492-3796        | 5.63                 | 4.48    | 0.35                   | <i>P. hartwegii</i>                      |
| 3796-4100        | 5.06                 | 3.98    | 0.11                   | <i>P. hartwegii</i>                      |

Al analizar el pH y su relación con el vigor de la vegetación por tipos de bosque (Cuadro 14), se encontró que los suelos bajo ***A. religiosa*** y ***A. religiosa asociado*** con otras especies, principalmente de hoja ancha, tuvieron el pH menos ácido y en consecuencia el mayor vigor de la vegetación.

Cuadro 14.- Promedio por vegetación y su relación con el pH y el NDVI.

| Vegetación                     | pH                   |         | Vigor |
|--------------------------------|----------------------|---------|-------|
|                                | H <sub>2</sub> O 1:2 | KCl 1:2 |       |
| <i>A. religiosa</i>            | 6.15                 | 5.13    | 0.60  |
| <i>A. religiosa-asociación</i> | 5.79                 | 4.90    | 0.49  |
| <i>Pinus</i>                   | 5.73                 | 4.59    | 0.31  |

## 7.6.-Porcentaje de Materia Orgánica del Suelo (MOS).

El contenido de MOS se encontró de 0.49 a 22.8 % con promedio de 8.4. De los 77 sitios evaluados, 29 de ellos se ubicaron entre 5.1 y 9.7%, y de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-REC NAT-021-2000, tuvieron un contenido medio de MOS (Cuadro 15). En el mapa de la Figura 33, se pudo apreciar que en las dos regiones que componen a la Sierra Nevada, fue en la de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl donde se presentó la mayor frecuencia de sitios con más porcentaje de MOS (Figura 33).

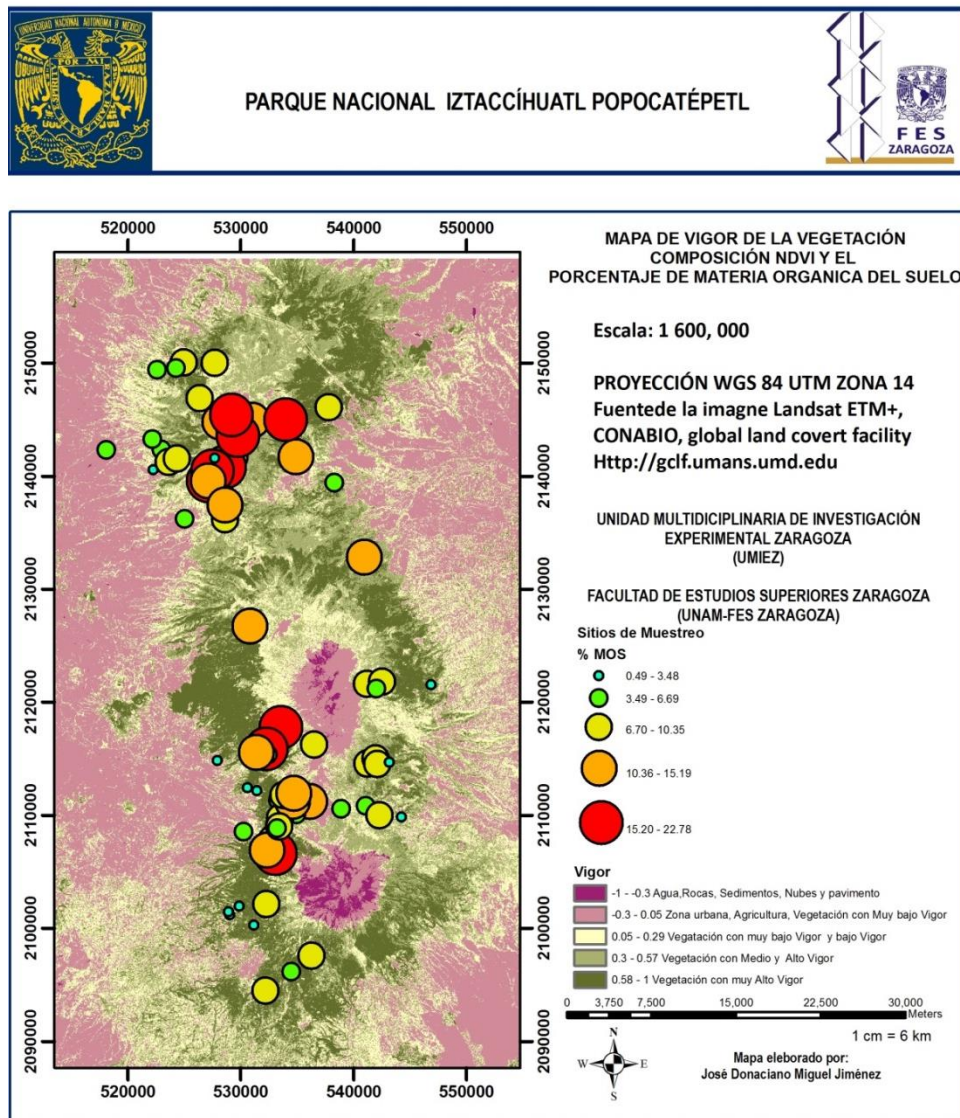


Figura 32.- Porcentaje de Materia Orgánica del Suelo y el vigor de la Vegetación.

Cuadro 15.- Intervalos de referencia del contenido de Materia Orgánica del suelo.

| MOS                 | No. de Sitios | *MOS Volcánicos | *Clase   |
|---------------------|---------------|-----------------|----------|
| Mg ha <sup>-1</sup> |               | %               |          |
| 0.49-5.09           | 22            | <4.0            | Muy bajo |
| >5.09-9.69          | 29            | 4.1-6.0         | Bajo     |
| >9.69-14.29         | 15            | 6.1-10.9        | Medio    |
| >14.9-18.89         | 9             | 11.0-16.0       | Alto     |
| >18.89-22.78        | 2             | >16.1           | Muy alto |

\*Clases de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-SEMARNAT-2000

El valor mínimo de MOS se localizó en el sitio **La Papa Acatzi**, de la zona denominada como Iztaccíhuatl-Popocatepetl a 2580 m snm, con pendiente de 15%, exposición SE y en suelos bajo **P. montezumae** y **P. patula**, mientras que el mayor porcentaje se estableció en el sitio denominado **Coronilla**, ubicado en la misma zona pero a 3600 m snm, con 35% de pendiente, exposición S y bajo **P. hartwegii** como vegetación dominante. En la Figura 34 se observa la relación entre el porcentaje de MOS y altitud, cuyo análisis estadístico demostró una tendencia positiva ( $r= 0.5$ ) y significativa ( $p\leq 0.05$ ).

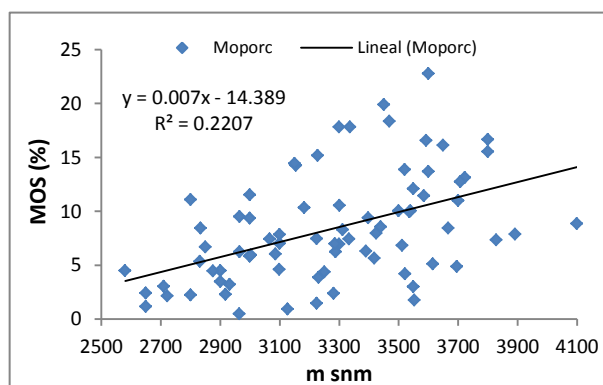


Figura 33.-Relación entre porcentaje de MOS y altitud.

De acuerdo con el Cuadro 16, el intervalo altitudinal que va de 2580 a 3188 m snm, tuvo un contenido de MOS bajo según la NOM. El intervalo altitudinal que va de >3188 a 3796 m snm tuvo una clasificación media de MOS y de 3796 a 4100 m snm fue alto.

Cuadro 16.- Los valores de referencia por intervalo de altitud para clasificar la concentración de la MOS volcánicos.

| Altitud       | Vegetación                                | MOS   |       | Suelo dominante   |
|---------------|---|-------|-------|---|
|               |   | %     | Clase |   |
| 2580 a 2884   | <b>P. teocote</b> y <b>P. montezumae.</b> | 4.7   | bajo  | Andosol molico, Andosol húmico/ocrico, Andosol vítrico. |
| >2884 a 3188  | <b>P.pseudostrobus</b>                    | 6.78  | bajo  | Andosol molico, Andosol húmico/ocrico.                  |
| >3188 a 3492  | <b>A.religiosa</b>                        | 9.2   | medio | Andosol vítrico.  |
| >3492 a -3796 | <b>P. hartwegii</b>                       | 10.4  | medio | Andosol húmico, Andosol vítrico.                        |
| >3796 a 4100  | <b>P.hartweggi</b>                        | 11.27 | alto  | Andosol húmico, Andosol vítrico.                        |

Dada su importancia en la fertilidad de los suelos, se considero necesario analizar la relación entre MOS y el pH activo y potencial. Al analizar los datos por intervalo altitudinal se encontró que la MOS se acumula a mayor altitud y provoca que el suelo se acidifique más, lo cual se corroboró con la correlación obtenida del análisis estadístico, cuyo coeficiente fue de -0.3 y  $p \leq 0.05$ .

La relación entre tipo de vegetación y porcentaje de MOS indicó que los suelos bajo *A. religiosa* tienen mayor acumulación de MOS que sitios con *Pinus* (Figura 35).

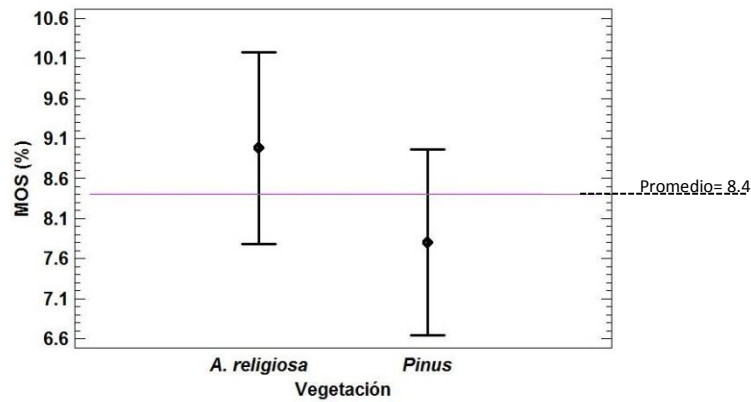


Figura 34.-Análisis de varianza para MOS y la vegetación. *A. religiosa* y *Pinus*.

Para conocer el efecto de la orientación de la pendiente en la acumulación de la MOS, se procedió a realizar un ANDEVA, el cual demostró que las orientaciones SW ( $p \leq 0.05$ ) poseen mayor porcentaje de MOS en comparación con las W (Figura 36).

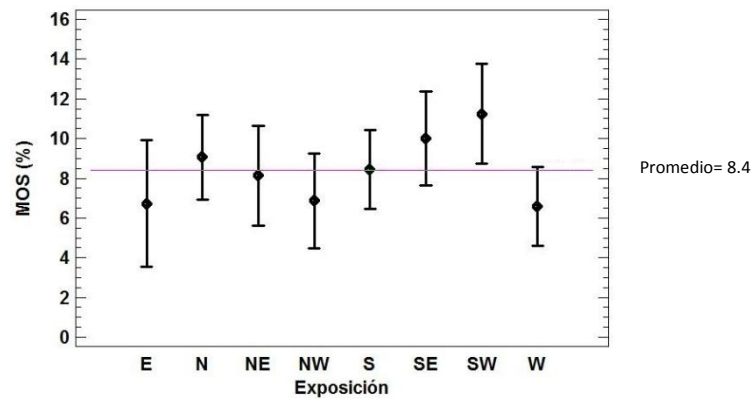


Figura 35.-ANOVA Multifactorial entre MOS porcentual y Exposición. Diferencia estadística en SW-W= 4.66,  $\pm 4.53$  unidades de limite.

### 7.6.1.-Vigor de la Vegetación y Materia Orgánica del Suelo.

Con respecto a la relación entre la MOS y el vigor de la vegetación, se sabe que la cantidad de nutrientes transferidos por el desfronde de los árboles al suelo están en función de varios factores como biomasa vegetal, especies de plantas, tipo de hojarasca y concentración de nutrientes (Sánchez *et al.* 2005). De acuerdo con el análisis estadístico, no hubo relación significativa ( $p \leq 0.05$ ) entre MOS y vigor de la vegetación. Sin embargo, el análisis de los datos por intervalo altitudinal (Cuadro 17) indicó nuevamente que el mayor vigor promedio corresponde al intervalo altitudinal donde **A. religiosa** es más frecuente.

Cuadro 17.- Promedio de vigor de la vegetación, pH y MOS por intervalo altitudinal.

| msnm      | pH        |           | MOS   | Vigor | Vegetación más Frecuente                 |
|-----------|-----------|-----------|-------|-------|--|
|           | _H2O 1:2_ | _KCl 1:2_ |       |       |  |
| 2580-2884 | 6.04      | 5.04      | 4.70  | 0.35  | <i>P. teocote</i> y <i>P. montezumae</i> |
| 2884-3188 | 6.07      | 5.04      | 6.78  | 0.44  | <i>P. pseudostrabus</i>                  |
| 3188-3492 | 5.94      | 4.98      | 9.20  | 0.61  | <i>A. religiosa</i>                      |
| 3492-3796 | 5.63      | 4.48      | 10.40 | 0.35  | <i>P. hartwegii</i>                      |
| 3796-4100 | 5.06      | 3.98      | 11.27 | 0.11  | <i>P. hartwegii</i>                      |

En este contexto, con el Cuadro 18 se encontró que los sitios con un dosel constituido por **A. religiosa–Asociación**, tuvieron en promedio mayor contenido de MOS que los bosques monoespecíficos de **A. religiosa** y **Pinus**. No obstante, el mayor vigor de la cobertura vegetal se ubicó en sitios donde **A. religiosa** dominó la estructura del bosque.

Cuadro 18. Materia Orgánica del Suelo por tipo de vegetación y su relación con pH y vigor.

| Vegetación                      | pH    |       |       | MOS  | NDVI |
|---------------------------------|-------|-------|-------|------|------|
|                                 | _H2O_ | _KCl_ | _ % _ |      |      |
| <i>A. religiosa</i>             | 6.15  | 5.13  | 8.88  | 0.60 |      |
| <i>A. religiosa</i> -Asociación | 5.79  | 4.90  | 9.17  | 0.49 |      |
| <i>Pinus</i>                    | 5.73  | 4.59  | 7.64  | 0.31 |      |

## 7.7.-Nitrógeno.

### 7.7.1.- Porcentaje de Nitrógeno en Tejido Foliar.

El Nitrógeno foliar (N-foliar), se encontró de 0.4% a 1.9% con promedio de 1.2. De los sitios evaluados, 27 se ubicaron en el intervalo de 1.34 a 1.64% (Figura 37). El mayor contenido de N foliar se localizó en la vertiente occidental del Parque Nacional.

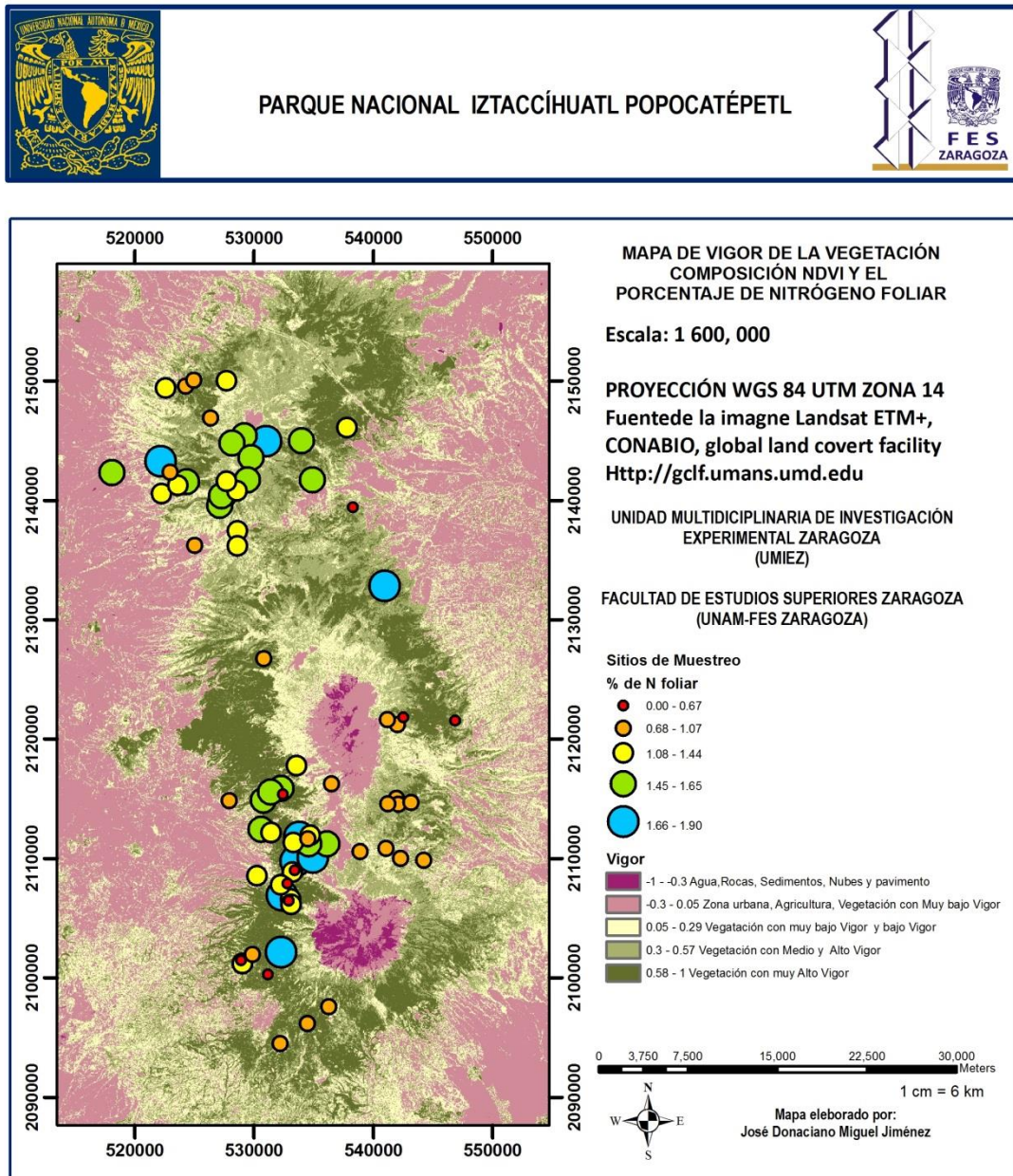


Figura 36.- Porcentaje de N en tejido foliar y vigor de la vegetación.



El porcentaje más bajo estuvo en el sitio identificado como **D11-Cañada La Coquia**, ubicado en la zona de Zoquiapan y Anexas, a 2965 m snm, con una inclinación del terreno de 25%, exposición SW y en donde la vegetación dominante fue la asociación **A. religiosa-Cupressus sp.** El valor máximo, se estableció en el sitio denominado como **2\_3**, ubicado también en Zoquiapan y Anexa, a 2800 m snm, en una superficie con 5% de pendiente, exposición SE y cuyo bosque colinda con un campo de Avena.

Debido a su importancia, se consideró necesario presentar la relación entre el pH y el porcentaje de N-foliar, dado que la reacción del suelo influye en la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Se encontró que con el aumento de pH activo se incrementó el contenido de N-foliar, lo cual quedó demostrado con el análisis estadístico, cuyo coeficiente de correlación fue igual a 0.4 con una  $p \leq 0.05$  (Figuras 38).

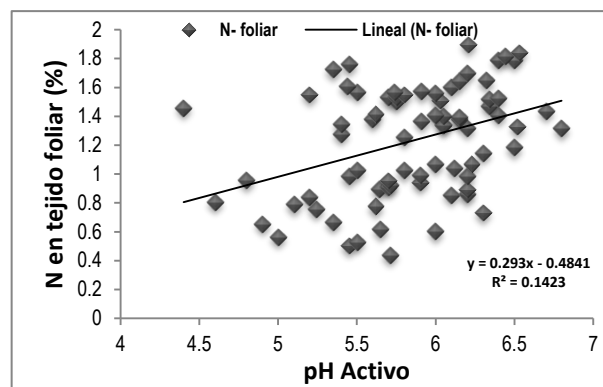


Figura 37.- Relación entre N foliar y pH activo.

Con la relación entre N-foliar y el porcentaje de MOS, se encontró que el N en las acículas de los individuos arbóreos aumenta cuando el contenido de MOS es mayor. El análisis de correlación mostró una tendencia positiva ( $r=0.45$ ) y significativa ( $p \leq 0.05$ ) que refuerza lo observado en la Figura 39.

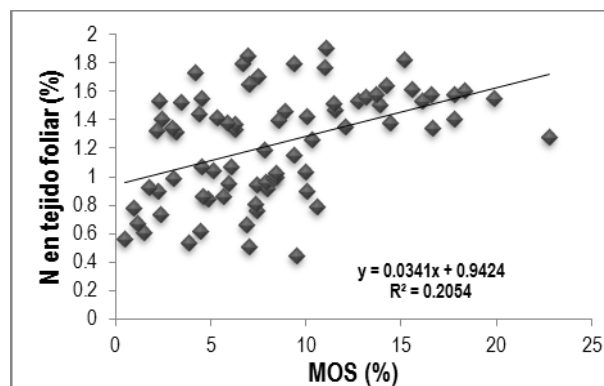


Figura 38.-Relación entre materia Orgánica del suelo y N-foliar.

Con el análisis del contenido de N-foliar para los sitios con bosque de *A. religiosa* y para los lugares con bosque de *Pinus* como vegetación dominante, se encontró que este nutrimento fue mayor en bosque de la primera especie (Figura 40).

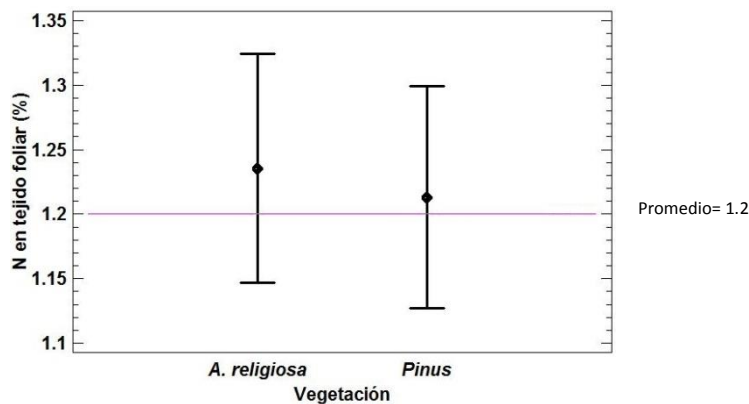


Figura 39. N foliar en bosque de *A. religiosa* y *Pinus*.

### 7.7.2.- Vigor de la Vegetación y Relación con Nitrógeno Foliar (N-Foliar).

El N-foliar fue variable en su relación con el vigor de la vegetación y al analizar el porcentaje por intervalo altitudinal, se observó que el mayor porcentaje promedio se ubica de 3492-3796 m snm (Cuadro 19), a mayor altitud el vigor disminuye.

Cuadro 19. Vigor de la vegetación y Nitrógeno foliar por intervalo altitudinal.

| m snm     | pH                        |                | MOS   | Tejido Foliar<br>% | Vigor | Vegetación más Frecuente                 |
|-----------|---------------------------|----------------|-------|--------------------|-------|--|
|           | <u>H<sub>2</sub>O 1:2</u> | <u>KCl 1:2</u> |       |                    |       |  |
| 2850-2884 | 6.04                      | 5.04           | 4.70  | 1.23               | 0.35  | <i>P. teocote</i> y <i>P. montezumae</i> |
| 2884-3188 | 6.07                      | 5.04           | 6.78  | 1.17               | 0.44  | <i>P.pseudostrobus</i>                   |
| 3188-3492 | 5.94                      | 4.98           | 9.20  | 1.21               | 0.61  | <i>A. religiosa</i>                      |
| 3492-3796 | 5.63                      | 4.48           | 10.40 | 1.30               | 0.35  | <i>P. hartwegii</i>                      |
| 3796-4100 | 5.06                      | 3.98           | 11.27 | 1.23               | 0.11  | <i>P. hartwegii</i>                      |

Con el análisis por tipo de vegetación, se encontró que los sitios con bosques de *A. religiosa* tienen en promedio mayor contenido de N-foliar, lo que reflejó un valor más alto de vigor en sus hojas. (Cuadro 20).

Cuadro 20.- Promedio por vegetación y su relación con el N foliar y el NDVI.

| Vegetación                     | pH                        |                | MOS  | Tejido Foliar<br>% | VIGOR |
|--------------------------------|---------------------------|----------------|------|--------------------|-------|
|                                | <u>H<sub>2</sub>O 1:2</u> | <u>KCl 1:2</u> |      |                    |       |
| <i>A. religiosa</i>            | 6.15                      | 5.13           | 8.88 | 1.40               | 0.60  |
| <i>A. religiosa-Asociación</i> | 5.79                      | 4.90           | 9.17 | 1.11               | 0.49  |
| <i>Pinus</i>                   | 5.73                      | 4.59           | 7.64 | 1.20               | 0.31  |

### 7.7.3.- Porcentaje de Nitrógeno en Mantillo.

Como el mantillo es considerado como la principal reserva de nutrimentos del suelo (Bosco *et al.*, 2004), se analizó el porcentaje de nitrógeno contenido en él ( $N_m$ ). Así, su contenido en las especies arbóreas del PNIP fue de 0.01 a 1.9 y su promedio igual a 0.8% espacialmente, la mayor acumulación de este nutrimento se distribuyó hacia la parte occidental del Parque Nacional (Figura 41).

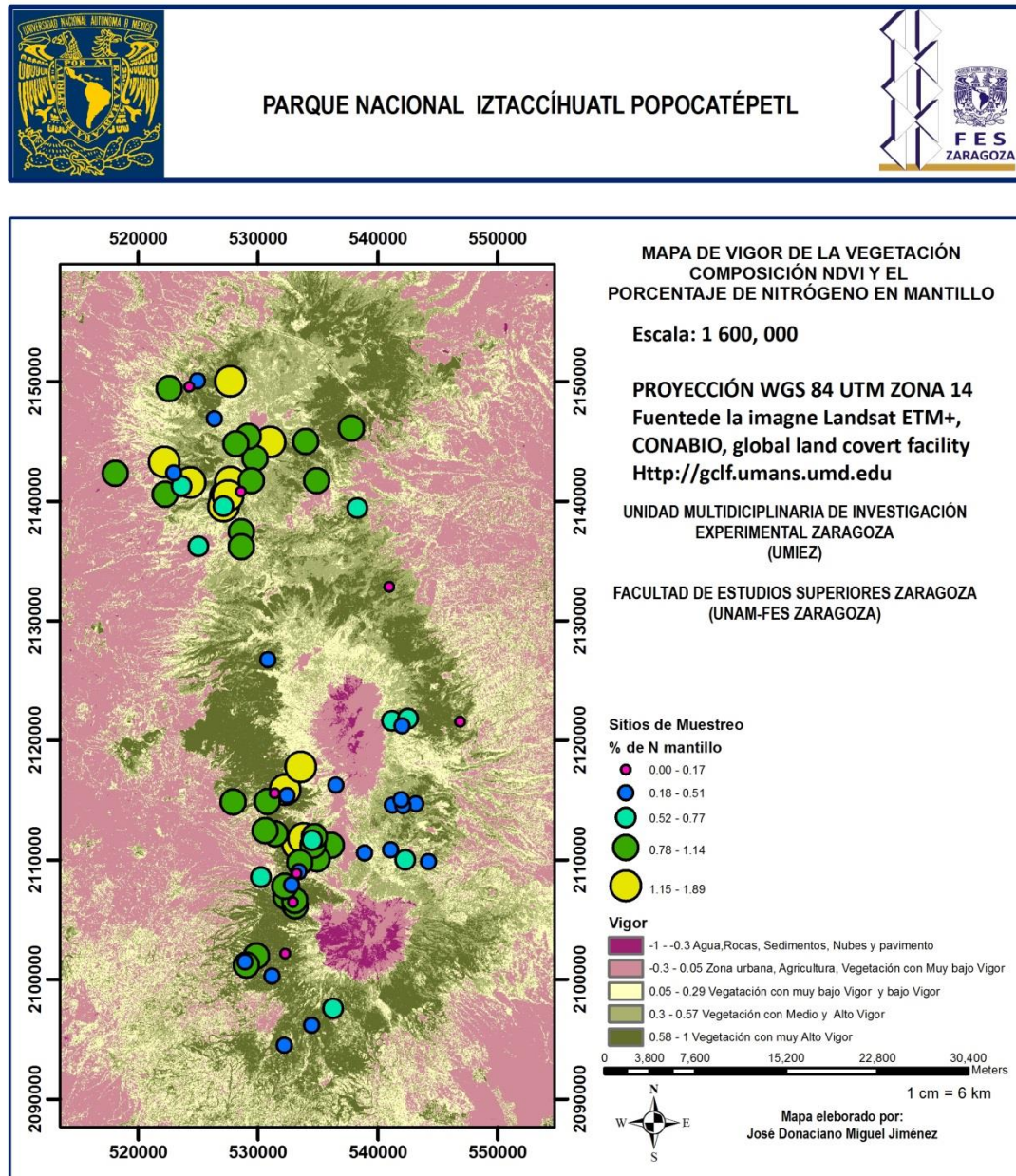


Figura 40. Porcentaje de N en mantillo y el Vigor de la vegetación.

El porcentaje mínimo de  $N_m$  se localizó en el sitio denominado **4** de la zona de Zoquiapan y Anexas, a 3800 m snm bajo *P. hartwegii* como vegetación dominante. El porcentaje más alto se estableció en el sitio **33**, ubicado también en Zoquiapan y Anexas a 3520 m snm, bajo bosque asociado de *A. religiosa* con *P. hartwegii*.

La relación entre  $N_m$  y altitud fue variable; no obstante, se observó una tendencia general a acumularse a mayor altitud. Este comportamiento se corresponde con el observado en el contenido de la materia orgánica del suelo y altitud.

La relación entre  $N_m$  y pH activo, aunque variable, mostró que el aumento de  $N_m$  amortigua la acidez del suelo, mientras que el comportamiento entre  $N_m$  y pH potencial fue más variable (Figura 42).

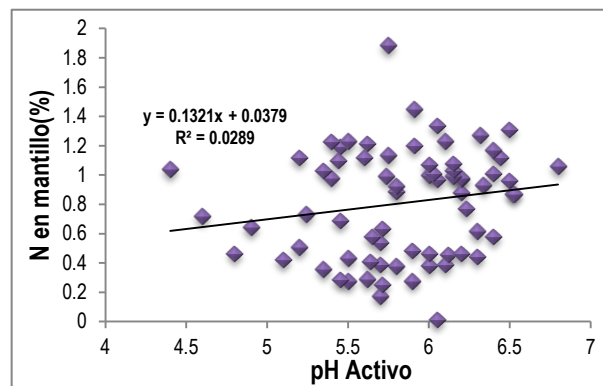


Figura 41.- Relación entre N-mantillo y pH activo.

Dado que la materia orgánica del suelo (MOS) proviene también de la degradación del mantillo, el N contenido en esta capa superficial del suelo demostró que un mayor porcentaje de MOS repercute en mayor concentración de N (Figura 43), comportamiento estadísticamente establecido con el análisis de correlación, puesto que se presentó un coeficiente positivo ( $r=0.4$ ) y significativo ( $P \leq 0.05$ ).

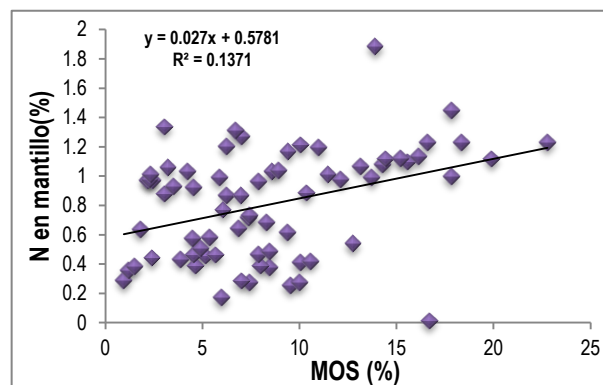


Figura 42.-Relación entre N-mantillo y MOS porcentual.

Otro factor importante tomado en cuenta fue la relación entre el  $N_m$  y el N-foliar. Con la Figura 44, se encontró que ambos parámetros se comportan de manera similar y se refuerza con el análisis estadístico realizado, en este análisis se presentó un coeficiente positivo ( $r=0.7$ ) y significativo ( $P \leq 0.05$ ). Por otra parte, el comportamiento entre  $N_m$  y el Mg en tejido foliar (Mg-foliar) mostró una tendencia positiva ( $r=0.34$ ) y significativa ( $P \leq 0.05$ ) (Figura 45).

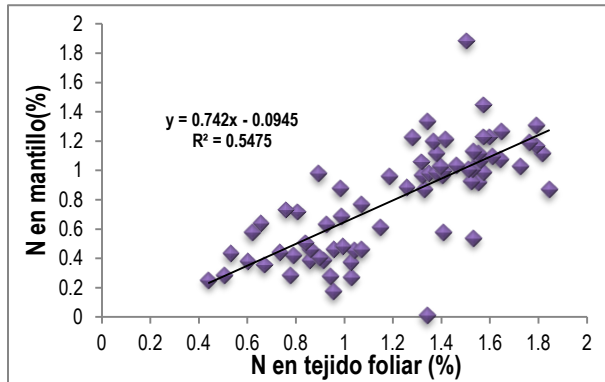


Figura 43.- Relación entre N en mantillo y N foliar.

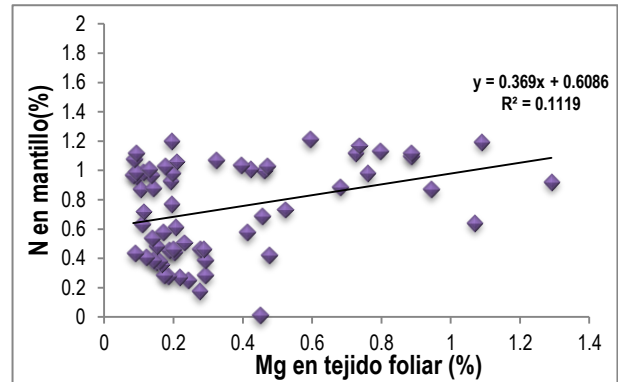


Figura 44.- Relación entre N en mantillo y Mg foliar.

Dado que la degradación del mantillo depende de diversos factores, entre ellos el origen de la hojarasca, se comparó el contenido de  $N_m$  por tipo de vegetación. En este proceso, se encontró que el  $N_m$  fue mayor en bosques de *A. religiosa* que en sitios con *Pinus* como vegetación dominante (Figura 46).

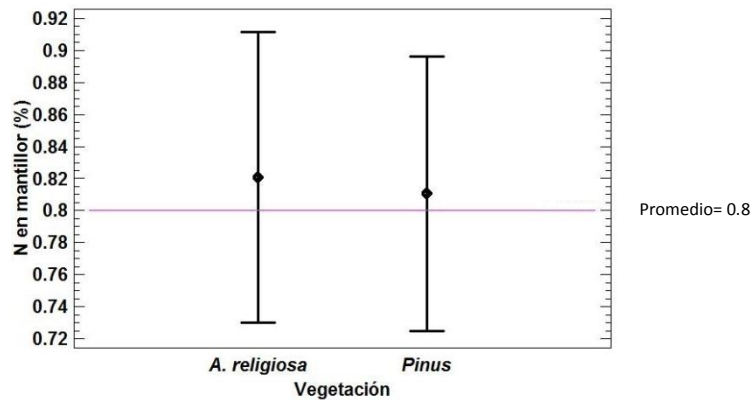


Figura 45.-ANDEVA entre N-mantillo y Vegetación.

### 7.7.4.-Vigor de la Vegetación y Relación con N en Mantillo

Al analizar los datos de  $N_m$  y su relación con el valor del vigor de la vegetación, en general, se observó que al disminuir el contenido de N en la cubierta vegetal del suelo, el vigor de la vegetación aumentó (Figura 47) y con el análisis del Cuadro 21 se encontró que a más de 3700 m snm, el N del mantillo disminuye junto con el vigor.

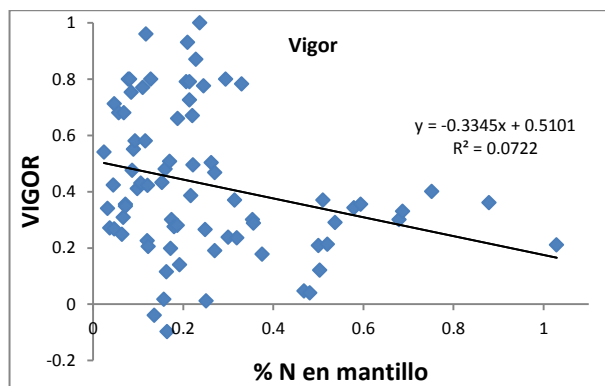


Figura 46.-Relación del vigor de la vegetación y N en mantillo.

Cuadro 21.- Promedio por intervalo altitudinal de NDVI- N en mantillo.

| m snm     | pH         |         | MOS   | $N_m$ | Vigor | Vegetación más Frecuente                 |
|-----------|------------|---------|-------|-------|-------|--|
|           | $H_2O$ 1:2 | KCl 1:2 |       |       |       |  |
| 2850-2884 | 6.04       | 5.04    | 4.70  | 0.80  | 0.35  | <i>P. teocote</i> y <i>P. montezumae</i> |
| 2884-3188 | 6.07       | 5.04    | 6.78  | 0.74  | 0.44  | <i>P.pseudostrobus</i>                   |
| 3188-3492 | 5.94       | 4.98    | 9.20  | 0.80  | 0.61  | <i>A. religiosa</i>                      |
| 3492-3796 | 5.63       | 4.48    | 10.40 | 0.91  | 0.35  | <i>P. hartwegii</i>                      |
| 3796-4100 | 5.06       | 3.98    | 11.27 | 0.67  | 0.11  | <i>P. hartwegii</i>                      |

$N_m$ = Nitrogeno de mantillo del suelo.

Al analizar los datos del Cuadro 22, se encontró que el vigor de la vegetación fue mayor en bosques monoespecificos de *A. religiosa*, quienes tuvieron en promedio, el pH menos ácido y el mayor contenido de N en el mantillo.

Cuadro 22.- Promedio por vegetación y su relación con la N mantillo y el NDVI.

| Vegetación                          | pH         |         | MOS  | Mantillo | Vigor |
|-------------------------------------|------------|---------|------|----------|-------|
|                                     | $H_2O$ 1:2 | KCl 1:2 |      |          |       |
| <i>A. religiosa</i>                 | 6.15       | 5.13    | 8.88 | 0.97     | 0.60  |
| <i>A. religiosa</i> -<br>Asociación | 5.79       | 4.90    | 9.17 | 0.71     | 0.49  |
| <i>Pinus</i>                        | 5.73       | 4.59    | 7.64 | 0.81     | 0.31  |

### 7.7.5.-Nitrógeno Total en Suelo.

El porcentaje de N total se ubicó de 0.02 a 1.03%, con promedio de 0.25%. De su distribución espacial como se observó en la Figura 48, los bosques de la zona de Zoquiapan y Anexas tuvieron mayor porcentaje de N total comparado con los bosques de la zona de Iztapopo.

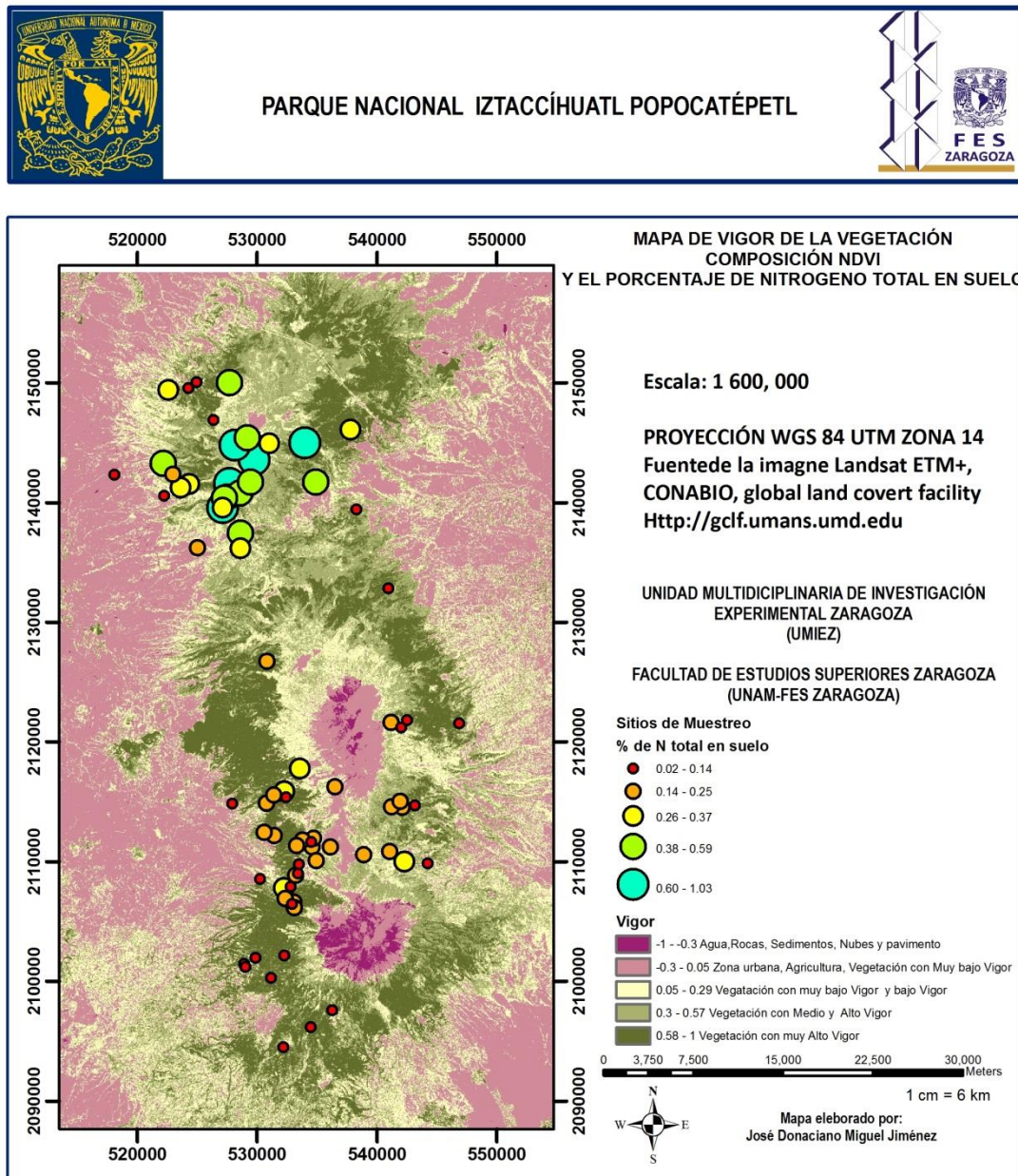


Figura 47.- Porcentaje de N total en suelo y Vigor de la vegetación.

Al considerar estos valores y compararlos con los establecidos en la Norma-Oficial Mexicana-021-REC/NAT-2000, se pudo establecer que poco menos de la mitad de los sitios estudiados (46) tuvieron clase baja, 26 sitios clase media y 5 clase alta (Cuadro 23).

Cuadro 23.- Intervalos de clases de N-total.

| N total    |    | No. de sitios |  | *Nitrógeno total |           |
|------------|----|---------------|--|------------------|-----------|
| ___%___    |    | ___%___       |  | Clase            | ___%___   |
| 0.02-0.22  | 46 | 61            |  | Bajo             | <0.30     |
| >0.22-0.44 | 17 | 20.8          |  | Medio            | 0.30-0.80 |
| >0.44-0.66 | 9  | 11.7          |  | Alto             | >0.80     |
| >0.66-0.88 | 4  | 3.9           |  |                  |           |
| >0.88-1.1  | 1  | 2.6           |  |                  |           |

\*NOM-021-REC/NAT-SEMARNAT-2000.

El porcentaje mínimo de N-total se localizó en el sitio denominado **Sur del Salto**, en la región de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl a 3099 m snm, con inclinación del terreno igual a 8%, orientación NW y en suelo bajo bosque asociado de **A. religiosa** y **P. patula**. El valor máximo se estableció en el sitio nombrado como **10**, ubicado en la zona de Zoquiapan y Anexas a 3469 m snm, con 47% de pendiente, exposición NE y en donde la vegetación dominante fue **A. religiosa** asociado con **P. hartwegii**.

Con respecto al N total y su relación con la altitud, se encontró que este nutriente se acumula en las partes altas de la Sierra, lo cual se corroboró con el análisis de correlación, el cual produjo un coeficiente igual a 0.4 y P ≤ 0.05 (Figura 49).

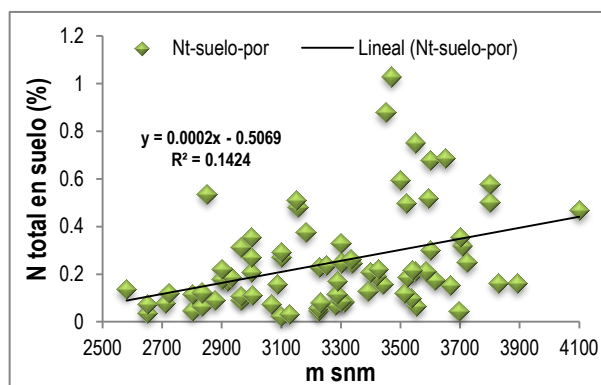


Figura 48.- Relación entre N-total y altitud.

En cuanto al contenido de N total con respecto a la reacción del suelo, en general se encontró que al acidificarse el pH activo y potencial aumenta el contenido de N total en el suelo.



Relacionado con lo anterior, se encontró que el contenido de N total en el suelo aumenta cuando la materia orgánica del suelo (MOS) se acumula (Figura 50). Como se sabe, la MOS influye en el pH del suelo, ya que cuando se acumula, lo acidifica. Este comportamiento entre MOS y pH activo se comprobó con el análisis de correlación, el cual indicó un coeficiente positivo ( $r=0.6$ ) y significativo ( $P\leq 0.05$ ).

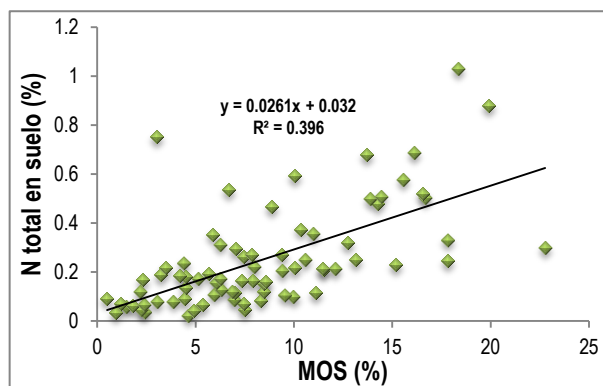


Figura 49.- Relación entre N-total en suelo y MOS %.

Del análisis entre N total y su relación con el porcentaje de N en el tejido foliar (Figura 51), se encontró que en sitios con mayor concentración de N total, el N-foliar también es alto en su contenido. Este comportamiento quedó estadísticamente comprobado, dado que se presentó una correlación positiva ( $r=0.5$ ) y significativa ( $P\leq 0.05$ ). Por su parte, la relación entre N total y Mg foliar indicó un comportamiento similar al anterior, en el cual, del análisis estadístico, se obtuvo un coeficiente positivo ( $r=0.5$ ) y significativo ( $P\leq 0.05$ ) (Figura 52).

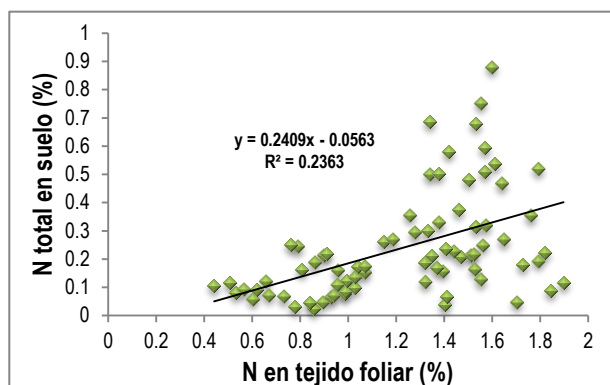


Figura 50.- Relación entre N total en suelo y N-foliar.

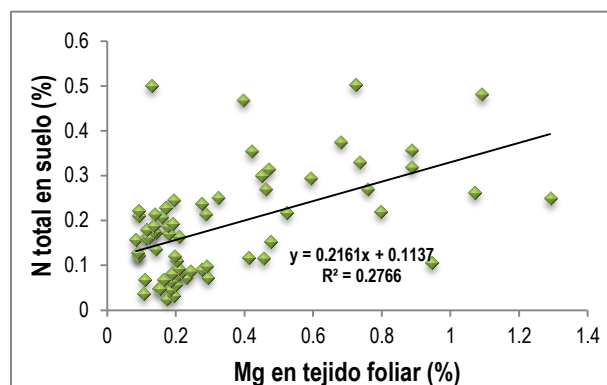


Figura 51.- Relación entre N total en suelo y Mg foliar.

Con respecto al N contenido en la cubierta del mantillo, se encontró que al aumentar este nutrimento también lo hace el N total (Figura 53). Tal situación fue congruente con el análisis estadístico, cuyo coeficiente fue positivo ( $r=0.6$ ) y significativo ( $p\leq 0.05$ ).

Po otro lado la relación entre N-total y Mg-en mantillo, con el análisis de correlación ( $r=0.4$ ,  $P \leq 0.05$ ), demostró que una mayor acumulación de Mg en mantillo repercute en un aumento de N total en el suelo (Figura 54).

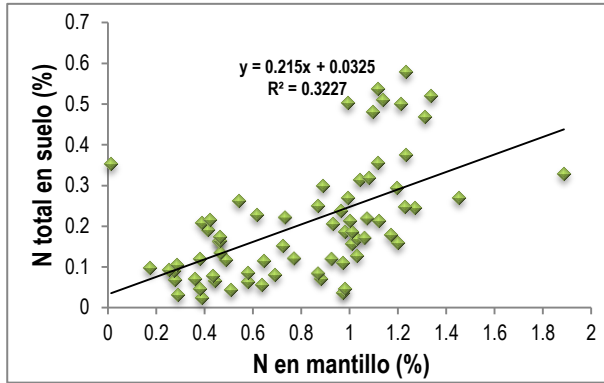


Figura 52.- Relación entre N total en suelo y N en mantillo.

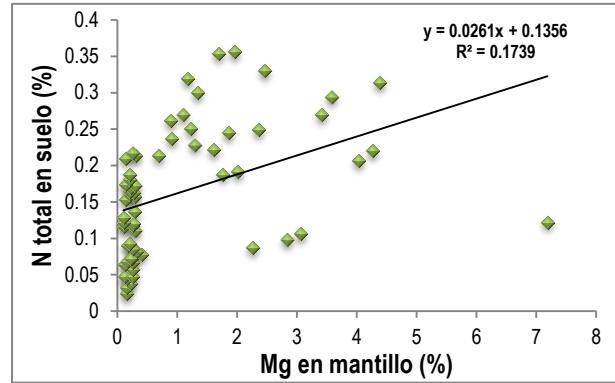


Figura 53.- Relación entre N total en suelo y Mg foliar.

Al considerar el contenido de N total del suelo por tipo de vegetación (Figura 55), se encontró que los suelos bajo bosques de *A. religiosa* tienen, en promedio, poco más contenido de N total (4.7%) que los desarrollados bajo bosques de *Pinus* (4.3%).

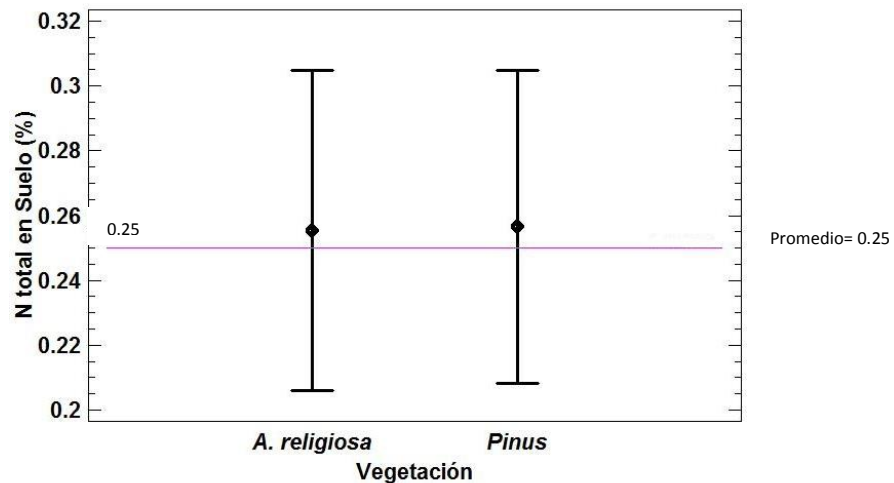


Figura 54.- Relación entre N-total y Vegetación.

## 7.7 6.-Vigor de la Vegetación y Relación con N total del Suelo.

Al analizar los datos de N total en suelo y su relación con el vigor de la vegetación, con la Figura 56 se observó, una tendencia negativa ( $r=-0.27$ ) y significativa ( $P\geq 0.05$ ). Así mismo, con el análisis del Cuadro 24, se encontró que los sitios con mayor porcentaje de N en el suelo corresponden con lugares donde el valor de vigor de la vegetación fue bajo y donde el porcentaje promedio de MOS fue mayor junto con un pH más ácido.

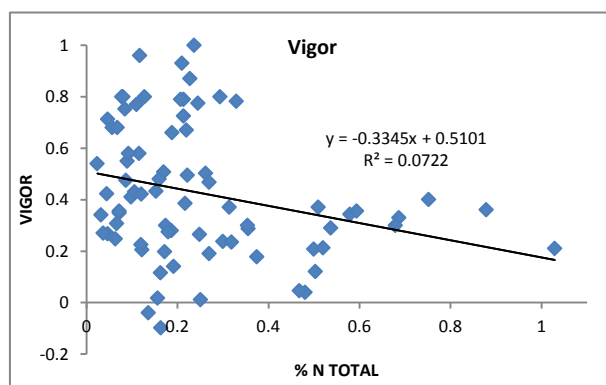


Figura 55.- Relación del vigor de la vegetación y N total en suelo

Cuadro 24.- Vigor de la Vegetación y Nitrógeno total por intervalo altitudinal.

| m snm     | pH                     |           | MOS   | N total | Vigor | Vegetación más Frecuente               |
|-----------|------------------------|-----------|-------|---------|-------|--|
|           | _H <sub>2</sub> O 1:2_ | _KCl 1:2_ |       |         |       |  |
| 2850-2884 | 6.04                   | 5.04      | 4.70  | 0.13    | 0.35  | <i>P.teocote</i> y <i>P.montezumae</i> |
| 2884-3188 | 6.07                   | 5.04      | 6.78  | 0.22    | 0.44  | <i>P.pseudostrobus</i>                 |
| 3188-3492 | 5.94                   | 4.98      | 9.20  | 0.24    | 0.61  | <i>A. religiosa</i>                    |
| 3492-3796 | 5.63                   | 4.48      | 10.40 | 0.32    | 0.35  | <i>P. hartwegii</i>                    |
| 3796-4100 | 5.06                   | 3.98      | 11.27 | 0.38    | 0.11  | <i>P. hartwegii</i>                    |

Con respecto a la vegetación, se encontró que los suelos desarrollados bajo bosques de *A. religiosa* presentaron mayor porcentaje de N total en comparación con los bosques de *Pinus*, lo cual explica el motivo por el que la vegetación desarrollada bajo el dosel del oyamel tiene un valor de vigor de la vegetación alto (Cuadro 25).

Cuadro 25.- Promedio por vegetación y su relación con la N total y el NDVI.

| Vegetación                                 | pH                     |           | MOS  | N total | Vigor |
|--|------------------------|-----------|------|---------|-------|
|  | _H <sub>2</sub> O 1:2_ | _KCl 1:2_ |      |         |       |
| <i>A. religiosa</i>                        | 6.15                   | 5.13      | 8.88 | 0.26    | 0.60  |
| <i>A. religiosa</i> -<br><i>Asociación</i> | 5.79                   | 4.90      | 9.17 | 0.27    | 0.49  |
| <i>Pinus</i>                               | 5.73                   | 4.59      | 7.64 | 0.25    | 0.31  |

## 7.8.-Magnesio

### 7.8.1.-Porcentaje de Magnesio en Tejido Foliar.

El Magnesio contenido en las hojas (Mg-foliar) de los árboles fue de 0.8% a 1.3%, con promedio de 0.34. Con el análisis de la Figura 57, se observó que poco más de la mitad de los sitios con mayor porcentaje de Mg se localizaron en el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas.

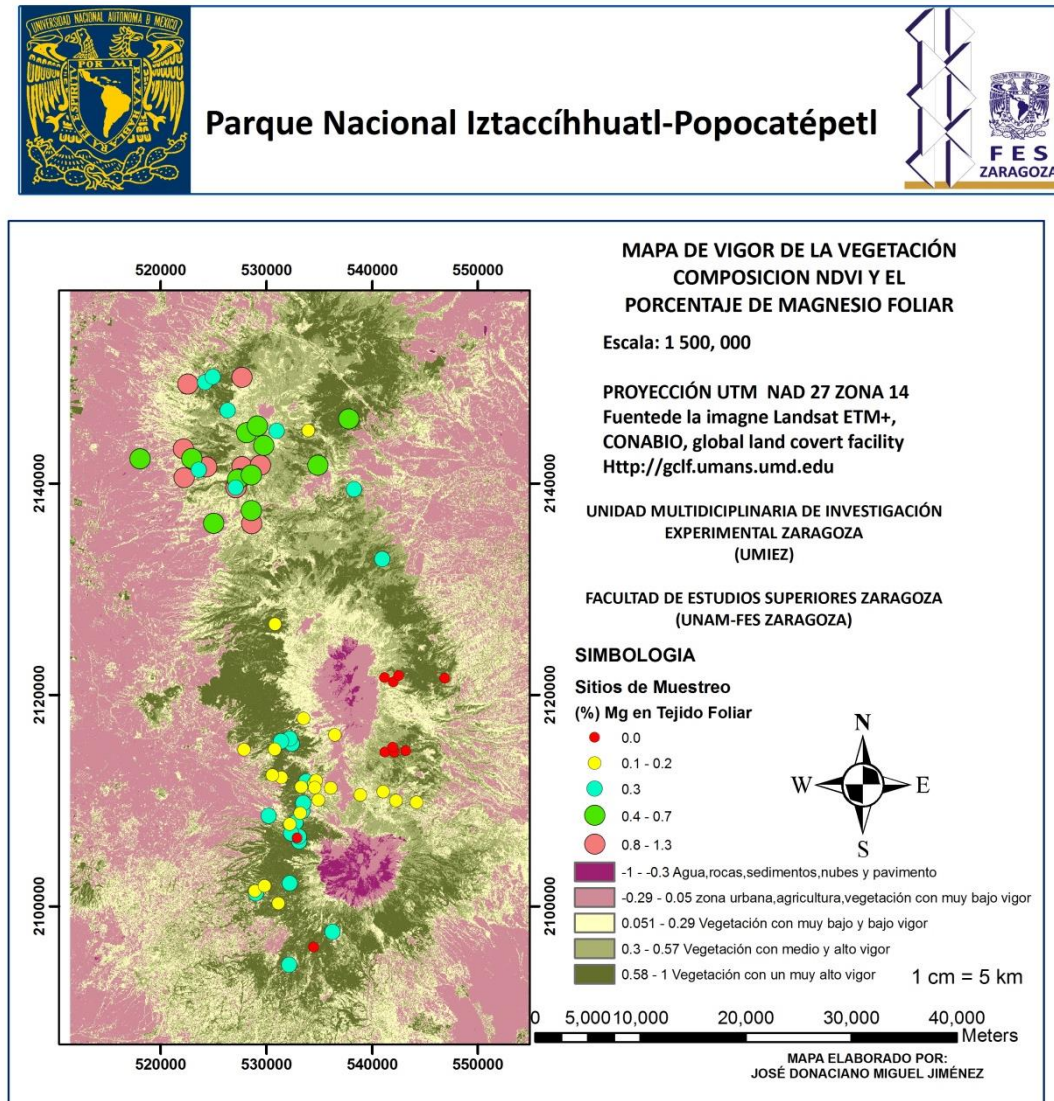


Figura 56.-Porcentaje de Mg en tejido foliar y vigor de la vegetación.

La concentración de Mg-foliar más baja se ubicó en el sitio denominado como **F 5**, en la zona de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, a 3522 m snm, en una superficie plana con exposición NW y con ***P. hartwegii*** como dominante. Por su parte, el valor máximo se encontró en el sitio señalado como **35**, localizado en la zona de Zoquiapan y Anexas, a 3000 m snm, en un terreno con 38% de pendiente, exposición NW y con bosque de ***A. religiosa***.

De las relaciones entre Mg foliar y diversos parámetros como altitud, pH activo, pH potencial y el contenido de MOS se encontró un comportamiento variable, por lo que no se pudo establecer una correlación entre éstos; sin embargo, el análisis de Mg foliar para sitios con bosques de ***A. religiosa***, en comparación con lugares con bosques de ***Pinus***, mostró que las hojas de ***A. religiosa*** contienen en promedio mayor porcentaje de Mg. Este hecho se corroboró estadísticamente con el análisis de varianza con un nivel de significancia de  $p \leq 0.05$  (Figura 58).

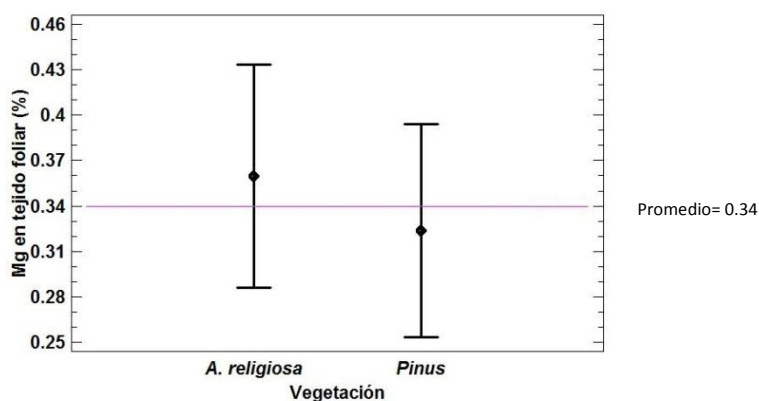


Figura 57.- Relación entre Mg-foliar y Vegetación.

### 7.8.2.-Vigor de la Vegetación y Relación con Mg Foliar.

Del análisis estadístico (Figura 59), se obtuvo que la relación entre vigor y porcentaje de Mg en tejido foliar fue negativa ( $r = -0.29$ ) y significativa ( $P \geq 0.05$ ) y al analizar el cuadro 26 se observó que tal tendencia se debe a la variabilidad que se encuentra a diferente altitud.

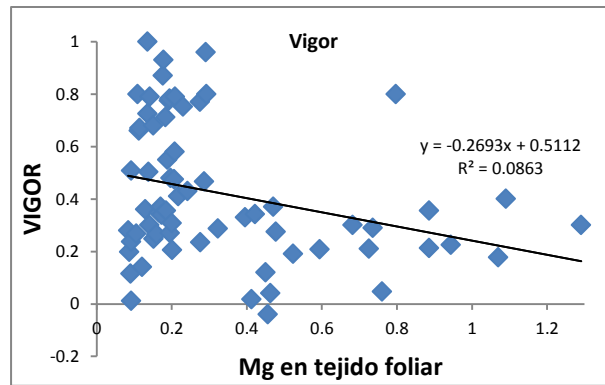


Figura 58.- Relación del vigor de la vegetación y Mg en tejido foliar.

Cuadro 26.- Promedio por intervalo altitudinal de NDVI- Mg foliar.

| m snm     | pH                     |           | MOS   | Mg foliar | Vigor | Vegetación más Frecuente                |
|-----------|------------------------|-----------|-------|-----------|-------|---|
|           | _H <sub>2</sub> O 1:2_ | _KCl 1:2_ |       | %         |       |   |
| 2850-2884 | 6.04                   | 5.04      | 4.70  | 0.32      | 0.35  | <i>P. teocote</i> y <i>P. montezume</i> |
| 2884-3188 | 6.07                   | 5.04      | 6.78  | 0.41      | 0.44  | <i>P. pseudostrobus</i>                 |
| 3188-3492 | 5.94                   | 4.98      | 9.20  | 0.21      | 0.61  | <i>A. religiosa</i>                     |
| 3492-3796 | 5.63                   | 4.48      | 10.40 | 0.39      | 0.35  | <i>P. hartwegii</i>                     |
| 3796-4100 | 5.06                   | 3.98      | 11.27 | 0.43      | 0.11  | <i>P. hartwegii</i>                     |

Con el análisis por tipo de vegetación, se encontró que los sitios con bosques de *A. religiosa* tuvieron en promedio menor acidez, mayor acumulación de materia orgánica del suelo y un mayor contenido de Mg foliar, y coincide con valores altos de vigor que los bosques de *Pinus* (Cuadro 27). Unir idea con la pagina 65.

Cuadro 27.- Promedio por vegetación y su relación con la Mg foliar y el NDVI.

| vegetación          | pH                   |         | MOS  | Mg foliar | Vigor |
|---------------------|----------------------|---------|------|-----------|-------|
|                     | H <sub>2</sub> O 1:2 | KCl 1:2 |      | %         |       |
| <i>A. religiosa</i> | 6.15                 | 5.13    | 8.88 | 0.39      | 0.60  |
| <i>Asociación</i>   | 5.79                 | 4.90    | 9.17 | 0.35      | 0.49  |
| <i>Pinus</i>        | 5.73                 | 4.59    | 7.64 | 0.31      | 0.31  |

### 7.8.3.- Porcentaje de Magnesio en Mantillo.

El Mg del mantillo ( $Mg_m$ ) se encontró de 0.1% a 7.2% con promedio de 1.1%. Su distribución, como puede verse en la Figura 60, indicó que el contenido de  $Mg_m$  es mayor en la zona de Zoquiapan y Anexas, mientras que en el Parque Nacional Iztaccíhuatl tiene menor porcentaje de Mg en mantillo.

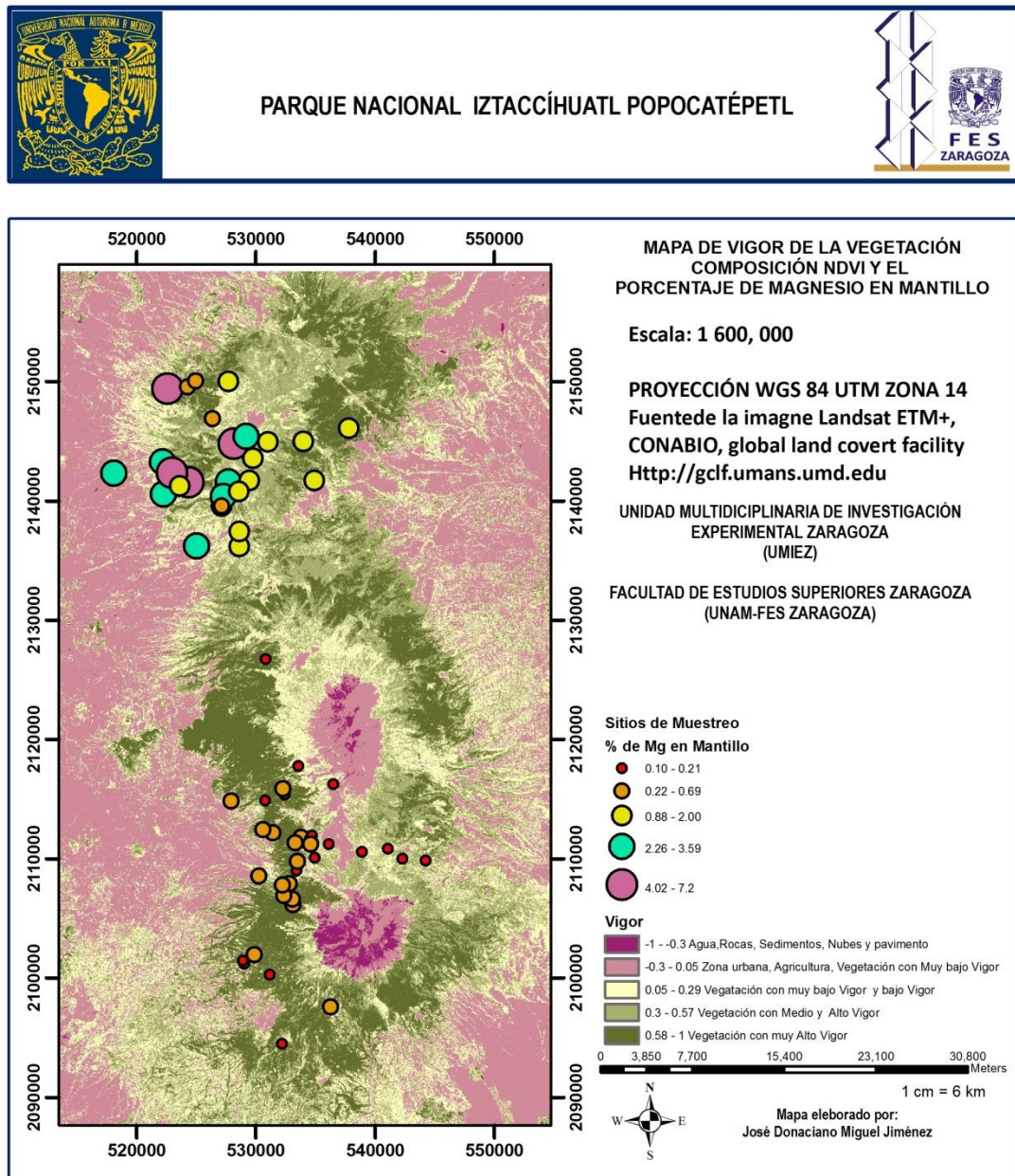


Figura 59.- Porcentaje de Mg en mantillo y Vigor de la vegetación.

El porcentaje más bajo se localizó en el sitio denominado **La joya**, en la zona de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, a 3892 m snm, y bajo un dosel de *P. hartwegii*. El contenido máximo se ubicó en el sitio denominado **25**, perteneciente a la zona de Zoquiapan y Anexas, a 2900 m snm, bajo vegetación dominante de *P. pseudostrabus*.

De las relaciones entre  $Mg_m$  y diversos parámetros como altitud, pH activo, pH potencial y contenido de MOS se encontró un comportamiento variable, por lo que no se pudo establecer una correlación entre éstos.

Con respecto a la relación entre  $Mg_m$  y  $Mg$ -foliar, según el análisis estadístico, se encontró una relación positiva y significativa ( $p \leq 0.05$ ), cuyo coeficiente de correlación fue igual a 0.6 (Figura 61). Por su parte, la relación entre  $Mg_m$  y N-foliar también presentó correlación positiva ( $r=0.3$ ) y significativa ( $p \leq 0.05$ ), la cual se observó en la Figura 62.

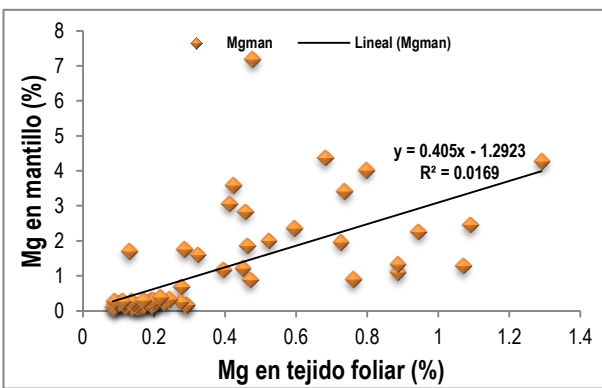


Figura 60.- Relación entre N-mantillo y Mg- foliar

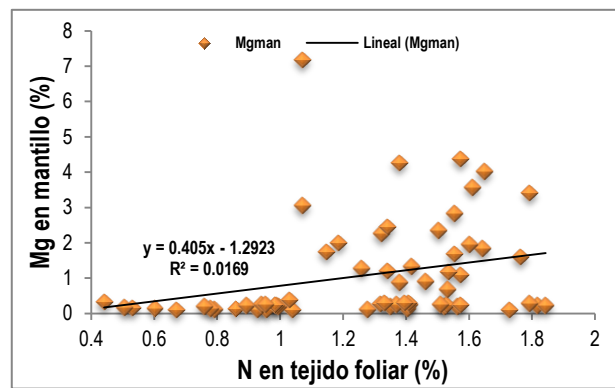


Figura 61.- Relación entre Mg-mantillo y N- foliar.

El contenido de  $Mg_m$  para sitios donde la especie *A. religiosa* dominó la estructura del bosque, se encontró que, en promedio, fue más bajo que en sitios con bosques de *Pinus* (Figura 63).

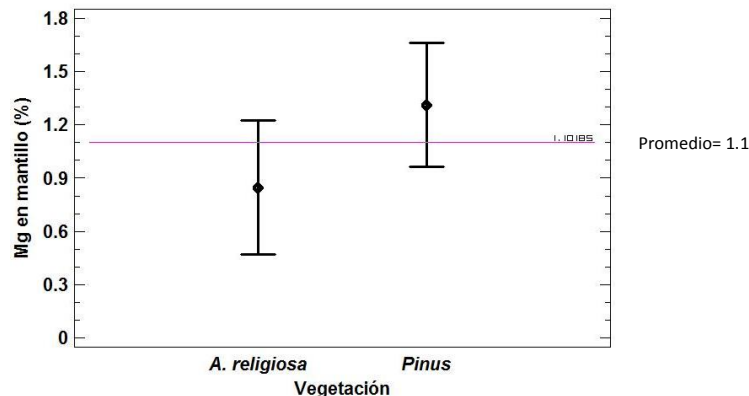


Figura 62.- Relación entre Mg-mantillo y Vegetación.



### 7.8.4.-Vigor de la Vegetación y Relación con Mg en Mantillo.

De los datos de Mg contenido en mantillo y su relación con el vigor de la vegetación, se observó una tendencia negativa ( $r=-0.27$ ) y significativa ( $P \geq 0.05$ )(Figura 64).

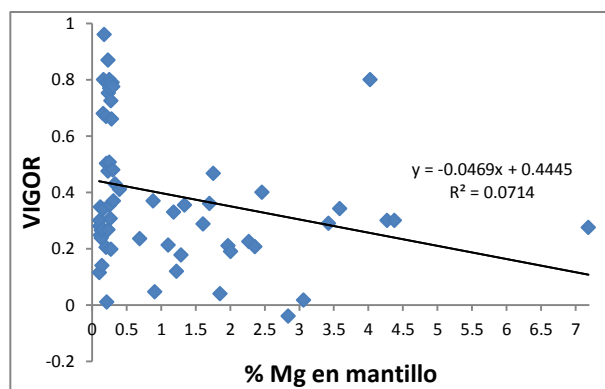


Figura 63.- Relación del vigor de la vegetación y Mg en mantillo.

Con el análisis del cuadro 28, en relación con la altitud y Mg en mantillo, se observó que es muy variable, por lo que tuvo una tendencia negativa a lo largo del gradiente altitudinal, de donde destaca que el valor más bajo de Mg en mantillo se encuentra de 3188-3492 m snm y donde la vegetación dominante es ***A. religiosa***.

Cuadro 28.- Promedio por intervalo altitudinal de NDVI- Mg en mantillo.

| msn m     | pH                     |           | MOS   | Mg mantillo | Vigor - | Vegetación más Frecuente                 |
|-----------|------------------------|-----------|-------|-------------|---------|--|
|           | _H <sub>2</sub> O 1:2_ | _KCl 1:2_ |       | (%)         |         |  |
| 2850-2884 | 6.04                   | 5.04      | 4.70  | 1.08        | 0.35    | <i>p. teocote</i> y <i>P. montezumae</i> |
| 2884-3188 | 6.07                   | 5.04      | 6.78  | 1.67        | 0.44    | <i>P. pseudostrobus</i>                  |
| 3188-3492 | 5.94                   | 4.98      | 9.20  | 0.42        | 0.61    | <i>A. religiosa</i>                      |
| 3492-3796 | 5.63                   | 4.48      | 10.40 | 1.04        | 0.35    | <i>P. hartwegii</i>                      |
| 3796-4100 | 5.06                   | 3.98      | 11.27 | 1.45        | 0.11    | <i>P. hartwegii</i>                      |

Al analizar el Cuadro 29, que presenta los valores promedio por tipo de vegetación, se pudo establecer que los bosques con ***A. religiosa*** tuvieron el porcentaje promedio más bajo de Mg fijado en el mantillo; sin embargo, estos bosques presentaron el valor de vigor más alto.

Cuadro 29.- Promedio por vegetación y su relación con el Mg en mantillo y el NDVI.

| vegetación          | pH                     |           | MOS  | Mg mantillo | Vigor  |
|---------------------|------------------------|-----------|------|-------------|--------|
|                     | _H <sub>2</sub> O 1:2_ | _KCl 1:2_ |      | %           | -1 a 1 |
| <i>A. religiosa</i> | 6.15                   | 5.13      | 8.88 | 0.80        | 0.60   |
| <i>Asociación</i>   | 5.79                   | 4.90      | 9.17 | 1.15        | 0.49   |
| <i>Pinus</i>        | 5.73                   | 4.59      | 7.64 | 1.22        | 0.31   |

### 7.8.5.-Magnesio en Suelo.

Del Mg del suelo, éste se encontró de 0.2 a 3.9 cmol kg<sup>-1</sup>, con promedio de 1.5 cmol kg<sup>-1</sup>. De acuerdo con su distribución espacial, en la Figura 65, se pudo ver que los sitios con mayor porcentaje de este nutrimento están localizados hacia la vertiente occidental de la Sierra Nevada.

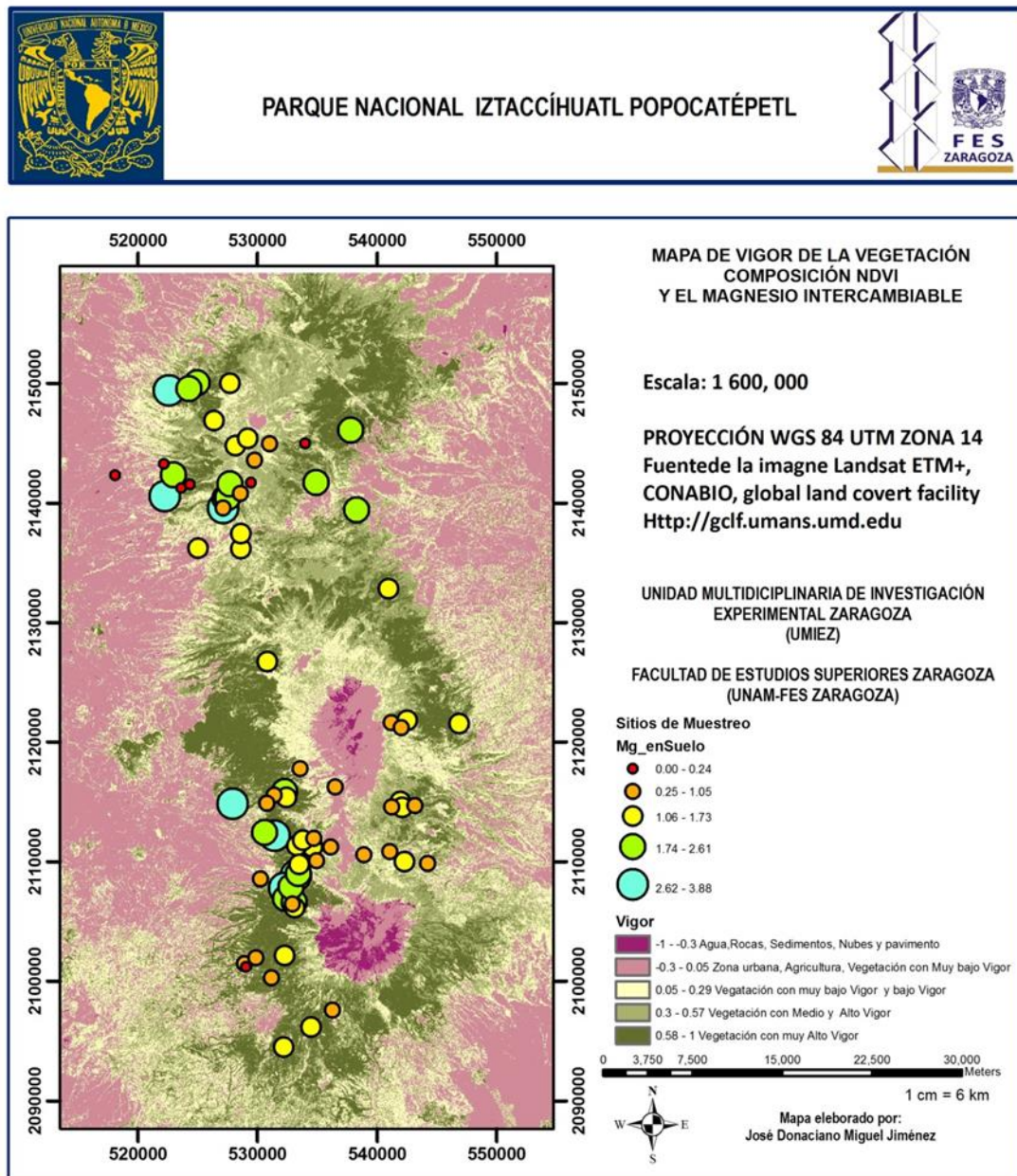


Figura 64.- Mg Intercambiable en Suelo y el Vigor de la Vegetación.

Al comparar estos valores con los de la Norma-021-RECNAT-SEMARNAT-2000, se pudo establecer que alrededor de 45.4% de los sitios estudiados tienen deficiencia de Mg en el suelo (cuadro 30).

Cuadro 30.- Intervalos de clases de Mg en cmol kg<sup>-1</sup>.

| Numero de sitios | Sitios | *clases  | intervalos |
|------------------|--------|----------|------------|
|                  | %      |          |            |
| 2                | 2.6    | Muy baja | Menor-0.5  |
| 32               | 41.55  | Baja     | 0.5-1.3    |
| 35               | 45.45  | media    | 1.3-3.0    |
| 3                | 3.9    | alta     | Mayor-3.0  |
| 5                | 4.5    | sd       | sd         |

\*Clases de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-SEMARNAT-2000; PNIP= Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

En este contexto, el valor mínimo se localizó en el sitio **40** (cumbre del volcán Tláloc) de la zona de Zoquiapan y Anexas a 4100 m snm, con una inclinación igual a 19% y con vegetación dominante de *P. hartwegii*. El valor máximo se estableció en el sitio denominado **O 1**, ubicado en la zona de los volcanes Iztaccíhuatl-Popocatepetl a 3250 m snm, con pendiente de 65%, exposición S y bajo bosque con asociación de *P. montezumae* y *A. religiosa*.

La relación entre Mg en suelo y altitud demostró tendencia negativa ( $r = -0.4$ ) y significativa ( $p \leq 0.05$ ) según se aprecia en la Figura 66.

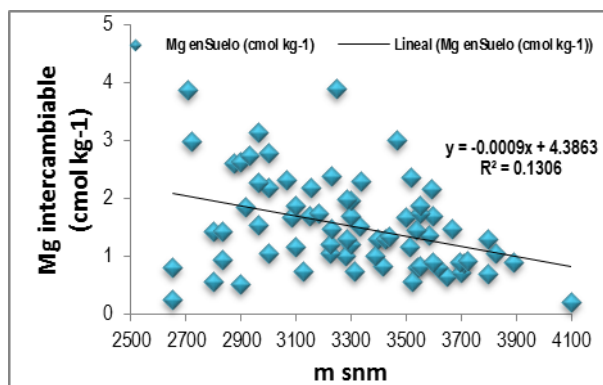


Figura 65.- Relación entre Mg-en suelo y altitud.

Con la relación entre Mg intercambiable del suelo y pH activo se encontró que a menor acidez, el Mg intercambiable aumenta en la solución del suelo. Este comportamiento quedó estadísticamente establecido al indicar un coeficiente de correlación positivo ( $r = 0.4$ ) y significativo ( $p \leq 0.05$ ), tal y como se ve en la Figura 67. Dicha correlación se presentó de igual forma entre Mg intercambiable y pH potencial (Figura 68), puesto que también se observó un coeficiente de correlación positivo ( $r = 0.5$ ) y significativo ( $P \leq 0.05$ ).

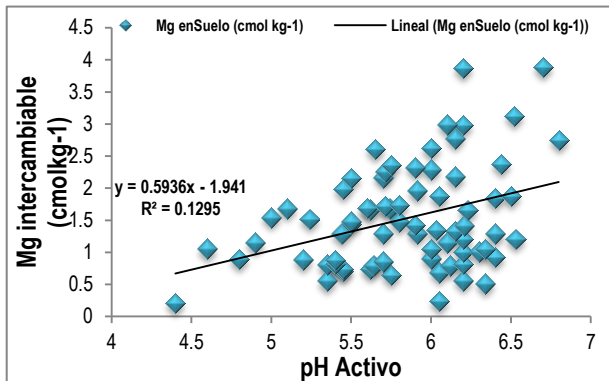


Figura 66.- Relación entre Mg en suelo y pH Activo.

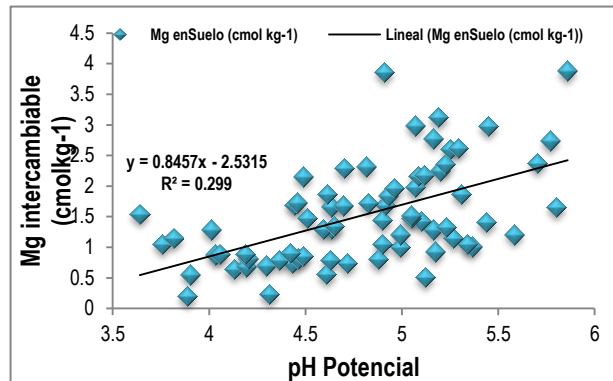


Figura 67.- Relación entre Mg en suelo y pH Potencial.

De la relación entre Mg intercambiable con el porcentaje de MOS y N-foliar se observó una alta variabilidad lo cual no permitió establecer una correlación entre ellos. Por otro lado, entre Mg en suelo y el Mg-foliar, se demostró una tendencia positiva ( $r=0.3$ ) y significativa ( $p \leq 0.05$ ) (Figura 69).

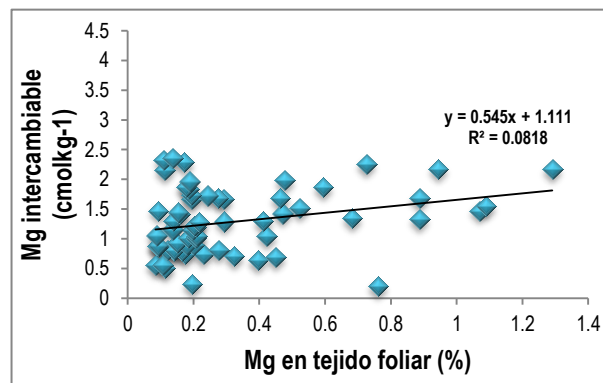


Figura 68.- Relación entre Mg en suelo y foliar.

De la relación entre Mg intercambiable y el N contenido en el mantillo, se vio un comportamiento variable, pero entre Mg en suelo y Mg del mantillo se tuvo una tendencia positiva ( $r= 0.3$ ) y significativa ( $p \leq 0.05$ ) (Figura 70).

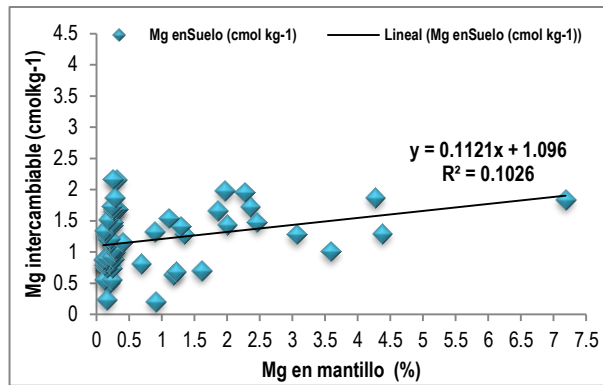


Figura 69.- Relación entre Mg en suelo y Mg en mantillo.

Al considerar el contenido de Mg intercambiable por tipo de vegetación, con el análisis de varianza se encontró una diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) entre bosques de *Pinus* con los de *A. religiosa*, puesto que suelos bajo esta especie presentaron un promedio de  $1.77 \text{ cmol kg}^{-1}$ , en tanto que bajo *Pinus* fue igual a  $1.3 \text{ cmol kg}^{-1}$  (Figura 71).

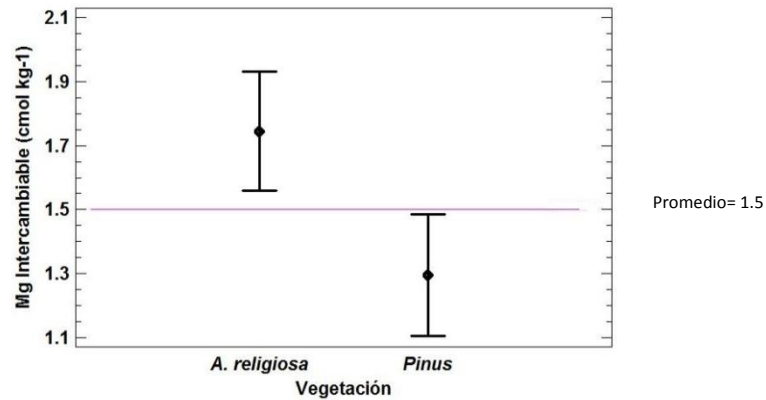


Figura 70.- Relación entre Mg cmolk-1 y Vegetación. Diferencia estadística de 0.45., ±0.37 unidades de límite.

### 7.8.6.-Vigor de la Vegetación y Relación con Mg Intercambiable en Suelo.

Con los datos de Mg intercambiable y su relación con el vigor de la vegetación, se encontró que un aumento general entre ambos parametros (Figura 72). Por su parte, el análisis del Cuadro 31, indico que los sitios con menor cantidad de Mg intercambiable corresponden con lugares donde el valor de vigor de la vegetación es bajo y donde hay mayor concentración de MOS, pH más ácido y se encuentran a mayor altitud (3796-4100 m snm).

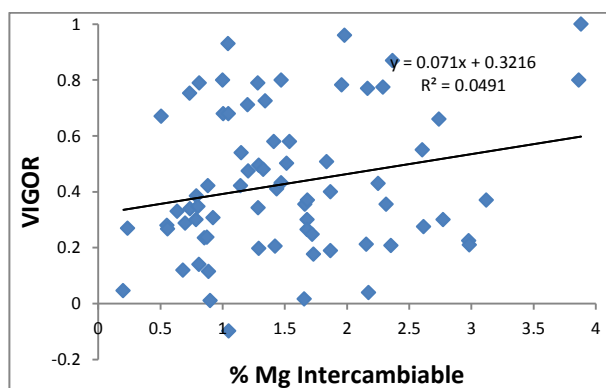


Figura 71.- Relación del vigor de la vegetación y Mg intercambiable.

Cuadro 31.- Valores promedio de NDVI y Mg Intercambiable por intervalo altitudinal.

| m snm     | pH                     |           | MOS<br>% | Mg en Suelo<br>cmol kg <sup>-1</sup> | Vigor |
|-----------|------------------------|-----------|----------|--------------------------------------|-------|
|           | _H <sub>2</sub> O 1:2_ | _KCl 1:2_ |          |                                      |       |
| 2850-2884 | 6.04                   | 5.04      | 4.70     | 1.65                                 | 0.35  |
| 2884-3188 | 6.07                   | 5.04      | 6.78     | 1.88                                 | 0.44  |
| 3188-3492 | 5.94                   | 4.98      | 9.20     | 1.62                                 | 0.61  |
| 3492-3796 | 5.63                   | 4.48      | 10.40    | 1.23                                 | 0.35  |
| 3796-4100 | 5.06                   | 3.98      | 11.27    | 0.82                                 | 0.11  |

Al coconsiderar el contenido de Mg intercambiable contenido en suelos bajo diferente tipo de vegetación, se encontró que este nutrimento es más alto en los bosques de **A. religiosa**, quienes, como ya fue mencionado, tuvieron un vigor de la vegetación más alto, pH menos ácido y un alto contenido de Materia Orgánica en el suelo (Cuadro 32).

Cuadro 32.- Promedio por vegetación y su relación con el Mg intercambiable (cmol Kg-1) en suelo y el NDVI.

| Vegetación          | pH                     |           | MOS<br>% | Mg en Suelo<br>cmol kg <sup>-1</sup> | Vigor |
|---------------------|------------------------|-----------|----------|--------------------------------------|-------|
|                     | _H <sub>2</sub> O 1:2_ | _KCl 1:2_ |          |                                      |       |
| <i>A. religiosa</i> | 6.15                   | 5.13      | 8.88     | 1.78                                 | 0.60  |
| <i>Asociación</i>   | 5.79                   | 4.90      | 9.17     | 1.67                                 | 0.49  |
| <i>Pinus</i>        | 5.73                   | 4.59      | 7.64     | 1.28                                 | 0.31  |

## 8.-DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

La vegetación observada en el trabajo de campo corresponde con los tipos de bosque observados por Rzedowski, (2006) y Giménez *et al.*, (2009) para México e IztaPopo. Estos autores reportan que los bosques de ***Pinus*** se distribuyen desde el nivel del mar hasta 4300 m snm, y para la región del IztaPopo, a partir de 2600 a 4100 m snm, representando la vegetación más frecuente en la zona, tal y como se constató en la presente investigación. Así mismo, mencionan que por sus características fisonómicas, florísticas y ecológicas, los bosques de ***A. religiosa*** poseen la composición de especies más representativas de México y del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (Sanchez *et al.*, 2005). A diferencia de las comunidades de ***Pinus***, las de ***A. religiosa*** están restringidas a sitios de alta montaña (2400 a 3500 m snm) y coexisten bajo condiciones climáticas y edáficas muy específicas. Los bosques maduros de oyamel, de 20 a 40 m de alto, son densos y de amplia cobertura, lo que impide entrada de luz suficiente al suelo y en consecuencia el desarrollo de un sotobosque. Lara *et al.*, (2009) mencionan que la regeneración de los bosques de oyamel es mayor en los claros del dosel que en el sotobosque, lo que coincide con lo observado en este trabajo, puesto que los bosques de ***A. religiosa*** que presentaron mejor índice de vegetación correspondieron con sitios con mejor estructura y suficientes claros que permitieron una mayor regeneración de brinzales. Según Spies y Franklin (1989), Pham *et al.*, (2004), Worrall *et al.*, (2005) indicaron que los disturbios en el dosel producen el proceso de regeneración por lluvia de semillas debido a una mayor disponibilidad de luz que activa su desarrollo. Por su parte, Lindón *et al.*, (2008), señalan que la regeneración de la masa arbórea influye en el microclima y en las propiedades físicas y químicas del suelo, lo que condiciona el tipo y distribución de la vegetación herbácea y arbustiva al alterar la actividad de los microorganismos y la descomposición de la materia orgánica, influenciadas también por la temperatura y humedad del suelo; factores a su vez relacionados con la intensidad de radiación solar recibida (Soria, 2005). Esta característica estructural de la vegetación explica el motivo por el cual los bosques de ***A. religiosa*** en este estudio reflejaron mayores valores de vigor de la vegetación que los de ***Pinus*** con menor cobertura, altura y área foliar, pues reflejan menos energía espectral en las partes altas del dosel. Curran *et al.*, (2001) mencionan que la morfología de la hoja y arquitectura de la planta junto con sus componentes bioquímicos (pigmentos, proteínas, carbohidratos, aceites y contenido de humedad), determinan la absorción, transmisión y reflectancia de la radiación solar en el espectro visible (VIS) e infrarrojo (IR) debido a su interacción con las moléculas foliares.

Del componente edáfico, la unidad de suelos con **Andosoles húmicos** y **vítricos** tuvo la mayor frecuencia de sitios, debido a su mayor extensión en la zona (Mihelich, 1980). Dicho autor encontró que los Andosoles en IztaPopo se desarrollan sobre andesitas, dacitas y riolitas, además de conglomerado basáltico y ceniza volcánica. Según Alcara *et al.*, (2009), estos suelos desarrollados sobre ceniza volcánica tienen naturaleza ácida por sus minerales amorfos de bajo orden estructural (aluminosilicatos). Estos suelos son ligeros, con alta retención de humedad, buen contenido de nutrientes dado su alto contenido de materia orgánica y vidrio volcánico, los cuales forman **Andosoles húmicos** y **vítricos** en áreas forestales poco alteradas y con bosques de coníferas (CONANP, 2009).

En cuanto a los valores de pH encontrados en los suelos estudiados en este trabajo, que fueron de ligeramente a extremadamente ácidos, coinciden con los niveles reportados por Giménez *et al.*, (2009), quienes señalaron que van de ácidos a muy ácido para este tipo de suelos. En este sentido, valores de pH inferiores a 5.5 implican una rápida disolución de las formas menos cristalinas del aluminio y su incorporación en el complejo de intercambio catiónico (CIC), pasando a ser el catión dominante, lo cual explica la mayor acidez encontrada en suelos bajo bosques de ***Pinus hartwegii*** a mayor altitud, donde la tasa de mineralización de la materia orgánica, temperatura, humedad, presión atmosférica y actividad microbiana disminuyen. Como se sabe, elementos como Al y Fe, a pH por debajo de 5 se solubilizan y contribuyen a una mayor acidificación edáfica que los disuelve más hasta ser tóxicos para su biota. La marcada disminución que experimenta el pH potencial respecto al activo está de acuerdo con la presencia del aluminio en porcentajes elevados en el CIC. Por el contrario, los valores altos de pH denotan una importante presencia de alófanos.

El comportamiento de la acidez del suelo bajo bosques de ***Pinus hartwegii*** en este trabajo coincide con lo reportado por Valderrábano-Gómez (2005), García-Hernández (2004) y Granados-Damián quienes encontraron también que los suelos desarrollados bajo bosques de ***P. hartwegii*** en la zona de Zoquiapan y Anexas e IztaPopo tuvieron suelos significativamente ( $p \leq 0.05$ ) más ácidos que bajo ***Abies religiosa***, ***Pinus montezumae*** y ***Pinus pseudostrobus***, atribuido a la mayor acumulación y menor tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo (MOS) a altitudes cercanas al límite de la vegetación arbórea, situación que coincide con los resultados de este trabajo.



Por otro lado, la correlación encontrada entre los valores de pH y la materia orgánica del suelo (MOS) en el presente estudio hace suponer que los sitios con alto contenido de MOS presentan una menor tasa de mineralización que ocasiona su acumulación. De acuerdo con Sánchez *et al.*, (2005) y García (2008), la acumulación de MOS más una lenta tasa de mineralización en bosques templados origina acumulación de humus y ácidos orgánicos que dependen de la naturaleza de la vegetación e influyen en las características del suelo, ya que el contenido nutrimental proveniente de la descomposición de la materia orgánica del suelo es una reserva importante de N y Mg y su disponibilidad depende de las tasas de ingreso, transformación, pérdida y sincronización (Lindón *et al.*, 2008). A su vez, Marcos *et al.*, (2008), señalaron que la MOS proveniente de hojarasca de coníferas tiene un carácter ácido que aumenta la acidez del suelo, coincidiendo nuevamente con lo encontrado en este trabajo, puesto que el pH del suelo disminuyó con la altitud, donde los bosques de *Pinus hartwegii* dominaron el dosel, coincidiendo también con el aumento de N total a lo largo del gradiente altitudinal y provocando a su vez la baja concentración de Mg intercambiable, que es un catión que contribuye a amortiguar la acidez del suelo. Ibarra *et al.*, (2009), señala que el pH del suelo influye en la disponibilidad de nutrimentos para las plantas que en él se establecen y puede provocar deficiencia o toxicidad debido a niveles inadecuados de los elementos en su solución; por ejemplo, la carencia de Mg estimula el incremento y distribución-del N dentro de la planta (Domínguez, 1989). Por otro lado, García (2008) menciona que los tejidos vegetales se constituyen de ceras, grasas resinas, proteínas, carbohidratos, ligninas, entre otras que, en proporciones variables, según la especie vegetal y estado vegetativo, la hojarasca al incorporarse a la cubierta del suelo, el almidón y la celulosa desaparecen rápidamente mientras que la hemicelulosa y las proteínas son usadas en una síntesis secundaria. Así, los restos vegetales ricos en hidratos de carbono con un adecuado contenido de proteínas y bajo en ligninas como en el caso de especies de hoja ancha se descomponen más rápidamente y en mayor proporción. Por lo contrario, materiales vegetales altos en ligninas, compuestos aromáticos y resinas como las especies de la familia *Pinaceae* son difíciles de descomponer, lo que aumenta su humificación y en consecuencia la acidez del suelo.

Según los resultados presentados en esta investigación, los bosques de *Pinus* desarrollados sobre suelos más ácidos que los de *A. religiosa* se puede atribuir a que el oyamel tiene en su tejido foliar mayor contenido de bases intercambiables que al llegar al suelo y formar parte de su cubierta amortiguan el efecto de la acidez en éste. Tal suposición se fundamenta en el trabajo de López-López

(2011), quien encontró que el pH de los suelos donde se desarrolla *A. religiosa* es cercano a la neutralidad debido al alto contenido de Ca y Mg encontrado en su tejido foliar. Esta situación también se presentó en suelos con bosques de *A. religiosa asociado* con otras especies de hoja ancha, donde se tuvo una menor acidez, lo cual puede explicar el mayor valor de vigor de la vegetación y la mejor productividad forestal en esos sitios.

Como ya se mencionó, los bosques de pino tienen sustancias ricas en anillos de benceno más difíciles de degradar que los bosques con árboles de latifoliadas con mayor contenido de azúcares con enlaces sencillos, originando en la cubierta edáfica bajo *Pinus* una mayor acumulación de humus y en consecuencia mayor acidez, razón por la cual se encontró que la vegetación con mayor índice de vigor presentó una menor acidez en el suelo, misma que determina la disponibilidad de nutrimentos a la biota. Otra razón por la que los bosques de oyamel presentaron mejor índice de vigor puede encontrarse en el trabajo de Gómez *et al.*, (2008), quienes indicaron un alto potencial de absorción del N en *A. religiosa* vía dosel. Estos mismos autores demostraron que en condiciones naturales el  $\text{NO}_3^-$  es más fácilmente lavado en el follaje debido a su alta movilidad y carga negativa en la zona de intercambio de la cutícula y bajo condiciones de precipitación ácida, se promueve la disolución de ceras de la cutícula y se favorece la absorción de  $\text{NH}_4^+$  por el follaje, lo cual explica la menor acidez del suelo bajo bosque de oyamel y la mayor concentración de N en el dosel de los sitios estudiados en el presente trabajo. El mismo trabajo de Gómez y colaboradores también contribuye a explicar las diferencias en porcentaje de N y Mg en mantillo. La menor concentración de Mg en mantillo bajo *A. religiosa* en comparación con *Pinus* puede relacionarse con el lavado del dosel; o bien, con la salud, edad y contenido de N y Mg en de las hojas puesto que tales elementos tienen la capacidad de moverse con facilidad dentro de la planta. Gallardo *et al.*, (2009) señalaron que la cantidad de nutrientes transferidos al suelo puede modificarse por reabsorción o retranslocación del nutrimento.

Lo discutido en párrafos anteriores hace suponer que los bosques de *Abies religiosa* tuvieron mayores porcentajes de N y Mg en tejido foliar y más vigor que las hojas de otros tipos de bosque debido a que los de oyamel tuvieron suelos con mayor cantidad de MOS y menor acidez que sugieren una adecuada tasa de mineralización y buena actividad microbiana que deriva en un mayor contenido de Mg intercambiable y N total solubilizados que las plantas toman, razón por la que el nitrógeno y magnesio foliar fue mayor en bosques de *A. religiosa* que en de *Pinus*, principalmente en los de *P. hartwegii* a mayor altitud debido al clima que prevalece en el límite de la línea de árboles y que

propicia que la concentración de nitrógeno foliar aumente como consecuencia de un retraso en la síntesis de proteínas que retrasa el crecimiento de la vegetación por la baja temperatura y disponibilidad de nutrientes (Körner 1998, Körner y Paulsen, 2004), correspondiéndose esto con lo observado en los valores de bajo vigor a mayor altitud,. Reich y Oleksyn, (2004); He *et al.*, (2006) encontraron que el N en los climas fríos puede favorecer un alto contenido de N en la hoja para compensar la baja eficiencia fisiológica a menor temperatura y propiciando una reducción de la fotosíntesis.

## 9.-CONCLUSIONES.

Suelos de sitios con mayor acumulación de MOS, N total, Mg intercambiable y pH cercano a la neutralidad tuvieron mayor valor de vigor de la vegetación y mayor contenido de N foliar.

El vigor de la vegetación tuvo relación con el pH y con el N y Mg del suelo y foliar.

La relación del N foliar con el vigor fue variable mientras que fue negativa entre Mg foliar y el NDVI

Se presentó relación positiva y significativa entre la MOS y el N de las hojas

La tendencia en entre las MOS y Mg foliar fue variable\*

La relación entre el N foliar con el vigor de la vegetación fue variable, mientras que fue negativa entre Mg foliar y el índice de vigor.

Bosques de **A. religiosa** tuvieron mayor acumulación de N y Mg en hojas, mantillo y suelos, correspondiendo con sitios con mayor vigor, mejor estructura, mas densos y mayor repoblamiento de brinzales que sitios con bosques de **Pinus**.

Bosques de **A. religiosa** con mayor volumen maderable tuvieron valores de vigor alto.

El vigor de la vegetación en bosques de **pinus** fue variable con respecto al volumen.

## 10.-RECOMENDACIONES

No se pudo establecer una relación Mg foliar con el vigor de la vegetación y la MOS atribuido a que la imagen de satélite corresponde a un año en específico mientras que los datos de la presente investigación corresponden a muestras tomadas en diferentes años lo cual explica la variabilidad encontrada.

Por lo anterior se recomienda analizar sitios con muestras del mismo año de la imagen de satélite y que correspondan a la misma estación; además de dar un seguimiento cronológico para observar el comportamiento de la vegetación y el de los parámetros físico-químico del suelo con el fin de conocer su dinámica y la historia del sitio.

## 11.-BIBLIOGRAFÍA.

- Alcaraz D., G. Baldi, P. Durante , M. F. Garbulsky 2008, ANÁLISIS DE LA DINÁMICA TEMPORAL DEL NDVI EN ÁREAS PROTEGIDAS: TRES CASOS DE ESTUDIO A DISTINTAS ESCALAS ESPACIALES, TEMPORALES Y DE GESTIÓN. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente 108-117 pp.
- Abraira v., Pérez v, 1996. "MÉTODOS MULTIVARIANTES EN BIOESTADÍSTICA"., ed. centro de estudios ramón areces.
- Allan, J. E. 1971. THE PREPARATION OF AGRICULTURAL SAMPLE FOR ANALYSIS BY ATOMIC ABSORPTION SPECTROSCOPY. varian techtron, walut creek california. u. s. a.
- Allen I., webster, "ESTADÍSTICA APLICADA A LOS NEGOCIOS Y LA ECONOMÍA", editorial mcgraw-hill, tercera edición, 2005
- Anaya, M., Martínez, M., Trueba, A., Figueroa, B., Fernández, O., García, R., Hiriart, F., López, R., Fernández, E., Bifano, R., Ortiz, B., Cervantes, I., Silva, S., Trueba, S., Ávila Bustamante, I. D., Blanco, G. 1991. MANUAL DE CONSERVACIÓN DEL SUELO Y DEL AGUA. 3ª edición. sarh-colegio de postgraduados. méxico 584 pp.
- Arriaga, I., Espinoza, J. M., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez I. y Loa, E. 2000. REGIONES TERRESTRES PRIORITARIAS DE MÉXICO. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México. <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/terrestres.html>
- Azcárate G, J., Ramírez, M. I., y Pinto, M. 2003 LAS COMUNIDADES VEGETALES DE LA SIERRA DE ANGANGUEO (ESTADOS DE MICHOACÁN Y MÉXICO, MÉXICO): Clasificación, Composición y Distribución — Lazaroa 24: 87-11.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. y Huete, A. R. 1995. ARCVIEW OF VEGETATION INDEX. Remote Sensing Reviews. 95-120 pp.
- Bautista A. C, Gutiérrez C., Castillo S y Etchevers B. 2005. CRONOSECUENCIA DE UN SUELO Y SU CLASIFICACIÓN EN UN ÁREA ORIGINALMENTE OCUPADA POR BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA. Terra latinoamericana, vol. 23, núm. 2, pp. 147-157
- Bautista, C. 2009. ROTACIÓN DE CULTIVOS FORRAJEROS DE CLIMAS TEMPLADOS Y CALIDAD DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO. Tesis de licenciatura. Fes zaragoza-UNAM. México. 105 pp.
- Belda F., Melia J y Segarra D. 1999. RELACIÓN ENTRE EL NDVI, PRECIPITACIÓN Y HUMEDAD DEL SUELO. APLICACIÓN A ZONAS FORESTALES DE LA PROVINCIA DE ALICANTE. Teledetección. Avances y aplicaciones. VIII congreso nacional de teledetección. albacete, españa, 80-83 pp
- Bosco I., Blanco J. A. y Castillo F. J. 2004. ECOLOGÍA DEL BOSQUE MEDITERRÁNEO EN UN MUNDO CAMBIANTE. GESTIÓN FORESTAL Y CICLOS DE NUTRIENTES EN EL MARCO DEL CAMBIO GLOBAL . Ministerio de medio ambiente, egraf, s. a., madrid. isbn: 84-8014-552-8. 479-506 pp
- Bremner, J. M. 1965. TOTAL NITROGEN. in: c. a. black (ed). Methods of Soil Analysis. part 2. agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. pp 1149-1178.

- Buendía, E., Terrazas, S., Vargas, E. 2002. APLICACIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE EN LA CARTOGRAFÍA DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN EN UNA REGIÓN DEL ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO. Revista chapingo serie ciencias forestales y del ambiente. 13-19 pp.
- Chapman, H. D. 1965. CATION EXCHANGE CAPACITY IN C.A. BLACK(ED) METHODS OF ANALYSIS. part 2 agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison Winconsin. 891-901 pp.
- Chavez, P.S. 1988. AN IMPROVED DARK-OBJECT SUBTRACTION TECHNIQUE FOR ATMOSPHERIC SCATTERING CORRECTION OF MULTISPECTRAL DATA. Remote sensing of environment 24:459-479.
- Chuvieco, e. 1996. FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL. 3ª edición. Madrid, España.
- conafor:[http://148.223.105.188:2222/gif/snif\\_portal/index.php?option=com\\_content&task=view&id=61&Itemid=69](http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/index.php?option=com_content&task=view&id=61&Itemid=69).
- Docampo G, González M. I., rego J. S. 2002. EL REALCE RADIOMÉTRICO DE LA FUSIÓN DE IMÁGENES LANDSAT – TM Y SPOT – P PARA LA CREACIÓN DE MAPAS EN COLOR REAL. XIV congreso internacional de ingeniería gráfica,santander,España.
- Duchaufour, p. 1975. MANUAL DE EDAFOLOGÍA. Editorial toray-masson. barcelona. 476 pp.
- Escamilla, M. 2007 LA VEGETACIÓN DE LA ALTA MONTAÑA DEL VOLCÁN IZTACCÍHUATL (MÉXICO): un enfoque fitosociológico. Tesis de maestría, facultad de ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 124 pp.
- España B. M., López P., Castellano M. V y Cárdenas N., 2006. ESTIMACIÓN DEL ESTADO NITROGENADO DE PLANTAS DE FRESAS A PARTIR DE SU RESPUESTA ESPECTRAL. Revista fitotecnia mexicana, vol 29, num 004, sociedad mexicana de fitogenética, a. c. chapingo, méxico. 349-356 pp
- Etchevers, J. D., Bautista, M. A. y Vergara, M. A. 2000. CALIDAD DE SUELO, INDICADORES DE CALIDAD Y CAPTURA DE CARBONO. La edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo II. Colegio de postgraduados, UNAM. UACH. México. 507-520 pp.
- Fernández N., Piñeiro G., 2008 LA CARACTERIZACIÓN DE LA HETEROGENEIDAD ESPACIAL DE LOS ECOSISTEMAS: EL USO DE ATRIBUTOS FUNCIONALES DERIVADOS DE DATOS ESPECTRALES. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente. 64-78 pp.
- Foth, H. D. 1980. FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA DEL SUELO. Continental editores.333-355 pp.
- Franzluebber, A. J. 2002. SOIL ORGANIC MATTER STRATIFICATION RATION AS AN INDICATOR OF SOIL QUALITY. Soil & Tillage research 66: 95- 106 pp.
- Gallardo A, Covelo F., Morillas I. y Delgado M 2009 CICLOS DE NUTRIENTES Y PROCESOS EDÁFICOS EN LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES: ESPECIFICIDADES DEL CASO MEDITERRÁNEO Y SUS IMPLICACIONES PARA LAS RELACIONES SUELO-PLANTA. REVISTA CIENTÍFICA Y TÉCNICA DE ECOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE. Ecosistemas 18 (2): 4-19.

- García M. P y Pérez G. M. 2001 DISCRIMINACIÓN DE GYPSISOLES MEDIANTE EL SENSOR ETM+DEL SATÉLITE LANDSAT-7 EDAFOLOGÍA, Vol. 8 (3), pp. 25-36
- García O. 2008. LA MATERIA ORGÁNICA (MOS) Y SU PAPEL EN LA LUCHA CONTRA LA DEGRADACIÓN DEL SUELO. XI congreso ecuatoriano de la ciencia del suelo.
- García, E. 2004 MODIFICACIONES AL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN. Serie libros, no. 6. Instituto de geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 90 pp.
- Gilabert, M. A., Gonzáles, J. y García, J. 1997. ACERCA DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN. Revista de teledetección no 8, diciembre. 1-10 pp.
- Giménez A., Escamilla W.M y Almeida L. L. 2009. DATOS SOBRE LA VEGETACIÓN HIGRÓFILA ALTIMONTANA DEL VOLCÁN IZTACCÍHUATL (MÉXICO). Lazaroa 30: 109-118 pp.
- Gutiérrez M. R., Escalante- J.E, Rodríguez G. M. y Reynolds M. P., 2004. ÍNDICES DE REFLECTANCIA Y RENDIMIENTO DEL FRIJOL CON APLICACIONES DE NITRÓGENO. Universidad Autónoma Chapingo México. Terra latinoamericana, vol. 22, núm. 4, octubre-diciembre, 2004, pp. 409-416
- Hernández, M. A. y Granados, D. 2006. EL PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL-ZOQUIAPAN Y EL IMPACTO ECOLÓGICO-SOCIAL DE SU DETERIORO. Revista Chapingo. Serie ciencias forestal y del ambiente, julio-diciembre, año/vol. 12, numero 002. 101-109 pp.
- Ibarra C., Ruiz C. J., González E. D., Flores G. J., y Díaz P. G., 2009 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL pH DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS DE ZAPOPAN, JALISCO, MÉXICO. Agricultura Técnica en México Vol. 35 Núm.3 p. 267-276
- Jackson, M. I. 1964. ANÁLISIS QUÍMICO DEL SUELO. editorial. omega. españa.
- Jensen, J. R. 2007. REMOTE SENSING OF THE ENVIRONMENT AN EARTH RESOURCE PERSPECTIVE. 2<sup>da</sup> edición. Pearson-prentice hall. u. s. a. 592 pp.
- Keneib, W. Miehlich, G. y Zöttl H. 1973 CLASIFICACIÓN REGIONAL DE LOS SUELOS DE LA SIERRA NEVADA DE MÉXICO. Comunicaciones del proyecto Puebla-Tlaxcala, México 7:11-14.
- Lauer, W. 1973 PROBLEMAS CLIMATO-ECOLÓGICOS DE LA VEGETACIÓN DE LA REGIÓN MONTAÑOSA ORIENTAL MEXICANA COMUNICACIONES. Proyecto Puebla-Tlaxcala, México : 37-46 pp.
- Lauer, W. y Klaus, D. 1975 GEOECOLOGICAL INVESTIGATIONS ON THE TIMBERLINE OF PICO DE ORIZABA. Mexico. arct. Alp. res. : 315-330.
- Linares, N., Salas, S. y Canga H. 2008. APLICACIÓN DE LOS SIG A LA GESTIÓN DEL PATRIMONIO PÚBLICO DE SUELO. Revista internacional de ciencia y tecnología de la información geográfica. nº 8. 43-65 pp.
- López J, Fernández Henao y Lozada R. 2008. ANÁLISIS FACTORIAL CON COMPONENTES PRINCIPALES PARA INTERPRETACION DE IMÁGENES SATELITALES "LANDSAT TM 7" APLICADO EN UNA VENTANA DEL DEPARTAMENTO DE RISARALDAS. Ciencia et Technica año XIV, No 38. Universidad tecnológica de pereira. ISSN 0122-1701- 241-246 pp.

- López N. G. 2011. LA FIRMA ESPECTRAL DEL ABIES RELIGIOSA EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA MARIPOSA MONARCA. Programa de posgrado en ciencias de la tierra. UNAM.
- López, M. 2009. COMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN UNA TOPOSECUENCIA DE LA RESERVA ECOLÓGICA EL EDÉN QUINTANA ROO Y SU RELACIÓN CON LOS FACTORES AMBIENTALES. Tesis de licenciatura. Fes zaragoza-UNAM. México.
- Lutz, H. J., y Chandler, R. F. 1946. FOREST SOILS. John Wiley and Sons. U. S. A.
- Maass, S. Regil, H. H., González, C. y Nava, G. 2006. CAMBIO DE USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN EN EL PARQUE NACIONAL NEVADO DE TOLUCA, MÉXICO, EN EL PERIODO 1972-2000. Investigaciones geográficas, boletín del instituto de geografía, unam, núm. 61. 38-57, pp.
- Marcos P., Calvo G., Marcos M.J., Taboada P. y García M. 2008. INFLUENCIA DEL DOSEL ARBÓREO EN LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL SUELO. ANÁLISIS COMPARATIVO DE SUELO BAJO ROBLEDALES, HAYEDOS Y PINARES. Sociedad española de ciencias forestales. 287-292 pp.
- Márquez C, M. J. 1988. PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA PARA CIENCIAS QUÍMICAS-BIOLÓGICAS. McGraw-Hill. México. 657 pp.
- Maruri A. J. 2005. INDICE DE VEGETACIÓN (NDVI) CENTRO DE INFORMACIÓN AGROPECUARIA. Gobierno del estado de Querétaro secretaría de desarrollo agropecuario.
- Miehlich G, (1980). LOS SUELOS DE LA SIERRA NEVADA EN MÉXICO. Fundación alemana para la investigación científica. Suplemento comunicaciones, proyecto Puebla-Tlaxcala
- Mooser, F. 1975 HISTORIA GEOLÓGICA DE LA CUENCA DE MÉXICO — IN: MEMORIAS DE LAS OBRAS DEL SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO DEL DISTRITO FEDERAL. Departamento del Distrito Federal— México. D. F. tomo 1: 7-38.
- Mooser, F., Montiel, A. y Zúñiga, A. 1996 NUEVO MAPA GEOLÓGICO DE LAS CUENCAS DE MÉXICO, TOLUCA Y PUEBLA. ESTRATIGRAFÍA, TECTÓNICA REGIONAL Y ASPECTOS GEOTÉRMICOS. Comisión Federal de Electricidad. México. 27 pp.
- Morgan, J. y López, M. U. 1996. EROSIÓN Y CONSERVACIÓN DE SUELO. Editorial aedos-mundi-prensa. España. 87-88 pp.
- Moyano A., Gallardo I.J. y Charro E. 2005 COMPORTAMIENTO DEL CARBONO ORGÁNICO EN DOS SUELOS FORESTALES DE LA SIERRA DE GATA (PROVINCIA DE SALAMANCA). Sociedad española de ciencias forestales. 245-250 pp.
- Obieta, M. y Sarukan, J. 1981 ESTRUCTURA DE LA VEGETACIÓN HERBÁCEA DE UN BOSQUE UNIESPECÍFICO DE PINUS HARTWEGII. Bol. Soc. Bot. México 41: 75-125.
- Ortega A. M., Hernández I. Alba I y Aparicio A. 2003 GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO INICIAL DE PINUS HARTWEGII LINDL. DE SIETE POBLACIONES DEL ESTADO DE MÉXICO. Foresta Veracruzana, vol. 5, num 002. Universidad Veracruzana Xalapa, México. 29-34 pp.



- Palomares y reyes tárrega garcía-mares 2008. INFLUENCIA DEL DOSELARBÓREO EN LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL SUELO. ANÁLISIS COMPARATIVO DE SUELO BAJO ROBLEDAL, HAYEDOS Y PINARES. Sociedad española de ciencias forestales 287-292 pp.
- Parisi, v. 1979. BIOLOGÍA Y ECOLOGÍA DEL SUELO. blume. españa. 11-25 pp.
- Paruelo J.M 2008. LA CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE ECOSISTEMAS MEDIANTE SENSORES REMOTOS. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente. 4-22 pp (paruelo 2008)
- Peña, J. 2009. CONTENIDO FOLIAR DE ZN, MN, CU Y FE EN PINUS, ABIES Y QUERCUS EN BOSQUES DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS. Tesis de licenciatura. Fes zaragoza-UNAM. México. 127 pp.
- Pritchett, w. 1991. SUELOS FORESTALES PROPIEDADES, CONSERVACIÓN Y MEJORAMIENTO. Limusa-Noriega editores. México. 634 pp.
- Reyes, H., Aguilar, M., Aguirre, J. R. y Trejo, I. 2006. CAMBIOS EN LA CUBIERTA VEGETAL Y USO DEL SUELO EN EL ÁREA DEL PROYECTO PUJAL-COY, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO, 1973-2000. Boletín del instituto de geografía, UNAM, núm. 59. 26-42 pp.
- Reyes, p. 1990. BIOESTADÍSTICA APLICADA: AGRONOMÍA, BIOLOGÍA, QUÍMICA. 2ª edición. Trillas. méxico. 216 pp.
- Romahn, c., h. Ramírez y Treviño j. 1994. DENDROMETRÍA. Universidad Autónoma Chapingo. 354 pp.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. y Deering, D. W. 1974. MONITORING VEGETATION SYSTEMS IN THE GREAT PLAINS WITH ERTS. Proc. third earth resources technology satellite-1 symp., goddard space flight center, nasa sp-351, science and technical information office, nasa, washington, d. c.
- Rzedowski, J.1978. LA VEGETACIÓN DE MÉXICO — ED. limusa, México D.F. 431 pp.
- Salisbury, F. B. y Ross, C. W. 1994. FISIOLOGÍA VEGETAL. Grupo editorial Iberoamérica. 229-248 pp.
- Sánchez A.G, López M y Granados S. D. 2005. SEMEJANZA FLORÍSTICA ENTRE LOS BOSQUES DE ABIES RELIGIOSA (H.B.K.) CHAM. & SCHLTDL. DE LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA. Investigaciones Geográficas, boletín del instituto de geografía, UNAM. ISSN 0188-4611, núm, 56, 2005, pp. 62-76
- sánchez b., Ruiz M y Ríos M.M. 2005. MATERIA ORGÁNICA Y ACTIVIDAD BIOLÓGICA DEL SUELO EN RELACIÓN CON LA ALTITUD, EN LA CUENCA DEL RÍO MARACAY, ESTADO ARAGUA. Agronomía trop. 55. 507-534 pp.
- Sánchez E.R., Torres C. M., Fernández A., Palacios C., Aguilar A. M., Pino S., Granado R.L., 2000. COMPARACIÓN DEL NDVI CON EL PVI Y EL SAVI COMO INDICADORES PARA LA ASIGNACIÓN DE MODELOS DE COMBUSTIBLE PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE INCENDIOS EN ANDALUCÍA. Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible. Departamento de geografía. Universidad de Alcalá. 164-174pp.
- Sánchez, B. M., Ruiz, M. M. 2005. MATERIA ORGÁNICA Y ACTIVIDAD BIOLÓGICA DEL SUELO EN RELACIÓN CON LA ALTITUD, EN LA CUENCA DEL RÍO MARACAY, ESTADO ARAGUA. Agronomía trop. 507-534 pp.

- Sánchez, E., Torres, M. A., Fernández, A., Aguilar, M. y Granados, I. 2002. COMPARACIÓN DEL NDVI CON EL PVI Y EL SAVI COMO INDICADORES PARA LA ASIGNACIÓN DE MODELOS DE COMBUSTIBLE PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE INCENDIOS EN ANDALUCÍA. *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible*. Departamento de geografía, universidad de Alcalá. España. 164-174 pp.
- Teuscher, H. y Adler, R. 1980. EL SUELO Y SU FERTILIDAD. Editorial continental. México. 510 pp.
- Troll c. 1971. LANDSCAPE ECOLOGY (GEOECOLOGY) AND BIOCENOLOGY. TERMINOLOGICAL STUDY. *Geoforum* 8: 43-46.
- Velásquez, E., Lavelle, P. y Andrade, M. 2007. GISQ, A MULTIFUNCTIONAL INDICATOR OF SOIL QUALITY. *Soil biology & biochemistry*. colombia. 3066-3080 pp.
- Werner, j.1978. LOS SUELOS DE LA CUENCA ALTA DE PUEBLA-TLAXCALA Y SUS ALREDEDORES. Fundación alemana para la investigación científica. Proyecto puebla- tlaxcala, méxico.
- White, S.E.1962. EL IZTACCÍHUATL: ACONTECIMIENTOS VOLCÁNICOS Y GEOMORFOLÓGICOS EN EL LADO OESTE DURANTE EL PLEISTOCENO SUPERIOR. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México D.F. 80 pp.
- Zérega I., Hernández A y Valladares G. 1997. EFECTO DE DIFERENTES FUENTES DE NITRÓGENO Y DOSIS DE MAGNESIO SOBRE EL SUELO Y EL CULTIVO DE CAÑA DE AZUCAR. *Bioagro* 9 (2): 43-51 pp
- Zwart M.A., Rojo J.M., Cruz R., j. Yeomans 2005. COBERTURAS Y LA SALUD DEL SUELO. *Tierra tropical* . 9-20
- CONANP, 2009. En línea <http://iztapopo.conanp.gob.mx/> consultado el 09 de enero de 2010.
- jose alberto oliveira prendes, elías afif Khouri y matías mayor lópez, 2006. analisis de suelos y plantas y recomendaciones de abonado, ediciones de la universidad de oviedo <http://www.uniovi.es/publicaciones>
- Valderrábano J. 2012. Calidad del suelo Forestal y su distribución espacial en bosques de coníferas del parque nacional iztapopo. Tesis de Maestría. UNAM-Instituto de Geología. Pp 150
- Domínguez, A. (1989). Tratado de fertilización. 2 ed. Madrid: Ediciones Mundi Prensa. 601p.
- He Y., M. Huang., A. Pereira G., A. Gómez H., and H. Song. 2007. Prediction of soil macronutrients content using near-infrared spectroscopy. *Computers and Electronics in Agric.* 58(2): 144-153.
- Lara R.G, Sánchez V, Corral A. 2009 REGENERATION OF *Abies religiosa* IN CANOPY GAPS VERSUS UNDERSTORY, COFRE DE PEROTE NATIONAL PARK, MÉXICO. *AGROCIENCIA*. 739-747.pp
- Spies, T. A., and J. F. Franklin. 1989. Gap characteristics and vegetation response in coniferous forest of the Pacific Northwest. *Ecology* 70:543-545.
- Pham, A. T., L. D. E. Grandpré, and S. Gauthier. 2004. Gap dynamics and replacement patterns in gaps of the northeastern boreal forest of Quebec. *Can. J. For. Res.* 34: 353-364.
- Worrall, J. J., T. D. Lee, and T. C. Harrington. 2005. Forest dynamics and agents that initiate and expand canopy gaps in *Picea -Abies* forest of Crawford Notch, New Hampshire, USA. *J. Ecol.* 93:178-190.

## 12.-ANEXO

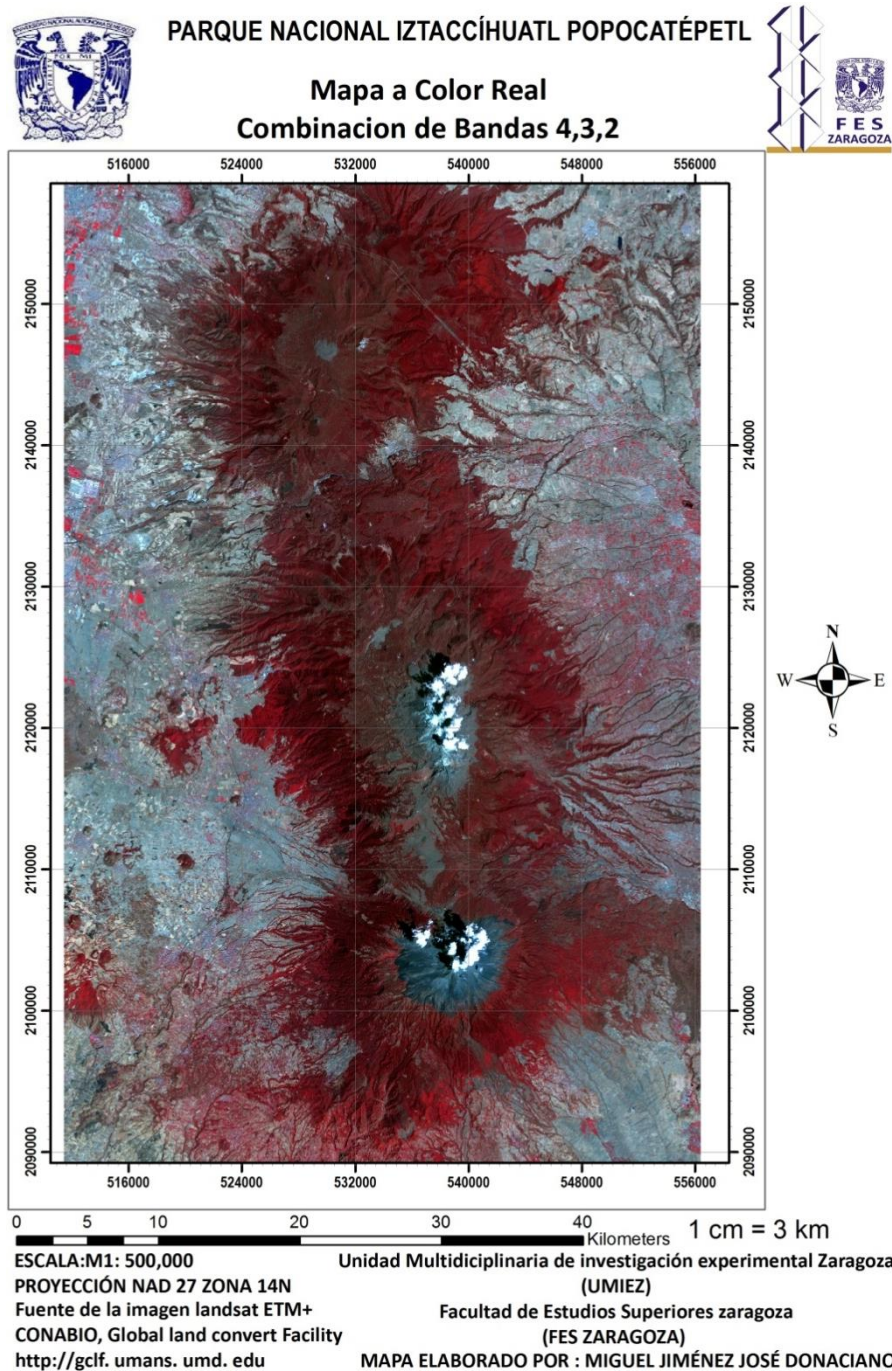


Figura 72.- Mapa combinación 4,3,2. Falso color.

En la composición 432 (Falso color, Figura Anexo 1), la vegetación se puede observar en color rojo y de acuerdo con Docampo *et al.*, 2000, entre más fuerte sea el color rojo la vegetación presenta menos estrés.



PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL POPOCATÉPETL



Mapa a Color Real  
Combinacion de Bandas 3,NDVI,4

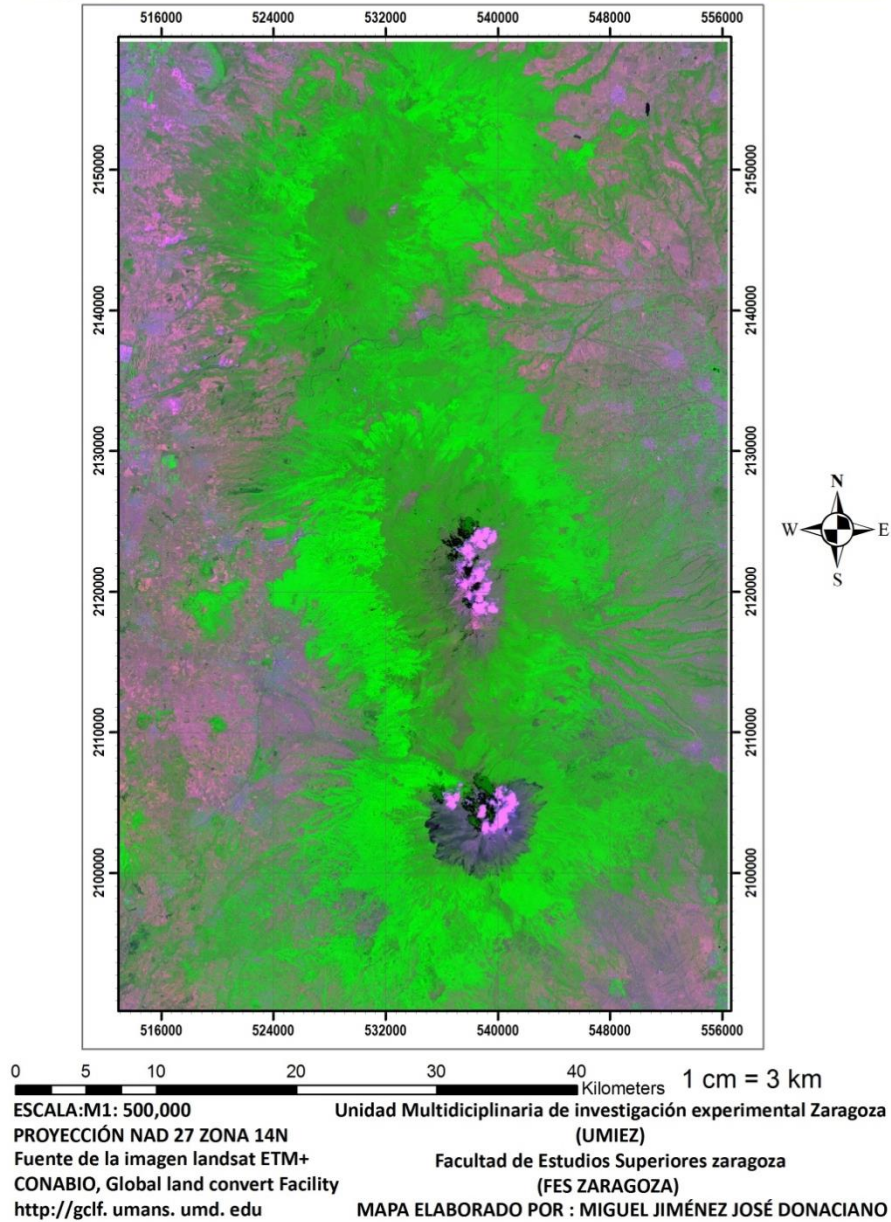


Figura 73.- Mapa combinación 3-NDVI-1. Falso color.

En la que corresponde también al vigor de la vegetación pero con la combinación de bandas 3-NDVI-1 (Parimbelli 2005), donde las zonas con vegetación se ven en color verde limón, lo cual representa las zonas con mayor vigor donde existen superficies con bosque denso, verde fuerte (menos vigor que corresponden a zonas de bosque abierto, campos de cultivo con humedad o pastizal) y las áreas color magenta corresponden a sitios sin vegetación (infraestructura urbana, suelo desnudo y material rocoso(Figura Anexo 2).

Cuadro 33.- Cuadro de datos Anexo.

| ID | Localidad            | COORDENADAS |         | Fecha      | ANP | Pen  | Exp | Genero                 | Especie   | Altitud | pH   | MOS  | % tejido foliar |       | % mantillo |       | N total | Mg    | CIC  | suelos | C/N   | Vigor | NIVEL    |                |
|----|----------------------|-------------|---------|------------|-----|------|-----|------------------------|---|---------|------|------|-----------------|-------|------------|-------|---------|-------|------|--------|-------|-------|----------|----------------|
|    |                      | X           | Y       |            |     |      |     |                        |   |         |      |      | N               | Mg    | N          | Mg    |         |       |      |        |       |       |          | %              |
| 1  | 26                   | 518085      | 2142330 | 16/03/2002 | 2   | 22.5 | S   | pinus                  | P. patula   | 2580    | 5.80 | 4.68 | 4.516           | 1.552 | 0.456      | 0.924 | 2.84    | 0.136 |      | Q      | 19.26 | 0.040 | muy bajo |                |
| 2  | W de D 14            | 529032      | 2101200 | 22/01/2002 | 1   | 35   | W   | pinus                  | P. montezumae                                       | 2650    | 6.05 | 4.31 | 2.432           | 1.404 | 0.195      | 0.970 | 0.15    | 0.037 | 0.24 | 3.57   | M5    | 38.13 | 0.270    | bajo           |
| 3  | W-D14                | 528925      | 2101465 | 18/06/2004 | 1   | 19   | N   | pinus                  | P. pseudostrobus                                    | 2650    | 5.35 | 4.88 | 1.191           | 0.669 | 0.166      | 0.357 | 0.12    | 0.072 | 0.80 | 5.27   | M5    | 9.60  | 0.348    | bajo muy alto  |
| 4  | Cuilochochitla       | 527927      | 2114839 | 18/07/2001 | 1   | 10   | S   | pinus                  | P. teocote  | 2710    | 6.20 | 4.91 | 3.037           | 0.983 | 0.109      | 0.880 | 0.25    | 0.078 | 3.87 | 7.82   | M4    | 22.59 | 0.800    | bajo           |
| 5  | 29                   | 522227      | 2140551 | 23/03/2002 | 2   | 10   | S   | pinus                  | P. teocote  | 2722    | 6.20 | 5.45 | 2.174           | 1.321 | 0.944      | 0.972 | 2.27    | 0.120 | 2.98 | 21.08  | M3    | 10.51 | 0.225    | bajo           |
| 6  | D 14                 | 529850      | 2101950 | 22/01/2002 | 1   | 20   | W   | pinus                  | P. montezumae                                       | 2800    | 6.20 | 4.61 | 2.245           | 0.893 | 0.105      | 0.980 | 0.23    | 0.047 | 0.56 | 2.47   | D3    | 27.71 | 0.267    | bajo           |
| 7  | 2_3                  | 540977      | 2132834 | 18/01/2002 | 2   | 5    | SE  | avena                  |   | 2800    | 6.21 | 5.44 | 11.090          | 1.898 | 0.208      | .     | .       | 0.116 | 1.41 | 11.22  | M2    | 55.45 | 0.580    | medio          |
| 8  | D 3                  | 530240      | 2108542 | 14/07/2001 | 1   | 16   | NE  | A. religiosa           | A. religiosa  | 2832    | 6.40 | 5.17 | 5.360           | 1.409 | 0.200      | 0.580 | 0.26    | 0.067 | 0.92 | 6.87   | I3    | 46.40 | 0.308    | bajo           |
| 9  | Barranca apapaxo     | 532177      | 2094455 | 13/12/2004 | 1   | 60   | NW  | A. religiosa           | P. montezumae, A. religiosa                         | 2834    | 5.90 | 5.10 | 8.455           | 0.993 | 0.201      | 0.486 | 0.20    | 0.122 | 1.42 | 15.64  | D3    | 40.20 | 0.205    | bajo           |
| 10 | 18                   | 522168      | 2143256 | 16/03/2002 | 2   | 66   | NW  | A. religiosa           | P. teocote, A. religiosa                            | 2850    | 6.50 | 5.62 | 6.690           | 1.792 | 0.736      | 1.309 | 3.42    | 0.537 |      | M3     | 7.23  | 0.290 | bajo     |                |
| 11 | NW de texola         | 538309      | 2139414 | 25/09/2004 | 2   | 33   | N   | pinus                  | Pinus sp<br>P. teocote, P. pseudostrobus, P. patula | 2876    | 5.65 | 5.25 | 4.467           | 0.619 | 0.188      | 0.578 | .       | 0.090 | 2.61 | 21.96  | M2    | 28.79 | 0.550    | medio          |
| 12 | Pasiontitla          | 530800      | 2114850 | 09/11/2001 | 1   | 35   | W   | pinus                  |   | 2900    | 6.34 | 5.12 | 3.484           | 1.522 | 0.114      | 0.930 | 0.20    | 0.220 | 0.51 | 1.79   | I3    | 9.19  | 0.670    | alto           |
| 13 | 25                   | 522985      | 2142335 | 16/03/2002 | 2   | 25   | NW  | pinus                  | P. pseudostrobus                                    | 2900    | 6.00 | 5.29 | 4.516           | 1.070 | 0.477      | 0.462 | 7.18    | 0.180 | 2.62 | 18.54  | M3    | 14.55 | 0.275    | bajo           |
| 14 | O 17                 | 530582      | 2112415 | 13/07/2001 | 1   | 42   | S   | pinus                  | P. montezumae, P. Pseudostrobus                     | 2918    | 6.40 | 4.93 | 2.323           | 1.529 | 0.092      | 1.010 | 0.25    | 0.170 | 1.84 | 5.83   | I3    | 7.93  | 0.508    | medio          |
| 15 | O 18                 | 531440      | 2112175 | 13/07/2001 | 1   | 80   | NE  | A. religiosa           | A. religiosa  | 2932    | 6.80 | 5.77 | 3.216           | 1.317 | 0.112      | 1.060 | 0.28    | 0.188 | 2.74 | 7.22   | I2    | 9.92  | 0.660    | alto           |
| 16 | La Papa acatzli      | 546875      | 2121540 | 19/02/2005 | 1   | 15   | SE  | pinus                  | P. montezumae, P. patula                            | 2964    | 5.00 | 3.64 | 0.490           | 0.565 | .          | .     | .       | 0.093 | 1.54 | 12.41  | M1    | 3.06  | 0.580    | medio          |
| 17 | D 11                 | 532240      | 2107789 | 14/07/2001 | 1   | 4    | W   | A. religiosa           | A. religiosa  | 2965    | 6.52 | 5.19 | 6.253           | 1.330 | 0.170      | 0.870 | 0.31    | 0.314 | 3.12 | 7.68   | D3    | 11.55 | 0.370    | bajo           |
| 18 | D11 Cañada La Coquia | 532792      | 2107890 | 02/04/2004 | 2   | 25   | SW  | A. religiosa-Cupressus | A. religiosa, Cupressus sp                          | 2965    | 5.71 | 5.20 | 9.529           | 0.441 | 0.242      | 0.252 | 0.33    | 0.106 | 2.25 | 16.12  | D3    | 52.14 | 0.430    | medio muy alto |
| 19 | Las Anomias          | 531400      | 2115570 | 09/11/2001 | 1   | 25   | W   | A. religiosa           | A. religiosa  | 3000    | 6.34 | 4.90 | 11.524          | 1.471 | 0.178      | .     | .       | 0.210 | 1.04 | 4.72   | I2    | 31.83 | 0.930    | bajo           |
| 20 | 24                   | 523629      | 2141260 | 16/03/2002 | 2   | 47   | SW  | pinus                  | P. pseudostrobus                                    | 3000    | 6.30 | 5.36 | 9.366           | 1.147 | 0.286      | 0.616 | 1.75    | 0.270 |      | M3     | 20.12 | 0.467 | medio    |                |
| 21 | 35                   | 522597      | 2149404 | 26/04/2002 | 2   | 37.5 | NW  | A. religiosa           | A. religiosa  | 3000    | 6.15 | 5.16 | 5.854           | 1.378 | 1.291      | 0.991 | 4.27    | 0.354 | 2.77 | 35.57  | M3    | 9.59  | 0.300    | bajo           |
| 22 | Cañada Atlapulco     | 524251      | 2149554 | 08/05/2004 | 2   | 35   | NE  | A. religiosa-Quercus   | A. religiosa, Quercus sp                            | 3003    | 5.70 | 5.09 | 5.956           | 0.954 | 0.275      | 0.174 | 0.25    | 0.110 | 2.17 | 20.33  | L     | 31.40 | 0.770    | alto           |

ANP: area natural protegida, pen: pendiente, exp:exposición, ci: cationes intercambiables. C=N = relación carbono nitrógeno

Cuadro 33(continuación)Cuadro de datos (anexo).

| ID | LOCALIDAD             | COORDENADAS |         | FECHAS     | ANP | PEN  | EXP | GENERO                | ESPECIE   | ALTITUD | pH   |       |        | % tejido foliar |       |       |      | N     |      | Mg    | Cl | suelos | C/N   | VIGOR             | NIVEL |
|----|-----------------------|-------------|---------|------------|-----|------|-----|-----------------------|---|---------|------|-------|--------|-----------------|-------|-------|------|-------|------|-------|----|--------|-------|-------------------|-------|
|    |                       | NAD 27      | X       |            |     |      |     |                       |   |         | Y    | (H2O) | (KCl)  | %               | N     | Mg    | N    | Mg    | %    |       |    |        |       |                   |       |
| 23 | Sn Miguel Tlaixpan    | 524968      | 2150047 | 08/05/2004 | 2   | 55   | E   | Quercus               | Quercus sp  | 3066    | 5.90 | 4.82  | 7.444  | 0.941           | 0.185 | 0.276 | 0.25 | 0.072 | 2.32 | 25.90 | M3 | 59.97  | 0.355 | bajo muy bajo     |       |
| 24 | 11                    | 525026      | 2136222 | 08/02/2002 | 2   | 20   | W   | pinus                 | Pinus sp  | 3086    | 6.23 | 5.80  | 6.053  | 1.070           | 0.412 | 0.770 | 3.06 | 0.157 | 1.66 | 14.78 | M3 | 22.36  | 0.017 | bajo              |       |
| 25 | Sur de el salto       | 534478      | 2096137 | 14/12/2004 | 1   | 8    | NW  | A.religiosa           | P. patula, A. religiosa                             | 3099    | 6.10 | 5.27  | 4.626  | 0.857           | .     | 0.388 | .    | 0.024 | 1.15 | 14.42 | D3 | 111.81 | 0.540 | medio muy bajo    |       |
| 26 | 17                    | 537794      | 2146105 | 23/02/2002 | 2   | 14   | N   | pinus                 | P. montezumae                                       | 3100    | 6.50 | 4.61  | 7.861  | 1.186           | 0.523 | 0.963 | 2.00 | 0.270 | 1.87 | 16.81 | L  | 16.89  | 0.190 | bajo muy alto     |       |
| 27 | 23                    | 524358      | 2141569 | 16/03/2002 | 2   | 10   | SW  | pinus                 | P. patula P. pseudostrobus, P. ayacahuite           | 3100    | 6.32 | 5.44  | 7.025  | 1.648           | 0.797 | 1.271 | 4.02 | 0.294 |      |       | M3 | 13.86  | 0.800 | alto              |       |
| 28 | La ventana            | 544221      | 2109851 | 19/11/2004 | 1   | 16   | E   | pinus                 |   | 3127    | 5.62 | 4.72  | 0.946  | 0.778           | 0.173 | 0.288 | 0.15 | 0.032 | 0.74 | 4.71  | C1 | 17.14  | 0.340 | bajo              |       |
| 29 | 7                     | 528594      | 2137425 | 07/02/2002 | 2   | 13.7 | SE  | pinus                 | Pinus sp P. teocote, P. pseudostrobus, A. religiosa | 3150    | 5.60 | 4.91  | 14.431 | 1.378           | 0.470 | 1.117 | 0.88 | 0.510 | 1.68 | 11.94 | L  | 16.41  | 0.370 | bajo              |       |
| 30 | 1                     | 534887      | 2141723 | 10/12/2001 | 2   | 40   | SE  | Pinus-A.religiosa     | P. montezumae, P. Pseudostrobus                     | 3155    | 6.15 | 5.12  | 14.264 | 1.641           | 0.462 | 1.078 | 1.85 | 0.481 | 2.17 | 18.98 | L  | 17.20  | 0.040 | muy bajo muy bajo |       |
| 31 | 14                    | 528614      | 2136185 | 22/02/2002 | 2   | 17.5 | SW  | pinus                 |   | 3182    | 5.80 | 4.46  | 10.354 | 1.257           | 1.070 | 0.886 | 1.29 | 0.375 | 1.73 | 13.75 | K2 | 16.01  | 0.177 | bajo              |       |
| 32 | O 16                  | 532250      | 2102150 | 22/01/2002 | 1   | 55   | S   | A. religiosa          | A. religiosa  | 3225    | 6.20 | 4.99  | 7.483  | 1.702           | 0.183 | .     | .    | 0.047 | 1.20 | 4.13  | C1 | 92.36  | 0.712 | alto              |       |
| 33 | O16                   | 531169      | 2100270 | 18/06/2004 | 1   | 55   | W   | A. religiosa          | A. religiosa  | 3225    | 6.00 | 5.34  | 1.489  | 0.602           | 0.150 | 0.381 | 0.16 | 0.057 | 1.05 | 9.92  | D3 | 15.15  | 0.680 | alto              |       |
| 34 | D2 4                  | 532351      | 2106898 | 28/09/2001 | 1   | 20   | SW  | A. religiosa          | A. religiosa  | 3228    | 6.44 | 5.70  | 15.187 | 1.817           | 0.176 | 1.120 | 0.23 | 0.228 | 2.37 | 7.62  | D3 | 38.64  | 0.870 | alto              |       |
| 35 | Pto. 8                | 532419      | 2115364 | 01/04/2004 | 2   | 65   | NE  | A.religiosa-Cupressus | A. religiosa, Cupressus sp                          | 3231    | 5.50 | 5.05  | 3.871  | 0.531           | 0.292 | 0.433 | 0.16 | 0.081 | 1.47 | 13.99 | I2 | 27.72  | 0.800 | muy alto          |       |
| 36 | O 1 Suereste barranca | 533236      | 2108833 | 29/06/2001 | 1   | 65   | S   | A.religiosa pinus-    | P. montezumae, A. religiosa                         | 3250    | 6.70 | 5.86  | 4.395  | 1.439           | 0.135 | .     | .    | 0.237 | 3.88 | 10.29 | C1 | 10.76  | 1.000 | muy alto          |       |
| 37 | tlalquecotchcotl      | 543181      | 2114683 | 20/01/2005 | 1   | 45   | SE  | A.religiosa-cupressus | P. ayacahuite, A. religiosa, Cupressus sp           | 3281    | 6.30 | 5.37  | 2.393  | 0.733           | .     | 0.443 | .    | 0.068 | 1.01 | 9.90  | C1 | 20.41  | 0.680 | alto muy alto     |       |
| 38 | O1 Sn.Pedro           | 533405      | 2108985 | 31/01/2004 | 2   | 60   | SW  | A. religiosa          | A. religiosa  | 3286    | 5.45 | 5.07  | 6.998  | 0.505           | 0.291 | 0.286 | 0.17 | 0.117 | 1.98 | 18.78 | C1 | 34.69  | 0.960 | alto              |       |
| 39 | F 1                   | 533304      | 2111309 | 29/06/2001 | 1   | 30   | W   | pinus                 | P. pseudostrobus, P. hartwegii                      | 3288    | 5.91 | 4.59  | 6.253  | 1.368           | 0.087 | 1.200 | 0.27 | 0.172 | 1.29 | 4.31  | C1 | 21.09  | 0.198 | bajo              |       |
| 40 | O 2                   | 533500      | 2109750 | 22/10/2001 | 1   | 35   | W   | A. religiosa          | A. religiosa  | 3300    | 6.53 | 5.58  | 6.969  | 1.843           | 0.206 | 0.870 | 0.23 | 0.087 | 1.21 | 4.47  | C1 | 46.46  | 0.475 | medio             |       |
| 41 | Cruce el 8            | 532250      | 2115850 | 09/11/2001 | 1   | 25   | SW  | A. religiosa          | A. religiosa  | 3300    | 5.91 | 4.96  | 17.820 | 1.573           | 0.194 | 1.450 | 0.25 | 0.330 | 1.96 | 6.72  | I1 | 31.32  | 0.783 | alto              |       |
| 42 | Valle Norte barranca  | 530838      | 2126706 | 21/08/2004 | 1   | 24   | NW  | A.religiosa Pinus-    | P. teocote. A. religiosa                            | 3301    | 5.10 | 4.44  | 10.570 | 0.790           | 0.159 | 0.422 | 0.13 | 0.249 | 1.68 | 13.13 | K1 | 24.62  | 0.265 | bajo              |       |
| 43 | mata leones           | 536262      | 2097553 | 13/12/2004 | 1   | 20   | S   | A.religiosa           | P. hartwegii, A. religiosa                          | 3312    | 5.45 | 4.43  | 8.295  | 0.987           | 0.230 | 0.688 | 0.23 | 0.085 | 0.74 | 5.25  | C1 | 56.61  | 0.753 | alto              |       |

anp: area natural protegida, pen: pendiente, exp:exposición, ci: cationes intercambiables

Cuadro 33(continuación).- Cuadro de datos (anexo) 1.

| ID | LOCALIDAD                 | COORDENADAS |         | FECHAS     | ANP | PEN  | EXP | GENERO              | ESPECIE                             | ALTITUD | pH    |       | % tejido foliar |       | % mantillo |       | N total |       | Mg   | Cl    | suelos | C/N   | VIGOR | NIVEL         |
|----|---------------------------|-------------|---------|------------|-----|------|-----|---------------------|-------------------------------------|---------|-------|-------|-----------------|-------|------------|-------|---------|-------|------|-------|--------|-------|-------|---------------|
|    |                           | NAD 27      |         |            |     |      |     |                     |                                     |         | (H2O) | (KCl) | %               | N     | Mg         | N     | Mg      | %     |      |       |        |       |       |               |
|    |                           | X           | Y       |            |     |      |     |                     |                                     | m snm   |       |       |                 |       |            |       |         |       |      |       |        |       |       |               |
| 44 | Agua escondida            | 542286      | 2110002 | 19/11/2004 | 1   | 60   | E   | pinus               | P. montezumae, P.teocote            | 3333    | 5.24  | 5.05  | 7.429           | 0.759 | 0.138      | 0.733 | 0.21    | 0.262 | 1.52 | 11.85 | C1     | 16.45 | 0.503 | medio         |
| 45 | O 15                      | 533082      | 2106584 | 28/09/2001 | 1   | 44   | N   | A. religiosa        | A. religiosa                        | 3336    | 6.00  | 4.70  | 17.820          | 1.407 | 0.192      | 1.000 | 0.30    | 0.245 | 2.29 | 6.89  | D3     | 42.19 | 0.775 | alto muy alto |
| 46 | D 5                       | 532932      | 2106452 | 28/09/2001 | 1   | 26   | W   | paztikal            | A. religiosa                        | 3390    | 6.20  | 4.99  | 6.314           | .     | .          | .     | .       | 0.128 | 1.00 | 4.50  | D3     | 28.61 | 0.800 | alto muy alto |
| 47 | O1 3                      | 533785      | 2111786 | 25/08/2001 | 1   | 60   | SE  | A. religiosa        | A. religiosa                        | 3398    | 6.40  | 5.16  | 9.401           | 1.792 | 0.209      | 1.170 | 0.29    | 0.207 | 1.28 | 3.63  | C1     | 26.34 | 0.790 | alto muy bajo |
| 48 | La venta Sur barranca     | 541056      | 2110845 | 18/11/2004 | 1   | 20   | E   | pinus               | P. teocote, P. hartwegii            | 3418    | 6.20  | 4.46  | 5.673           | 0.859 | 0.121      | 0.462 | 0.14    | 0.192 | 0.81 | 6.67  | C1     | 17.14 | 0.140 | bajo          |
| 49 | tlalquecotchcotl          | 542103      | 2114526 | 20/01/2005 | 1   | 40   | S   | A. religiosa        | P. hartwegii, A. religiosa          | 3425    | 5.70  | 4.63  | 7.976           | 0.911 | .          | 0.388 | .       | 0.222 | 1.29 | 11.14 | C1     | 20.84 | 0.495 | medio         |
| 50 | O 14                      | 533121      | 2106124 | 28/09/2001 | 1   | 55   | S   | A. religiosa        | A. religiosa                        | 3440    | 6.15  | 5.23  | 8.576           | 1.394 | 0.197      | 1.030 | 0.30    | 0.160 | 1.33 | 5.41  | D3     | 31.09 | 0.480 | medio         |
| 51 | 16                        | 534000      | 2145000 | 22/02/2002 | 2   | 32   | W   | pinus               | P. hartwegii                        | 3450    | 5.20  | 3.93  | 19.898          | 1.552 | 0.129      | 1.117 | 1.70    | 0.879 |      |       | L      | 13.13 | 0.360 | bajo          |
| 52 | 10                        | 527132      | 2139575 | 07/02/2002 | 2   | 47   | NE  | A. religiosa        | P. hartwegii, A. religiosa          | 3469    | 6.10  | 5.07  | 18.355          | 1.600 | 0.726      | 1.232 | 1.97    | 1.029 | 2.99 | 45.90 | L      | 10.35 | 0.210 | bajo          |
| 53 | 39 Tlalcomajada           | 527699      | 2150026 | 24/05/2002 | 2   | 15   | NE  | A. religiosa        | A. religiosa                        | 3500    | 5.62  | 4.63  | 10.065          | 1.417 | 0.886      | 1.213 | 1.34    | 0.594 | 1.66 | 18.60 | L      | 9.83  | 0.355 | bajo          |
| 54 | este de tetorre           | 542529      | 2121800 | 18/02/2005 | 1   | 61   | N   | A. religiosa        | P. hartwegii, Pinus sp, A. eligiosa | 3512    | 4.90  | 3.82  | 6.863           | 0.656 | .          | 0.643 | .       | 0.121 | 1.15 | 6.19  | C1     | 32.90 | 0.422 | medio         |
| 55 | 33                        | 527289      | 2140367 | 26/04/2002 | 2   | 20   | NW  | A. religiosa        | P. hartwegii, A. religiosa          | 3520    | 5.75  | 5.22  | 13.882          | 1.504 | 0.594      | 1.887 | 2.36    | 0.500 | 2.35 | 28.91 | L      | 16.10 | 0.208 | bajo          |
| 56 | F 5                       | 534939      | 2110074 | 29/06/2001 | 1   | 20   | NW  | pinus               | P. hartwegii                        | 3522    | 5.35  | 3.90  | 4.199           | 1.727 | 0.084      | 1.030 | 0.11    | 0.187 | 0.55 | 3.58  | C1     | 13.02 | 0.280 | bajo          |
| 57 | Puerto Mancilla Suroeste  | 526376      | 2146877 | 08/05/2004 | 2   | 28   | SE  | A. religiosa        | pinus sp, A. religiosa              | 3537    | 5.50  | 4.90  | 9.976           | 1.028 | 0.217      | 0.274 | 0.40    | 0.098 | 1.44 | 10.64 | L      | 59.04 | 0.410 | medio         |
| 58 | barranca tlalquecotchcotl | 541221      | 2114562 | 21/01/2005 | 1   | 35   | S   | Pinus- A. religiosa | P. hartwegii, A. religiosa          | 3540    | 5.64  | 4.37  | 10.050          | 0.897 | .          | 0.411 | .       | 0.217 | 0.79 | 8.20  | B2     | 26.86 | 0.385 | bajo          |
| 59 | F 11                      | 534716      | 2111918 | 29/09/2001 | 1   | 45   | E   | Pinus- A. religiosa | P. hartwegii, A. religiosa          | 3550    | 5.40  | 4.20  | 12.114          | 1.349 | 0.141      | 0.980 | 0.21    | 0.214 | 0.81 | 2.69  | C1     | 32.83 | 0.790 | alto          |
| 60 | 22                        | 527712      | 2141573 | 16/03/2002 | 2   | 37.5 | NW  | A. religiosa        | A. religiosa                        | 3550    | 6.05  | 5.31  | 3.011           | 1.340 | 1.090      | 1.335 | 2.46    | 0.752 | 1.87 | 26.36 | L      | 2.32  | 0.400 | medio         |
| 61 | F1                        | 534534      | 2111637 | 18/06/2004 | 1   | 20   | W   | pinus               | P. hartwegii                        | 3553    | 5.71  | 4.83  | 1.787           | 0.926 | 0.152      | 0.635 | 0.12    | 0.064 | 1.72 | 7.37  | C1     | 16.19 | 0.248 | bajo          |
| 62 | F 2                       | 534603      | 2111225 | 25/08/2001 | 1   | 35   | SE  | Pinus- A. religiosa | P. hartwegii, A. religiosa          | 3585    | 6.03  | 4.65  | 11.459          | 1.509 | 0.136      | 1.010 | 0.27    | 0.214 | 1.34 | 3.46  | C1     | 31.06 | 0.725 | alto          |
| 63 | 9                         | 527490      | 2140444 | 07/02/2002 | 2   | 25   | SE  | A. religiosa        | A. religiosa                        | 3593    | 5.50  | 4.49  | 16.566          | 1.571 | 0.886      | 1.232 | 1.10    | 0.520 | 2.16 | 15.87 | L      | 18.48 | 0.213 | bajo          |
| 64 | Coronilla                 | 533552      | 2117782 | 24/08/2001 | 1   | 35   | S   | pinus               | P. hartwegii                        | 3600    | 5.40  | 4.03  | 22.776          | 1.278 | 0.092      | 1.230 | 0.13    | 0.300 | 0.88 | 4.25  | I1     | 44.04 | 0.238 | bajo          |
| 65 | 37                        | 528145      | 2144802 | 27/04/2002 | 2   | 32.5 | SW  | Pinus- A. religiosa | P. hartwegii, A. religiosa          | 3600    | 5.74  | 4.70  | 13.715          | 1.571 | 0.682      | 0.991 | 4.38    | 0.679 | 1.68 | 17.68 | L      | 11.72 | 0.300 | bajo          |

anp: area natural protegida, pen: pendiente, exp:exposición, ci: cationes intercambiables

Cuadro 33(continuación).-Cuadro de datos (anexo) 1.

| ID | LOCALIDAD  | COORDENADAS |         | FECHA      | ANP | PEN  | EXP | GENERO | ESPECIE      | ALTITUD | pH   | MOS  | % tejido foliar |       |       | % mantillo |      | N     |      |       | suelos | C/N   | VIGOR  | NIVEL |
|----|--|-------------|---------|------------|-----|------|-----|--------|--------------|---------|------|------|-----------------|-------|-------|------------|------|-------|------|-------|--------|-------|--------|-------|
|    |  | NAD 27      | X       |            |     |      |     |        |              |         |      |      | Y               | %     | N     | Mg         | N    | Mg    | %    | Mg    |        |       |        |       |
| 66 | Pela gallina   | 538910      | 2110546 | 18/11/2004 | 1   | 8    | NE  | pinus  | P. teocote   | 3615    | 6.12 | 4.63 | 5.133           | 1.040 | 0.140 | 0.457      | 0.11 | 0.174 | 0.79 | 6.41  | C1     | 17.11 | 0.300  | bajo  |
| 67 | 20   | 529751      | 2143575 | 16/03/2002 | 2   | 12   | N   | pinus  | P. hartwegii | 3650    | 5.75 | 4.13 | 16.125          | 1.533 | 0.396 | 1.136      | 1.18 | 0.687 | 0.64 | 4.86  | L      | 13.61 | 0.330  | bajo  |
| 68 | Sur barranca<br>tlalquecotchcotl<br>Chalchoapa<br>noreste de | 541942      | 2115007 | 20/01/2005 | 1   | 60   | N   | pinus  | P. hartwegii | 3667    | 5.80 | 4.51 | 8.455           | 1.026 | .     | 0.378      | .    | 0.153 | 1.47 | 13.92 | C1     | 32.05 | 0.433  | medio |
| 69 | tetorre  | 542010      | 2121193 | 18/02/2005 | 1   | 21   | N   | pinus  | P. hartwegii | 3696    | 5.20 | 4.19 | 4.902           | 0.840 | .     | 0.509      | .    | 0.045 | 0.88 | 4.70  | B2     | 63.19 | 0.423  | medio |
| 70 | 15   | 531000      | 2144950 | 22/02/2002 | 2   | 60   | W   | pinus  | P. hartwegii | 3700    | 5.45 | 4.29 | 10.991          | 1.763 | 0.323 | 1.194      | 1.61 | 0.356 | 0.70 | 6.22  | L      | 17.91 | 0.288  | bajo  |
| 71 | 8  | 527132      | 2139575 | 07/02/2002 | 2   | 30   | S   | pinus  | P. hartwegii | 3708    | 5.70 | 4.49 | 12.743          | 1.532 | 0.276 | 0.539      | 0.69 | 0.319 | 0.85 | 7.28  | L      | 23.17 | 0.235  | bajo  |
| 72 | Paso d Cortés  | 536125      | 2111200 | 10/12/2001 | 1   | 20   | NE  | pinus  | P. hartwegii | 3723    | 6.00 | 4.42 | 13.143          | 1.561 | 0.092 | 1.070      | 0.21 | 0.251 | 0.90 | 2.54  | C1     | 30.37 | 0.011  | bajo  |
| 73 | 4  | 528589      | 2140806 | 18/01/2002 | 2   | 14.1 | N   | pinus  | P. hartwegii | 3800    | 6.05 | 4.19 | 16.683          | 1.340 | 0.450 | 0.013      | 1.22 | 0.503 | 0.68 | 6.05  | L      | 19.24 | 0.120  | bajo  |
| 74 | 38   | 529165      | 2145418 | 27/04/2002 | 2   | 35   | S   | pinus  | P. hartwegii | 3800    | 5.44 | 4.01 | 15.554          | 1.609 | 0.422 | 1.097      | 3.59 | 0.579 | 1.29 | 9.14  | L      | 15.58 | 0.343  | bajo  |
| 75 | La Laguna<br>xahuehahuatlalco                                | 541183      | 2121616 | 19/02/2005 | 1   | 24   | N   | pinus  | P. hartwegii | 3828    | 4.60 | 3.76 | 7.354           | 0.807 | .     | 0.721      | .    | 0.164 | 1.05 | 5.61  | B2     | 26.01 | -0.098 | bajo  |
| 76 | La Joya  | 536507      | 2116230 | 20/08/2004 | 1   | 51   | N   | pinus  | P. hartwegii | 3892    | 4.80 | 4.06 | 7.891           | 0.957 | 0.090 | 0.464      | 0.10 | 0.163 | 0.89 | 6.84  | C1     | 28.08 | 0.115  | bajo  |
| 77 | 40   | 529433      | 2141702 | 24/05/2002 | 2   | 19   |     | pinus  | P. hartwegii | 4100    | 4.40 | 3.89 | 8.881           | 1.460 | 0.760 | 1.040      | 0.91 | 0.468 | 0.20 | 3.38  | L      | 11.01 | 0.046  | bajo  |

anp: area natural protegida, pen: pendiente, exp:exposición, ci: cationes intercambiables