



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA**

USO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS EN LA CUENCA DEL RÍO GRANDE DE COMITÁN, ¿LA LIXIVIACIÓN REPRESENTA UN PROBLEMA AMBIENTAL?

T E S I S
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO
DE MAESTRO EN CIENCIAS**

P R E S E N T A:
SARA LÓPEZ RIVERA

TUTOR PRINCIPAL:
DRA. BLANCA PRADO PANO, INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM.

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:
DR. OSCAR ESCOLERO FUENTES, INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM.
DR. ROBERTO BONIFAZ ALFONZO, INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM.
DR. BRUNO MANUEL CHÁVEZ VERGARA, INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM.
DR. ARTURO AGUIRRE CHAVEZ, FES CUAUTILÁN, UNAM.

CDMX. AGOSTO 2017.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Geología de la UNAM por permitirme seguir adelante con mi desarrollo profesional.

Al proyecto denominado “Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar de Montebello, en el estado de Chiapas”, clave 000000000167603. Bajo la coordinación del Dr. Oscar Escolero Fuentes del Instituto de Geología, UNAM. Financiado por el Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo sobre el Agua CONAGUA-CONACYT.

A mi Asesora de Tesis Blanca Prado Pano por toda la paciencia del mundo que tuvo para el desarrollo de este trabajo, por sus observaciones y por esas ganas de nunca rendirse, esta tesis es completamente dedicada a ti.

A los miembros de mi jurado por su apoyo, paciencia y sus comentarios valiosos para el desarrollo de este trabajo.

A la Dra. Lucy Mora Palomino, Responsable del Laboratorio de Edafología Experimental, por su apoyo en el análisis de muestras de suelos y las resinas de intercambio iónico.

A la Dra. Olivia Zamora Martínez, responsable del Laboratorio de Cromatografía, LANGEM, UNAM, por su apoyo en el análisis de muestras del trabajo.

Al Sr. René Alcalá Martínez, responsable del Laboratorio de Física de Suelos, por su apoyo en el análisis de las muestras de suelos.

A la Mtra. Kumiko Shimada Miyasaka, responsable del Laboratorio de Edafología Ambiental por su apoyo en el análisis de las muestras de suelos.

Al grupo de Paleosuelos que a pesar de las adversidades que se presentaron tuve su apoyo para poder desarrollar el presente trabajo, en especial a la Dra. Solleiro y al Mtro. Jaime por dejarme trabajar en su laboratorio y su apoyo fuera de este.

Agradezco al Mtro. Arturo H. Atilano Alvarado por su apoyo y acompañamiento en este trabajo (en los análisis de laboratorio, salidas a campo y sus aventuras de vida), así como a los chicos: Mario, Carito, Montse, Mari Carmen, Dany, Luis Parra, Ary por estar ahí apoyándome en el término de dicho trabajo al acompañarme en campo y en los análisis de laboratorio.

A todas las personas que estuvieron motivándome para darle fin a este Trabajo, principalmente a **mi familia**.

INDICE:

	<i>Página</i>
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	4
3. Hipótesis.....	5
4. Marco teórico.....	6
4.1. El Suelo, su capacidad amortiguadora y filtro de contaminantes.....	6
4.1.1. Adsorción de cationes y aniones.....	7
4.2. Lixiviación en suelos.....	10
4.2.1. Propiedades físicas y químicas de los suelos que favorecen el proceso de Lixiviación	
.....	11
4.2.2. Métodos para cuantificar la lixiviación de nitrógeno.....	13
4.3. Nitrógeno en la agricultura.....	14
4.3.1. Contaminación ambiental por nitrógeno, principalmente en suelo y	
agua.....	16
4.4. Dinámica del nitrógeno en el suelo.....	19
4.4.1. Nitrógeno residual.....	21
4.5. Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	22
4.5.1. (SIG) como una herramienta para identificar zonas susceptibles a la	
contaminación.....	23
5. Área de estudio.....	24
5.1. Área de estudio.....	24
5.1.1. Localización del área y generalidades.....	24
5.1.2. Geología y geomorfología.....	26
5.1.3. Hidrología.....	27
5.1.4. Clima.....	29
5.1.5. Edafología.....	29
6. Materiales y métodos.....	33
6.1. Localización de las parcelas.....	33
6.2. Muestreo compuesto y descripción de perfiles.....	34

6.3. Instalación de los contenedores de resinas de intercambio iónico en las parcelas con suelos arcillosos.....	36
6.3.1. Preparación de los contenedores de resinas de intercambio iónico.....	36
6.3.2. Instalación en campo de los contenedores de resinas de intercambio iónico.....	37
6.3.3. Desinstalación de los contenedores de resinas de intercambio iónico.....	39
6.3.4. Análisis de muestras en el laboratorio.....	40
6.3.5. Cultivo con mayor aporte de nitrógeno residual al suelo.....	45
6.3.6. Identificación de los sitios susceptibles a la lixiviación	46
7. Resultados y Discusión.....	48
7.1. Suelos Agrícolas de la Cuenca del Río Grande de Comitán	48
7.2. Fertilizantes nitrogenados: dosis y compuestos aplicados en las parcelas agrícolas bajo cultivo de maíz y jitomate en los diferentes tipos de suelo.....	52
7.3. Análisis de las muestras compuestas: concentración de nitrógeno y Nitrógeno Residual del Suelo (NRS).....	61
7.4. Descripción de suelos.....	70
7.5. Análisis de los Contenedores de Resinas de Intercambio Iónico.....	77
7.6. Sitios Susceptibles a la lixiviación en la Cuenca.....	83
8. Conclusión.....	87
9. Recomendaciones.....	88
10. Referencias.....	89
11. Anexos.....	96
11.1. Anexo 1. Descripción edafocológica de los perfiles de suelo de los sitios Los Riegos (I y II) y La Esperanza (I y II).....	97
11.2. Anexo 2 Descripción de las hojas técnicas de las resinas catiónicas y aniónicas.....	101
11.3. Anexo 3 Descripción de las Barrenas de las Muestras Compuestas del Cultivo de Maíz.....	102
11.4. Anexo 4 Descripción de las Barrenas de las Muestras Compuestas del Cultivo de Jitomate.....	108
11.5. Anexo 5 Diagramas de las precipitaciones anuales de las estaciones meteorológicas que se ubican dentro de la Cuenca del Río Grande de Comitán.....	112
11.6. Anexo 6 Fertilizantes nitrogenados más utilizados para el cultivo de maíz y el de jitomate.....	116

Índice de tablas.

Número de tabla	Título	Página
1	<i>Nutrientes esenciales en las plantas.</i>	15
2	<i>Suelos de la Cuenca del Río Grande de Comitán y sus características de acuerdo con la WRB (2007).</i>	30
3	<i>Información de la instalación de los contenedores de resinas de intercambio iónico, en los sitios de estudio, los periodos de instalación y permanencia.</i>	37
4	<i>Propiedades seleccionadas de los principales suelos agrícolas de la Cuenca del Río de Grande, Comitán (WRB, 2007; Martínez, 2015)</i>	51
5	<i>Registro de agroquímicos utilizados en la cuenca del Río Grande de Comitán.</i>	52
6	<i>Fertilizantes nitrogenados aplicados al cultivo de maíz durante un ciclo, en cada parcela estudiada. Información proporcionada por el agricultor.</i>	54
7	<i>Fertilizantes nitrogenados aplicados al cultivo de jitomate durante un ciclo, en cada parcela estudiada. Información proporcionada por el agricultor.</i>	55
8	<i>Valores promedio de la dosis de nitrógeno empleada (kg/ha) de nitrógeno en forma de urea, nitrato y amonio, en el cultivo de maíz.</i>	56
9	<i>Valores promedio de la dosis de nitrógeno empleada (kg/ha) de nitrógeno en forma de urea, nitrato y amonio, en el cultivo de jitomate.</i>	57
10	<i>Características seleccionadas y concentración de C total y las diferentes formas de N en las muestras compuestas de suelo de las parcelas bajo los diferentes tipos de suelo, para el cultivo de maíz.</i>	62
11	<i>Características de los suelos, concentración de C y N total, y las diferentes formas de N en las muestras compuestas de suelo de las parcelas bajo los diferentes tipos de suelo, para el cultivo de jitomate.</i>	63
12	<i>Concentración promedio y desviación estándar de las diferentes formas de N en las muestras compuestas de suelo de las parcelas bajo los diferentes tipos de suelo, en el cultivo de maíz en Kg/ha.</i>	65
13	<i>Concentración promedio y desviación estándar de las diferentes formas de N en las muestras compuestas de suelo de las parcelas bajo los diferentes tipos de suelo, en el cultivo de jitomate (Kg/ha).</i>	66
14	<i>Propiedades físicas del perfil LOS RIEGOS I.</i>	70
15	<i>Propiedades químicas del perfil LOS RIEGOS I.</i>	71
16	<i>Nitrógeno residual en el suelo (amonios y nitratos) del perfil LOS RIEGOS I.</i>	71
17	<i>Propiedades físicas del perfil LOS RIEGOS II.</i>	72
18	<i>Propiedades químicas del perfil LOS RIEGOS II.</i>	73
19	<i>Nitrógeno residual en el suelo (amonios y nitratos) del perfil LOS RIEGOS II.</i>	73

Número de tabla	Título	Página
20	<i>Propiedades físicas del perfil LA ESPERANZA I.</i>	74
21	<i>Propiedades químicas del perfil LA ESPERANZA I.</i>	75
22	<i>Nitrógeno residual en el suelo (amonios y nitratos) del perfil LA ESPERANZA I.</i>	75
23	<i>Propiedades físicas del perfil LA ESPERANZA II.</i>	76
24	<i>Propiedades químicas del perfil LA ESPERANZA II.</i>	77
25	<i>Nitrógeno residual en el suelo (amonios y nitratos) del perfil LA ESPERANZA II.</i>	77
26	<i>Concentración de Nitrógeno (kg/ha) en el perfil Los Riegos 1.</i>	78
27	<i>Concentración de Nitrógeno (kg/ha) en el perfil la Esperanza 2.</i>	78
28	<i>Concentración de Nitrógeno (kg/ha) en el perfil la Esperanza 1.</i>	80
29	<i>Balance de Nitrógeno de Maíz kg/ha.</i>	81
30	<i>Balance de Nitrógeno de Jitomate kg/ha.</i>	82

Índice de figuras.

Número de figura	Título	Página
1	<i>Importancia de los suelos, Brady & Weil, 2008.</i>	6
2	<i>Carga permanente, variable y punto isoeléctrico (ZPC) (Porta, 2003).</i>	8
3	<i>Doble capa difusa (Porta, 2003).</i>	9
4	<i>Composición elemental promedio de las plantas (FAO, 2002).</i>	15
5	<i>Mapa del área de estudio, elaboración propia (Fuente INEGI, 2007).</i>	25
6	<i>Unidades Geomorfológicas de la Cuenca del Río Grande de Comitán (Mora, et.al, 2016).</i>	26
7	<i>Hidrología de la Cuenca del Río Grande de Comitán y el Sistema Lagunar de Montebello (SLM), Chiapas (modificado de INEGI; 2010, 1:1000000; FUENTE: Centro ecoturístico de Tziscão).</i>	28
8	<i>Mapa modificado de uso de suelos (INEGI, 2010 1:25000), donde se observa la superficie ocupada por suelo de conservación y la superficie agrícola y de pastizal inducido.</i>	32
9	<i>Mapa obtenido de suelos agrícolas de la Cuenca del Río Grande de Comitán.</i>	33
10	<i>Diseño de muestreo para las muestras compuestas por unidad de suelo.</i>	34
11	<i>Relación entre el coeficiente de variación y el número de submuestras tomadas para formar una muestra compuesta de suelo (Rodríguez, 2002).</i>	35
12	<i>a. Los círculos negros representan los puntos donde se tomaron las submuestras en una parcela para formar una muestra compuesta (el mínimo de submuestras a tomar es un total de 16). b. Toma de muestras compuestas en una parcela agrícola.</i>	35
13	<i>Contenedor de resinas de intercambio iónico, tomado de Díaz (2011).</i>	37
14	<i>a y b Construcción de los túneles de instalación, c. Cuadrar y elaborar el techo del túnel y d. Instalación de los contenedores.</i>	38
15	<i>a y b Cierre de los túneles con arena sílica y por último con suelo.</i>	39
16	<i>Triangulación para localizar el sitio de los contenedores de resinas de intercambio iónico después del periodo de instalación.</i>	39
17	<i>a, b y c Triangulación para localizar el sitio de los contenedores de resinas de intercambio iónico después del periodo de instalación, d. búsqueda de los hilos guía y de los contenedores</i>	40
18	<i>Separación de las capas de los contenedores de resinas de intercambio iónico.</i>	44
19	<i>Mapa de suelos agrícolas escala 1:250 000. Se muestran los principales suelos bajo la actividad agrícola</i>	49
20	<i>Puntos de muestreo de las muestras compuestas para el cultivo de maíz y jitomate en los (Mapa de suelos agrícolas escala 1:250 000)</i>	50
21	<i>Cantidad promedio y desviación estándar de Ntotal que se adiciona al suelo en los cultivos de maíz y jitomate.</i>	58

Número de figura	Título	Página
22	<i>Dosis media de nitrógeno total y nitrógeno en forma de urea, nitrato y amonio aplicados en el cultivo de maíz.</i>	59
23	<i>Dosis media de nitrógeno total y nitrógeno en forma de urea, nitrato y amonio aplicados en el cultivo de jitomate.</i>	59
24	<i>Concentración promedio y desviación estándar en nitrógeno en forma de nitrato y amonio en los diferentes tipos de suelo a la profundidad de 0-30cm y 30-60cm en el cultivo de maíz.</i>	65
25	<i>Concentración promedio y desviación estándar en nitrógeno en forma de nitrato y amonio en los diferentes tipos de suelo a la profundidad de 0-30cm y 30-60cm en el cultivo de jitomate.</i>	66
26	<i>Concentración promedio y desviación estándar del NRS (nitrógeno residual del suelo) obtenido en las muestras compuestas de los diferentes tipo de suelo, a la profundidad de 0-30 cm y 30-60 en los cultivos de maíz y jitomate y por tipo de suelo.</i>	67
27	<i>Fotografía del perfil en campo los Riegos I..</i>	70
28	<i>Fotografía del perfil en campo los Riegos II.</i>	72
29	<i>Fotografía del perfil en campo la Esperanza I</i>	74
30	<i>Fotografía del perfil en campo la Esperanza II.</i>	76
31	<i>Distribución de la concentración de N-NO₃ en los diferentes contenedores de resinas de intercambio iónico instalados en la localidad de los Riegos 1 y la Esperanza 2, bajo cultivo de jitomate y maíz, respectivamente. Cada contenedor presenta tres capas, superior (C-5), media (C-2) e inferior (C-3) que representan la acumulación de N por diferente forma de movilidad.</i>	79
32	<i>Distribución de la concentración de N-NO₃ en los diferentes contenedores de resinas de intercambio iónico instalados en la localidad la Esperanza 1, bajo cultivo de maíz. Cada contenedor presenta tres capas, superior, media e inferior que representan la acumulación de N por diferente forma de movilidad.</i>	80
33	<i>Sitios de la Cuenca del Rio Grande de Comitán susceptibles a Lixiviación. LU Luvisol, PH Feozem, CH Chernozem, LP Leptosol, VR Vertisol.</i>	83
34	<i>Sitios agrícolas susceptibles a la Lixiviación: LU Luvisol, PH Feozem, CH Chernozem, LP Leptosol, VR Vertisol.</i>	85

RESUMEN

El uso de fertilizantes en la agricultura y la descarga de agua residual a los cuerpos de agua, son las principales causas del aumento en la concentración de nitrógeno en el ambiente. Al llegar al suelo, los compuestos nitrogenados pueden seguir dos vías en su recorrido hacia cuerpos de agua, la erosión y la lixiviación, ambos procesos se favorecen o limitan por las propiedades físicas y químicas de los suelos, el volumen de agua usado en el riego, la intensidad de las precipitaciones así como la dosis de fertilizantes nitrogenados utilizadas en el cultivo. En la cuenca del río Grande de Comitán, en el estado de Chiapas, la actividad agrícola se ha intensificado notablemente en los últimos 20 años, siendo el maíz y el jitomate los principales cultivos. En el año 2003, algunos lagos del conjunto de lagos de Montebello, cuerpo receptor del río Grande de Comitán, registró cambios en la coloración de sus aguas, de color azul turquesa a tonos verde-grisáceos, una de las hipótesis que se evalúan para explicar este hecho, es la llegada de nutrientes utilizados en la agricultura, que pudieron provocar procesos de eutrofización de las aguas. El objetivo de la tesis fue evaluar el proceso de lixiviación de fertilizantes nitrogenados en los dos cultivos principales de la cuenca, jitomate bajo agricultura intensiva, y maíz bajo agricultura de temporal, en los principales suelos de uso agrícolas de la cuenca. Lo anterior, teniendo como hipótesis que la lixiviación se ve favorecida en suelos con textura más gruesa y con altas tasas de precipitación y/o volumen de agua aplicado en el riego, mientras que los suelos con texturas más finas tendrán alto potencial de aporte de nitrógeno vía superficial. Para cumplir el objetivo, se realizaron encuestas sobre las prácticas agrícolas locales, notablemente la cantidad de fertilizantes nitrogenados que se aplican a cada uno de los cultivos evaluados. Se realizó una campaña de muestreo de los principales tipos de suelo de la cuenca bajo uso agrícola: Chernozem, Feozem, Vertisol, Luvisol y Leptosol, presumiendo que correspondía al fin del cultivo y por ende, la concentración de nitrógeno extraída de los suelos correspondería al nitrógeno residual. Así también, en dos sitios seleccionados, se instalaron contenedores de resinas de intercambio iónico en la base de los perfiles de suelo en parcelas bajo cultivo de jitomate y de maíz, las cuales permanecieron durante todo el ciclo de cultivo, y aportaron información referente a la masa de nitrógeno lixiviada en ese periodo de tiempo. De este modo, la información proporcionada por los agricultores junto con la información obtenida de la concentración de nitrógeno en el suelo y la masa de nitrógeno acumulada en las resinas durante el ciclo completo, permitió obtener órdenes de magnitud de la masa de nitrógeno perdida por lixiviación y la masa de nitrógeno que se puede perder por erosión. Los resultados obtenidos dejan ver que el aporte de nitrógeno al sistema es mayor en el cultivo de jitomate que en el cultivo de maíz, lo anterior debido a dos razones, las dosis más altas utilizadas en este cultivo y al sistema de riego. Sin embargo en los suelos bajo el cultivo de maíz se reporta la mayor concentración de nitrógeno residual del suelo (NRS), pero la lixiviación es más importante y más evidente en el cultivo de jitomate. De acuerdo a la posición en el relieve, el ingreso de agua por la precipitación de la región, la textura de los suelos así como su ubicación en zonas de acumulación de agua y dispersión de ésta los suelos de tipo Leptosol, Feozem y Luvisol son los más susceptibles a la lixiviación. Sin embargo los suelos de tipo Leptosol debido a la posición en el relieve el nitrógeno que es acumulado en ellos tienen mayor posibilidad de perderse en el sistema por erosión.

ABSTRACT

The use of fertilizers in agriculture and the discharge of waste water to bodies of water are the main causes of the increase in the concentration of nitrogen in the environment. Upon reaching the soil, nitrogen compounds can follow two paths in their path to water bodies, erosion and leaching, both processes are favored or limited by the physical and chemical properties of soils, the volume of water used in irrigation, the intensity of the precipitations as well as the dose of nitrogen fertilizers used in the crop. In the Grand River Basin of Comitán, in the state of Chiapas, agricultural activity has intensified markedly in the last 20 years, with maize and tomato being the main crops. In 2003, some lakes in the set of lakes of Montebello, receiving body of the Grand River of Comitán, registered changes in the coloration of its waters, turquoise blue to shades of greyish green, one of the hypotheses that are evaluated to explain this fact is the arrival of nutrients used in agriculture, which could provoke processes of eutrophication of the waters. The objective of the thesis was to evaluate the leaching process of nitrogen fertilizers in the two main crops of the basin, tomato under intensive agriculture, and corn under temporary agriculture, in the main soils of agricultural use of the basin. The above, assuming that leaching is favored in soils with thicker texture and with high rates of precipitation and / or volume of water applied in the irrigation, while the soils with finer textures will have high potential of nitrogen supply surface pathway. To meet the objective, surveys were conducted on local agricultural practices, notably the amount of nitrogen fertilizers applied to each crop evaluated. A campaign was carried out to sample the main soil types of the basin under agricultural use: Chernozem, Feozem, Vertisol, Luvisol and Leptosol, assuming that it corresponded to the end of the crop and, therefore, the nitrogen concentration extracted from the soils would correspond to the residual nitrogen. Also, in two selected sites, ion exchange resins containers were installed at the base of the soil profiles in plots under tomato and maize cultivation, which remained throughout the growing cycle, and provided information regarding the mass of nitrogen leached in that period of time. Thus, the information provided by the farmers together with the information obtained from the nitrogen concentration in the soil and the nitrogen mass accumulated in the resins during the complete cycle, allowed to obtain orders of magnitude of the mass of nitrogen lost by leaching and the mass of nitrogen that can be lost by erosion. The results show that the nitrogen contribution to the system is higher in the tomato crop than in the maize crop, due to two reasons, the highest doses used in this crop and the irrigation system. However, in soils under maize cultivation, the highest concentration of residual soil nitrogen (NRS) is reported, but leaching is more important and more evident in the tomato crop. According to the position in the relief, the entrance of water by the precipitation of the region, the texture of the soils as well as its location in zones of accumulation of water and dispersion of this one the soils of type Leptosol, Feozem and Luvisol are the more susceptible to leaching. However Leptosol soils due to the position in the relief the nitrogen that is accumulated in them are more likely to be lost in the system by erosion.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de agroquímicos es uno de los principales problemas ambientales en todos los países, tanto los desarrollados como los que se encuentran en vía de desarrollo. El Banco Mundial, reporta un incremento sostenido año con año en el consumo de fertilizantes. En el 2011 se reporta un consumo de 133.5 kilogramos por hectárea de tierra cultivada, mientras que para el 2004 era de tan sólo 110.4 (<http://datos.bancomundial.org>). El uso de agroquímicos en exceso representa una fuente de riesgo ambiental.

La agricultura se considera una de las actividades que genera más daños al ambiente al impactar de forma directa a los ecosistemas naturales, ya que sus efectos son perceptibles en los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, en los suelos y en la atmósfera (Gardi, 2001; Kleinman et. al., 2011; Van Puijenbroek et. al., 2014; Schröder et. al., 2004). La afectación a los cuerpos de agua quizá es uno de los daños más reconocidos a nivel mundial, ya que al ingresar los nutrientes (nitrógeno y fósforo) provenientes de la fertilización en estos cuerpos de agua superficiales se genera un fenómeno conocido como eutrofización (Kleinman et. al., 2011; Ongley, 1997), el cual afecta a la biota *in situ* al degradarse la calidad del agua. Por otro lado, las aguas subterráneas son afectadas cuando el contenido de nitratos supera los límites permisibles y se convierten en un riesgo para la salud al extraerse el líquido para el consumo humano (Lockhart, et. al, 2013 & Schröder, et. al, 2004; Brady & Weil, 2008).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) reconoce dos vías por las cuales los nutrientes que provienen de la fertilización, en especial el nitrógeno y fósforo, ingresan a los cuerpos de agua. Ambos procesos involucran al sistema suelo, el primero hace referencia a la erosión y el segundo a la lixiviación que se da en este compartimento. Este último proceso se ve favorecido o limitado por las propiedades tanto físicas como químicas de los suelos. También incluye las características y la concentración en la que se encuentra el contaminante que determinará su fácil movilidad o retención en las partículas del suelo (FAO, 2002; Siebe et. al., 2006, Brady, 2008). La baja retención del nitrógeno y fósforo en el suelo junto con el arrastre del agua es un problema de gran interés (Kleinman et. al., 2011; Van Der Zee et. al., 1986), pues el ingreso de estos elementos al ambiente pone en riesgo la salud humana (Schröder et. al., 2004).

Algunos países desarrollados como Suecia, Dinamarca, España y Canadá (Kleinman et. al., 2011; Van Der Zee et. al., 1986) han logrado identificar zonas susceptibles a la lixiviación de nitrógeno a escalas regionales, utilizando sistemas de información geográfica (SIG) así como el análisis de suelo que involucra la medición de la concentración de estos elementos después de la cosecha, con la finalidad de mejorar las prácticas agrícolas, el uso de fertilizantes y a su vez disminuir sus ingresos a los cuerpos de agua.

En México se cultiva una superficie aproximada de 21.6 millones de hectáreas, de las cuales el 60% usa fertilizantes con la finalidad de incrementar la producción del campo. En 2012, según datos de Asociación Nacional de Comercializadores de Fertilizantes (Anacofer), FIRA y la Sagarpa, la producción de fertilizante en México representó poco más de 1.5 millones de toneladas, mientras

que la importación sumó 2.7 millones (www.anacofer.com.mx). Este incremento en el uso de los agroquímicos, principalmente los **fertilizantes**, se debe al aumento en la demanda de alimentos como consecuencia también al aumento de la población. Algunos estudios realizados en México abordan el tema de la lixiviación del nitrógeno y sus especies químicas. El uso de los agroquímicos y el riego de los cultivos con aguas residuales son las principales fuentes de aportación del nitrógeno. (García, 2002, Soto, 2004 y Díaz, 2011).

En el 2003 la Red Nacional Medición de Calidad del Agua (RENAMECA-CONAGUA) registró cambios en la coloración en los lagos que pertenece al sistema Lagunar de Montebello (Comunjá, Paso del Soldado y Vuelta de agua), no obstante no sólo fue el cambio de coloración lo que se reportó sino también olores fétidos relacionados a compuestos de azufre, la presencia de natas blancas-amarillentas y mortandad en peces. Se dice que en los últimos 20 años la actividad agrícola se ha intensificado en la región, principalmente por cultivos de maíz y jitomate, aunque algunas zonas cultivan hortalizas, a menor escala. Se les ha atribuido el cambio de las propiedades fisicoquímicas de los lagos al cambio en el uso de suelo y el desagüe del agua residual del Municipio de Comitán al río Grande que se comunica con los lagos. No obstante aún no se ha identificado la fuente de contaminación que sea responsable por estas transformaciones en el ecosistema (CONAGUA 2009).

Debido a este fenómeno surge la preocupación por parte de las autoridades para identificar las posibles fuentes contaminantes que han llevado a este cambio en la calidad del agua, con la finalidad de proponer medidas de mitigación ante este problema. Una hipótesis plantea que el uso indiscriminado de fertilizantes y dada la intensa actividad agrícola, podría ser en parte responsable de la eutrofización de los lagos (Alvarado, 2015). Por esta razón nuestro trabajo busca evaluar el proceso de lixiviación de nitrógeno en zonas agrícolas, además, busca identificar las zonas susceptibles a la lixiviación de nitrógeno a partir del análisis de las características de suelos bajo actividad agrícola en la Cuenca del Río Comitán.

Como se mencionó las propiedades de los suelos influyen fuertemente en el proceso de lixiviación, el interés de estudiar la lixiviación en suelos con altos contenidos de arcilla surge por varias razones: en el sitio de estudio (Cuenca del Río Grande de Comitán) predominan este tipo de suelos, la precipitación del sitio es alta; por otro lado, el poco asesoramiento a los campesinos en el uso de los agroquímicos provoca que haya un uso desmedido de ellos. Aunque las propiedades de los suelos disminuyen la susceptibilidad a la lixiviación, lo antes mencionado puede llevar a que este proceso se vuelva significativo en el área.

Existen diversos métodos para poder evaluar y cuantificar el nitrógeno lixiviado, el uso de los contenedores de resinas de intercambio iónico es una herramienta útil para evaluar el nitrógeno que se lixivía.

El objetivo de esta investigación consistió en evaluar la lixiviación de nitrógeno en la zona agrícola de la Cuenca del Río Grande de Comitán del estado Chiapas. Dentro de los objetivos particulares se buscó a) cuantificar el nitrógeno residual a dos profundidades del suelo bajo actividad agrícola de dos diferentes cultivos (jitomate y maíz), b) cuantificar la lixiviación de nitratos y amonio en suelos arcillosos en un cultivo de maíz y jitomate en época de lluvias c) identificar el cultivo (jitomate o maíz) donde ocurre mayor aporte de nitrógeno por el exceso de fertilización y donde puede ocurrir

mayor lixiviación e d) identificar en la Cuenca del Río Grande de Comitán los sitios más susceptibles a la lixiviación de nitratos y amonio.

En el caso específico del área de estudio se evaluaron los dos cultivos con mayor impacto en la zona, se hicieron entrevistas para identificar los fertilizantes más utilizados y el uso de estos, así mismo se recolectaron muestras compuestas de los diferentes suelos bajo la actividad agrícola, principalmente bajo el cultivo de maíz y jitomate, para evaluar la movilidad y lixiviación de nitrógeno en forma de nitratos y amonio. Finalmente, se instalaron contenedores de resinas de intercambio iónico para evaluar si hay lixiviación bajo suelos con altos contenidos de arcillas, dicha evaluación se centró en estos suelos ya que de acuerdo con el estudio de [Martínez \(2015\)](#) esta es la textura que predomina en la mayoría de los suelos de la región.

2. OBJETIVOS

Objetivo general.

Evaluar la lixiviación de nitrógeno en la zona agrícola de la Cuenca del Río Grande de Comitán/Lagos de Montebello.

Objetivos particulares:

- i. Cuantificar el nitrógeno residual (amonio, nitrato) a dos profundidades del perfil de suelo, en parcelas agrícolas bajo diferentes cultivos (jitomate y maíz),
- ii. Cuantificar la lixiviación de nitrógeno residual (nitratos y amonios) en suelos arcillosos bajo cultivo de maíz y jitomate en época de lluvias.
- iii. Identificar el cultivo (jitomate o maíz) donde ocurre mayor aporte de nitrógeno por el exceso de fertilización y donde puede ocurrir mayor lixiviación.
- iv. Identificar en la Cuenca del Río Grande de Comitán/Lagos de Montebello los sitios más susceptibles a la lixiviación de nitratos y amonio.

3. HIPÓTESIS

- a. Las texturas finas de los suelos de la región no impiden la movilidad del nitrógeno residual en los suelos debido a la combinación de altas tasas de precipitaciones de la región y el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados.
- b. Debido al uso de fertilizantes en exceso en el cultivo de jitomate, los suelos bajo este cultivo tendrán mayor cantidad de nitrógeno residual (amonio y nitratos).
- c. Los sitios más susceptibles a la lixiviación de compuestos nitrogenados serán aquellos que se desarrollen en zonas con altas precipitaciones, con suelos de texturas gruesas, en zonas de acumulación de agua (zonas del relieve cóncavas) y sobre desarrollo kárstico.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 El Suelo, su capacidad amortiguadora y filtro de contaminantes.

El suelo puede definirse como un “cuerpo natural tridimensional” (Porta, 2003), en el que hay entradas, transformaciones y salidas de energía. Resulta importante para la vida en la Tierra y forma parte de los ecosistemas debido a la interacción que tiene con agentes abióticos y bióticos. Dentro de los ecosistemas desempeña diferentes funciones como la de ser hábitat para organismos, es el medio en el que crecen las plantas, es un sistema de reciclaje de nutrientes y residuos orgánicos, **es transformador-filtro y amortiguador de contaminantes** (figura 1), además es regulador del ciclo hidrológico y es usado por los humanos como depósito de desechos y área de construcción (Brady & Weil, 2008; Siebe, 2006).



Figura 1. Importancia de los suelos, (Brady & Weil, 2008).

De todas las funciones que tienen los suelos el papel de transformador-filtro y amortiguador de contaminantes es uno de los más importantes, ya que regula y evita los efectos negativos de contaminación hacia otros compartimientos ambientales. La capacidad amortiguadora (CA) se define como la capacidad que tiene un suelo de adsorber sustancias contaminantes (partículas coloidales o moléculas en solución) en las superficies activas de las partículas finas (arcillas y humus) que lo componen. Siebe et al., 2006 describe a la capacidad amortiguadora como la filtración química y físico-química de un suelo, la cual involucra procesos de adsorción-desorción y de floculación-dispersión, ambos procesos están en función de la precipitación y neutralización.

Keesstra, et. al. (2012) enfatizan la importancia del papel filtro que tiene el suelo en los ecosistemas al mejorar y proteger la calidad del agua subterránea y superficial ante los contaminantes y que “esa eficiencia está en función del comportamiento de los contaminantes en el suelo y los procesos de transporte hidrológicos”. Es decir, además de la naturaleza química de los contaminantes existen otros factores importantes a considerar como es la concentración a la que se encuentran ya que

influye en su transporte, su adsorción y degradación. Así mismo se debe considerar las propiedades físicas y químicas de los suelos (textura, la estructura, la porosidad, la superficie específica, flujos preferenciales, capacidad de intercambio catiónico [CIC], la capacidad de intercambio aniónico [CIA], el pH, la concentración de los iones en solución, el tipo y contenido de arcillas minerales y de materia orgánica) las cuales determinan la capacidad de amortiguar, filtrar, inmovilizar y degradar a los contaminantes (Keesstra, et. al., 2012; Russell, 1992; Siebe, et.al., 2006; Porta, 2003; Brady & Weil, 2008). Por un lado, las propiedades físicas favorecen o limitan la movilidad del agua que arrastrará a los contaminantes del suelo a las aguas subterráneas, y por el otro las propiedades químicas determinarán la adsorción de los contaminantes a sus diversas partículas.

Al ser el suelo un receptor de contaminantes se debe considerar que las funciones que tiene como depurador natural están limitadas en el tiempo (Porta, 2003), puede decirse que el suelo tiene un límite de adsorción en sus partículas finas (arcillas minerales y materia orgánica), y al rebasar este límite es más fácil que el agua arrastre a los contaminantes del suelo a los cuerpos de agua. Los cinco factores formadores (clima, relieve, material parental, organismos y tiempo) dan como resultado suelos diferentes para cada región del mundo, en consecuencia, el papel transformador-filtro y amortiguador también lo es, en otras palabras algunos suelos tendrán la capacidad de amortiguar mayor número de contaminantes que otros (Siebe, et. al., 2006).

4.1.1 Adsorción de cationes y aniones.

La solución del suelo está compuesta por cantidades pequeñas y/o significantes de sustancias solubles o pseudosolubles que pueden ser orgánicas e inorgánicas, dentro de las cuales están los nutrimentos de las plantas (Brady & Weil, 2008; Porta, 2003). La atmósfera del suelo y su fase sólida son los principales aportadores de estas sustancias a la solución. “La composición y la dinámica de la solución del suelo depende de las interacciones con la fase sólida de éste así como la biogeoquímica general de los ecosistemas” (Binkley & Fisher, 2012). La humedad del suelo influye en la precipitación y solubilidad de los iones que forman parte de la solución del suelo, así, cuando éste se seca por completo ocurre una precipitación de los compuestos y en cuanto se humedece se incorporan nuevamente a la solución de suelo (Porta, 2003). Finalmente algunos de los iones que forman parte de la solución del suelo son la fuente inmediata de nutrimentos utilizados por las plantas.

A parte de las aportaciones de la fase sólida a la solución del suelo (como lo es la liberación de iones que se vuelven nutrimentos para las plantas), ésta también se constituye por contaminantes que provienen de las actividades humanas. La dinámica que ocurre entre los iones de la solución del suelo con la fase sólida del mismo se da a través de cargas. Por tanto los contaminantes tienden a comportarse como cationes o aniones interactuando así con la fase sólida de suelo y la solución del éste. En este compartimento ambiental las partículas con carga como las arcillas minerales (carga negativa y algunas variables) y el humus (carga variable, con frecuencia positiva) son las encargadas de la dinámica de adsorción o atracción de los iones (de la solución de suelo) con cargas opuestas, a los que se conocen como iones intercambiables (Porta, 2003; Brady & Weil, 2008).

El proceso de adsorción de cationes y aniones se refiere a una asociación que existe entre ellos y las superficies sólidas (partículas finas del suelo minerales de arcilla y humus) del suelo. Esta asociación se da por las fuerzas físicas y los enlaces químicos tales como a) Fuerzas de London-van der Waals,

b) Puentes de hidrógeno, c) Enlaces iónicos y d) Enlaces covalentes. La interacción con algunos contaminantes como los pesticidas puede darse de manera temporal (fuerzas físicas), esta interacción se da principalmente con la materia orgánica (Porta, 2003). Mientras que los fertilizantes, al ser principalmente nutrientes, se asociación a través de enlaces químicos con las partículas de suelo, siempre y cuando las cargas entre ellos sean opuestas (Brady & Weil, 2008).

Las cargas que tienen las partículas finas del suelo llegan a ser permanentes o variables (figura 2), ambas tienen un origen por las estructuras de los minerales, pero también están muy relacionadas con las condiciones del medio (pH). Las cargas permanentes son independientes al pH, están influenciadas por la estructura del mineral. En cambio, las roturas de los bordes de las estructuras de los minerales (son cargas localizadas en los bordes de las partículas) y de los grupos funcionales junto con el pH (en medios básicos los OH^- se disocian y la partícula se carga negativamente, mientras que en medios ácidos los grupos H^+ se unen a la partícula haciéndose positiva, protonación) ocasionan que las partículas tengan una carga variable (Porta, 2003; Siebe, 2006; Brady & Weil, 2008).

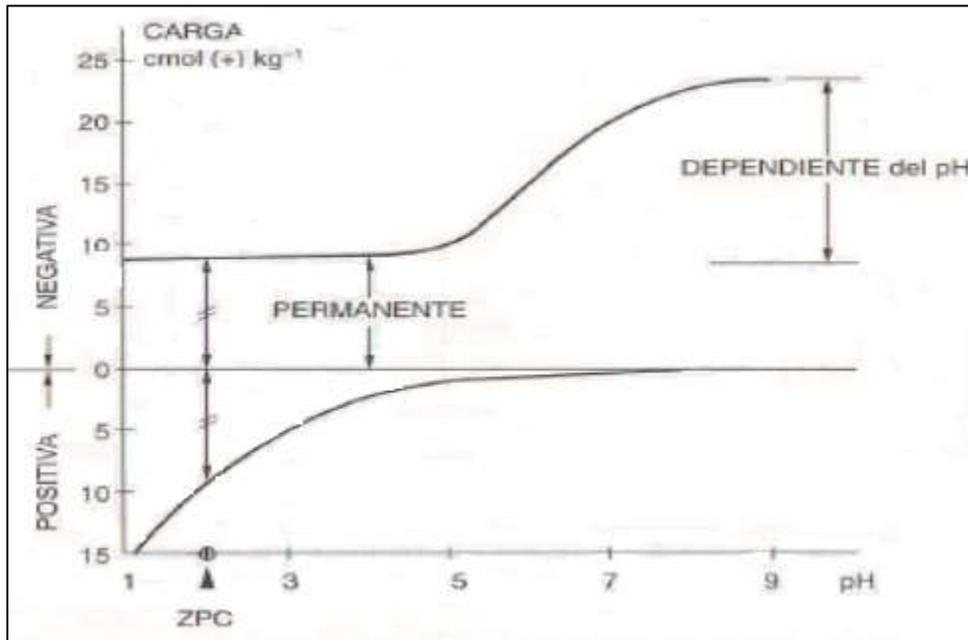


Figura 2 Carga permanente, variable y punto isoeléctrico (ZPC) (Porta, 2003).

Sin embargo, la partícula puede quedarse sin carga, al igualarse las cargas negativas y positivas del coloide a un pH y a esto se le conoce como punto de carga cero (ZPC) o punto isoeléctrico, en otras palabras la carga de la partícula es cero. Algunos ejemplos del ZPC ocurren en medios ácidos, ya que llegan a existir tanto cargas negativas como positivas. Mientras que a pH básicos hay cargas permanentes (originadas de la sustitución isomórfica) y algunas cargas variables (debidas principalmente a la materia orgánica) (Porta, 2003; Siebe, 2006; Brady & Weil, 2008).

El modelo de la doble capa difusa ha ayudado a explicar la distribución de los iones que se da entre las arcillas minerales del suelo y el agua. Como lo muestra la figura 3 existe una superficie cargada negativamente (arcillas minerales) que funciona como un campo eléctrico y atrae a los cationes (capa interna) haciendo que se difundan desde esa superficie que los atrae hacia la solución, generando un gradiente de concentración, en cuanto a los aniones (capa externa) que son de carga contraria se encuentran más lejanos de la superficie de atracción (Porta, 2003; Siebe, 2006; Brady & Weil, 2008). Así que el modelo de la doble capa difusa explica “una superficie cargada (carga negativa) y los iones de signo contrario (carga positiva) constituyen una doble capa eléctrica difusa” (Porta, 2003).

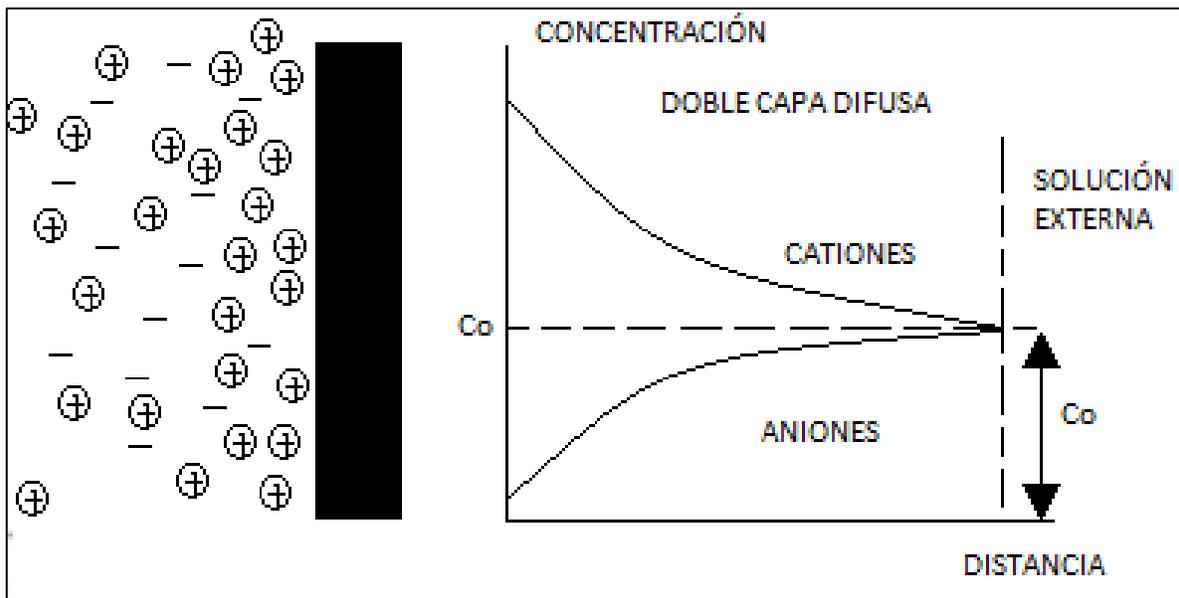


Figura 3 Doble capa difusa (Porta, 2003).

Existen dos parámetros que se usan para medir la capacidad que tienen los suelos de adsorber-capturar cationes y aniones, la capacidad de intercambio catiónica (CIC) y aniónica (CIA). En el suelo ocurre con mayor frecuencia la CIC, aunque algunos iones con carga negativa llegan a ser adsorbidos (CIA). El intercambio iónico, ya sea la CIC o la CIA, media los nutrientes disponibles para las plantas y participa en el proceso de floculación-dispersión en el suelo. Esta propiedad es la que hace al suelo un depurador natural de los contaminantes (Brady & Weil, 2008; Porta, 2003; Aguilera, 1989). La forma de expresar la CIC es el “número de moles de iones cargas positivos adsorbidos que pueden ser intercambiados por unidad de masa seca” (Porta, 2003; Brady & Weil, 2008).

Hay una relación fuerte entre el pH y la CIC. A pH altos la CIC incrementa y viceversa, a pH bajos la CIC disminuirá. También influye en la carga de las partículas que tienen carga variable, por lo que cuando el pH aumenta las arcillas de tipo 1:1 (como la caolinita), el alofano, el humus y los óxidos de Fe (hierro) y Al (aluminio) incrementan su carga negativa, que en consecuencia incrementa su habilidad para adsorber cationes, es decir incrementan su CIC (Brady & Weil, 2008).

Cabe mencionar que entre los nutrientes adsorbidos por el suelo y los que son liberados a la solución del suelo hay un equilibrio. Este equilibrio permanece cuando las raíces absorben los nutrientes a través de sus raíces y en consecuencia el complejo de adsorción libera nuevos nutrientes a la solución del suelo. Durante este fenómeno descrito ocurre un proceso de difusión, donde los nutrientes liberados del complejo de adsorción se moverán hacia las raíces donde hay una menor concentración de estos, es decir se mueven de la solución más concentrada a una de menor concentración (Porta, 2003; FAO, 2002; Brady & Weil, 2008).

4.2. Lixiviación en suelos.

“La percolación de agua a favor de la gravedad arrastra a través del suelo pequeñas cantidades de elementos que están suspendidos o solubilizados” (Starr & Taggart, 2008) y define el proceso de lixiviación. A través de este proceso varios contaminantes, como es el caso de los fertilizantes que contienen nitrógeno, fósforo, y en ocasiones el potasio, ingresan a los cuerpos del agua al ser eliminados del suelo, ya que la absorción de la planta y la capacidad de adsorción del suelo son limitados (Ongley, 1997).

En todos los suelos ocurre el proceso de lixiviación, este proceso se favorece y limita por las propiedades tanto físicas como químicas de los primeros. Las características y la concentración en la que se encuentra el contaminante son también fundamentales, ya que determinan su fácil movilidad o retención en las partículas del suelo (FAO, 2002; Siebe et. al., 2006, Brady & Weil, 2008). Finalmente, la época en la que se administran los fertilizantes y la etapa del cultivo influyen también en el proceso de lixiviación. La adsorción de nutrientes se restringe a las primeras etapas, en la mayoría de los cultivos, donde se requieren para un mejor crecimiento y desarrollo del cultivo, disminuyendo así la lixiviación de nutrientes a los cuerpos de agua.

El agua es la responsable de transportar a los solutos del suelo hacia el agua subterránea, el volumen de agua que ingresa a los suelos proviene de la precipitación, pero también del riego. Cuando la precipitación es muy alta el suelo no puede retener suficiente agua contra la gravedad (la capacidad de campo se excede) y en consecuencia hay pérdidas por percolación (Brady & Weil, 2008; Assimakopoulos, et. al., 2003) viéndose favorecida la lixiviación. La evapotranspiración afecta el volumen de agua que ingresa al suelo, principalmente la que se filtra (Brady & Weil, 2008; Porta, 2003). Así la lixiviación en regiones húmedas es mayor que en las áridas, por el volumen de agua que ingresa.

Normalmente, los elementos que se adicionan al suelo se fraccionan acorde a su solubilidad en el agua, así quedarán atrapados en los poros de éste los elementos insolubles. Como resultado de este fraccionamiento habrá partículas más gruesas, las cuales permanecerán en las capas superficiales, pero también habrá partículas finas que son las que serán transportadas. Durante el transporte ocurrirá una dilución y un fraccionamiento de las partículas solubles, ambos procesos dependerán de las propiedades químicas de los materiales (Brady & Weil, 2008).

4.2.1 Propiedades físicas y químicas de los suelos que favorecen el proceso de lixiviación.

Propiedades físicas.

Las propiedades físicas determinan la permeabilidad del suelo y también la velocidad de percolación de agua. Estas propiedades pueden o no facilitar el movimiento del agua que arrastra a los iones (nutrimentos). Propiedades como la textura (el tamaño de la partícula) influyen en la porosidad, es decir en el tamaño de poros y en la cantidad de poros, por ejemplo, los suelos arenosos tienen poros grandes, en los cuales la tasa de infiltración es alta, pero el espacio poroso total llega a ser bajo (Millar, et. al., 1981). Por lo contrario, los suelos de textura fina tienen mayor espacio poroso y retienen más agua, pero la infiltración es más lenta ya que el tamaño de poros es muy pequeño. Además del tamaño y la cantidad de poros en un suelo, la geometría y las interconexiones de estos son también dos características que llegan a controlar el comportamiento y los patrones del movimiento del agua (Porta, 2003; Keesstra, et. al., 2012, Aguilera, 1989; Assimakopoulos, et. al., 2003).

La uniformidad de los flujos en los suelos no siempre ocurre, factores como el relieve y el manejo agrícola llegan a influir. Dentro del suelo ocurren flujos preferenciales, los cuales son importantes ya que afectan el transporte rápido de los solutos hacia estratos más profundos (Keesstra, et. al., 2012; Assimakopoulos, et. al., 2003). Cuando se habla de flujos preferenciales se considera que el movimiento del agua no ocurre en toda la matriz del suelo, y por consiguiente la velocidad del agua es mayor ahí que en la matriz del suelo (Keesstra, et. al., 2012; Brady & Weil, 2008).

Existen varios factores que facilitan el flujo preferencial, el primero es la actividad biológica como los canales de raíces y las madrigueras de las lombrices, ambos generan una variación en la homogeneidad de la infiltración de la parte superior con respecto a la inferior del suelo (Keesstra, et. al., 2012; Brady & Weil, 2008). El segundo son las texturas gruesas como las arenosas ya que es común la presencia de macroporos y finalmente la tercera que corresponde a la presencia de paleocanales, en los cuales la conductividad hidráulica es alta y la retención de agua baja (Keesstra, et. al., 2012). Quizá una cuarta sea la pedregosidad que llega a favorecer los flujos rápidos de agua.

Otra propiedad física que afecta la lixiviación es la estructura del suelo, la cual puede generar flujos preferenciales, así estructuras de tipo granular, migajón y de bloques subangulares favorecen el paso del agua. Aunque en ocasiones los Vertisoles, suelos con altos contenidos de arcillas y estructura prismática, llegan a presentar lixiviación, pues en época de secas se forman grietas las cuales llegan a funcionar como flujos preferenciales (macroporos que se originan por la expansión y contracción de los agregados) cuando inician las lluvias. Cuando la precipitación continua las grietas se cierran al expandirse las arcillas minerales y en consecuencia el agua comienza a fluir a través de los poros de la matriz del suelo (Porta, 2003; Armstrong, et. al., 2000; Turtola, 1995; Boolsink, 1995; Dekker & Bouma, 1984; Matthews, et. al., 2000; White, 1983, 1985; Assimakopoulos, et. al., 2003).

Otra propiedad física importante es la superficie específica, que determina el área de superficie por unidad de masa (m^2/g), es decir entre mayor sea dará una mayor superficie de contacto para que

los iones puedan adsorberse a las partículas (arcillas) evitando el movimiento de los iones hacia los cuerpos de agua. Esta propiedad es mayor para las arcillas que para las partículas de arena (Siebe, 2006).

Algunas propiedades físicas de los suelos son alteradas por las actividades antropogénicas como la agricultura y la ganadería. Ambas actividades modifican la porosidad y la estructura natural del suelo. El uso de tractores para la preparación de la tierra tiene dos efectos importantes, por un lado, se genera una capa de arado que es una capa compactada y de poco espesor, donde el agua tiene problemas para infiltrarse en la parte inferior del suelo. Por otro lado, los agricultores crean artificialmente una capa superficial de aproximadamente 30 cm la cual tiene una estructura de tipo granular y con una buena porosidad para que el agua se filtre y las raíces de los cultivos puedan desarrollarse. De forma similar, pero en menor grado el ganado compacta también al suelo, es común presenciar en los lomeríos estructuras a las que se les llama “*pie de vaca*” que se refiere a las pisadas del ganado (Vázquez, 2013).

Propiedades químicas.

Las propiedades químicas que intervienen en el proceso de lixiviación están más asociadas al proceso de adsorción por parte de los minerales arcillosos, la materia orgánica, los óxidos de hierro y aluminio. Los contaminantes y nutrimentos que son los de interés de este trabajo, se adsorben a las superficies de esos componentes del suelo. Los nutrimentos se encuentran en el complejo de adsorción, es decir que están ligados a los componentes del suelo. Este proceso de retención de nutrimentos por parte del suelo (CIC y CIA) está dado por las cargas de cada uno de ellos, siendo positivas y negativas para los nutrimentos, mientras que para los componentes del suelo existen dos opciones: que sean de carga permanente (negativa) como los minerales de arcilla o de carga variable (puede ser positiva o negativa) como la materia orgánica (Brady & Weil, 2008; FAO, 2002). La adsorción (ver apartado 4.1.1 *Adsorción de cationes y aniones*) puede inmovilizar a los nutrimentos y a los contaminantes, además influye en la fertilidad de suelos y la calidad del ambiente (Brady & Weil, 2008).

En suelos con carga neta negativa se adsorben mayormente cationes, los aniones como los nitratos, que tienen carga negativa, se movilizan y filtran fácilmente hacia los cuerpos de agua. Otros aniones como Cl^- y SO_4^{2-} se atraen por coloides del suelo que tienen carga positiva en superficies, como algunos compuestos de materia orgánica (Brady & Weil, 2008).

Los iones llegan a estar rodeados por moléculas de agua (ión hidratado), así que el radio iónico aumenta, y por tanto las reacciones de superficie se afectan por esta hidratación ya que el grado de unión es menor al estar el centro del ión hidratado más alejado de la superficie (Porta, 2003).

La movilidad de los iones también se encuentra influenciada por el pH. En pH ácidos hay una mayor movilidad de Al^{3+} , H^+ , Fe y Mn (Brady & Weil, 2008). Además de la influencia que tiene sobre la CIC, cuando los valores de pH son altos la CIC incrementa y viceversa a valores bajos de pH la CIC disminuirá.

Por último, la actividad biológica también genera sitios de sorción como es el caso de las paredes de las madrigueras de las lombrices (Keesstra, et. al., 2012). La absorción de nutrimentos por parte de las plantas ayuda a evitar la lixiviación de los nutrimentos. Para que ocurra esa absorción por parte

de las raíces de las plantas los nutrimentos deben estar en forma disuelta, y para ello deben encontrarse en la solución del suelo, esto implica que deben ser liberados del complejo de adsorción. La fuerza de atracción por el complejo de adsorción difiere con los nutrimentos (cationes y aniones) (Porta, 2003; FAO, 2002).

4.2.2 Métodos para cuantificar la lixiviación de nitrógeno.

Algunos métodos para la cuantificación de nitrógeno lixiviado son contenedores de resinas de intercambio iónico, lisímetros o cápsulas de succión y extracción de iones solubles de muestras de suelos (muestreo de suelos). Cada método ya mencionado presenta ventajas y desventajas, aunque el factor más importante a considerar para usar cualquier método es el objetivo del estudio. Los tres métodos son capaces de cuantificar el nitrógeno lixiviado, sin embargo, las limitaciones de cada uno hacen que la información obtenida sea ligeramente diferente. Por ejemplo, en términos de la cuantificación de nitrógeno en periodos prolongados solamente puede utilizarse los contenedores de resinas de intercambio iónico debido a las propiedades de las resinas iónicas a continuación se describen las ventajas y desventajas de cada método:

Contenedores de resinas de intercambio iónico:

Las resinas de intercambio iónico resultan ser sustancias sintéticas con una alta capacidad, como lo dice su nombre, de intercambio iónico por unidad de masa. Los iones que pueden retener son tanto cationes o aniones. Los contenedores se entierran al interior del suelo y se dejan por un periodo de tiempo determinado, el agua de lluvia o de riego percola y arrastra los iones provenientes del suelo, la atmosfera o los fertilizantes hacia los contenedores, donde son adsorbidos por las resinas. Al termino del tiempo establecido se sacan los contenedores y se extraen los iones para ser cuantificados (Bischoff, 2007; Díaz, 2011).

VENTAJAS: cuantificar iones por periodos prolongados, es un método barato y fácil de instalar, detecta el transporte de iones que no solo proviene de la zona de raíces y es aplicable a los diferentes suelos existentes (Bischoff, 2007; Díaz, 2011).

DESVENTAJAS: no se puede identificar los periodos de mayor aporte de iones, no permite integrar cuantitativamente los flujos preferenciales, puede genera efecto embudo una sobrestimación de la lixiviación, es decir el contenedor capta flujos de áreas mayores a las de la superficie, los flujos laterales o del manto freático hacia la superficie pueden arrastrar iones hacia los contenedores y por último, es difícil la homogenización entre la resina y la arena sílica (Bischoff, 2007; Díaz, 2011).

Lisímetros o cápsulas de succión:

Son tubos cilíndricos de diversas medidas que tienen una cápsula de material poroso en uno de los extremos, en el otro extremo sale una manguera que genera vacío para extraer la solución del suelo y llenar el tubo, este extremo es el que se entierran en el suelo a diferentes profundidades, al llenarse el tubo se cambia por otro (Bischoff, 2007; Díaz, 2011).

VENTAJAS: se puede medir el contenido de iones en distintas profundidades, es aplicable a todos los suelos y también son fáciles de instalar (Bischoff, 2007; Díaz, 2011).

DESVENTAJAS: es un método caro, es difícil medir en un ciclo vegetativo la cantidad de iones que se lixivian ya que tendrían que cambiarse constantemente lo que implica un incremento en los costos del estudio por la cantidad de muestras que se obtendrían, si el suelo tiene arcillas expansivas pueden generarse flujos preferenciales cerca del lisímetro, el agua al pasar por la cápsula puede tener cambios (Bischoff, 2007; Díaz, 2011).

Extracción de iones solubles de muestras de suelos (muestreo de suelos):

Consiste en muestrear al suelo y llevar dichas muestras al laboratorio donde se harán extracciones de los iones con el extractante adecuado (Bischoff, 2007; Díaz, 2011).

VENTAJAS: no es un método caro, permite evaluar el contenido de iones de dos periodos de tiempo distintos, permite evaluar la disminución o aumento de los iones conforme a la profundidad (Scheffer y Orteseifen, 1997; Bischoff, 2007; Díaz, 2011).

DESVENTAJAS: tienen poca precisión, solo permite identificar la presencia de iones en la solución del suelo que pueden estar sujetos a lixiviarse, las propiedades del suelo interfieren en la comparación de fechas de muestreo, tiene mucha variación en el caso de nitrato por la mineralización, desnitrificación que ocurren.

4.3 Nitrógeno en la agricultura.

A través de sus raíces las plantas son capaces de absorber elementos minerales que son necesarios para su crecimiento y funciones biológicas. La nutrición de las plantas se encuentra regida por la ley del mínimo y por los criterios de esencialidad (Degiovani, Martínez & Motta; 2010), esta ley dice que el nutriente que limita la producción será aquel que se encuentre menos disponible, aunque los demás se encuentren en cantidades suficientes. La tabla 1 enlista los 17 elementos esenciales para las plantas (figura 4). Los nutrimentos esenciales se dividen en dos grupos de nutrimentos, los macronutrimentos requeridos en grandes cantidades (N, K, P, Ca, Mg y S) y los micronutrimentos que se requieren en concentraciones bajas (Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, B, Cl) (FitzPatrick, 1996; Tisdale & Nelson; 1987).

Tabla 1. Nutrimientos esenciales en las plantas.

Elemento	Ion o compuesto en que es absorbido
H	H ₂ O
C	CO ₂
O	O ₂ , H ₂ O
N	NH₄⁺, NO₃⁻, urea NH₂CONH₂
K	K ⁺
Ca	Ca ²⁺
Mg	Mg ²⁺
P	HPO ₄ ²⁻ , H ₂ PO ₄ ⁻ , pirofosfatos y metafosfatos
S	SO ₄ ⁼
Cl	Cl ⁴⁻
B	BO ₃ ⁼ , B ₄ O ₇ ⁼ , BO ₃ ³⁻ , H ₂ BO ₃ ⁻
Fe	Fe ⁴⁺ , Fe ³⁺
Mn	Mn ²⁺
Zn	Zn ²⁺
Cu	Cu ⁺ , Cu ²⁺
Mo	MoO ₄ ⁼
Ni	Ni ²⁺

(Modificado de Degiovani, Martínez & Motta; 2010; FitzPatrick, 1996; Tisdale & Nelson; 1987).

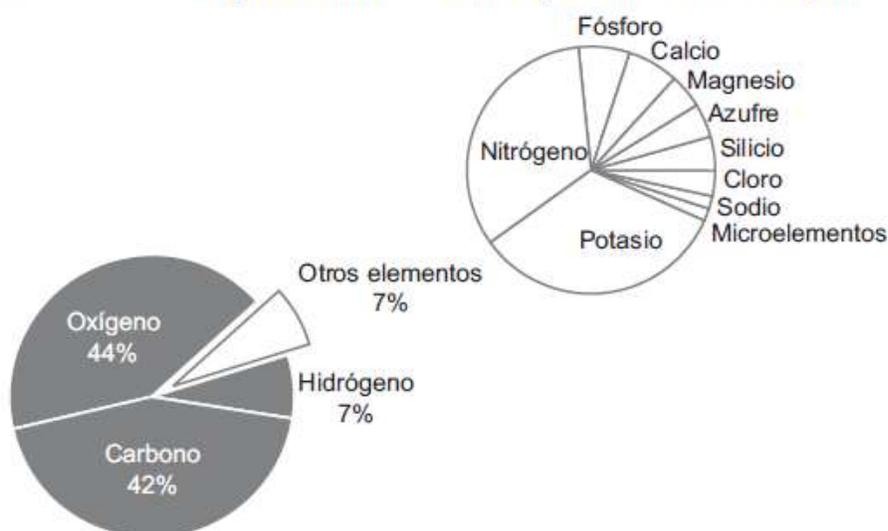


Figura 4 Composición elemental promedio de las plantas (FAO, 2002).

El suministro de nutrientes por parte del aire y el suelo no es el suficiente para mantener a los cultivos que alimentan a las poblaciones del mundo actualmente. De acuerdo con la FAO el crecimiento poblacional y el aumento de los ingresos dan como consecuencia un aumento en la demanda de los alimentos, lo que implica aumentar la frecuencia a la que se cosechan los cultivos de una superficie determinada y por tanto mejorar los rendimientos (FAO, 2002 www.fao.org). Esto ha sido motivo para desarrollar y usar a los agroquímicos y principalmente los fertilizantes en la

agricultura. El uso de los fertilizantes mantiene la economía de la producción agrícola (De Paz, et. al., 2009).

El desarrollo de los fertilizantes ha mejorado la fertilidad del suelo al proporcionar nutrimentos a los cultivos. Esto ha sido posible al fusionar el conocimiento de la química agrícola y la edafología ya que ambas ramas de la ciencia llevaron a un mejor entendimiento de esta problemática ayudando así a la fertilidad del suelo (Finck, 1988). Se reconocen tres grandes grupos de fertilizantes: los nitrogenados, los fosforados y los fertilizantes a base de K, Mg, Ca, Na, S y microelementos. De acuerdo con la FAO (2002) el uso de los fertilizantes y los programas de fertilización deben basarse en las necesidades de los cultivos, lo que implica entender la importancia de cada elemento esencial en el desarrollo de la planta, para así poder suministrar correctamente la cantidad y el elemento realmente requerido.

Las demostraciones de Liebig (1840) y John B. Lawes (1842) comenzaron con el desarrollo industrial de los fertilizantes a base de fosfato (Finck, 1988), por otro lado el descubrimiento de transformar el nitrógeno atmosférico en amoníaco, conocido como Proceso de Haber-Bosch (1913), sigue siendo la manera más económica de fijar nitrógeno atmosférico, es uno de los más grandes descubrimientos y avances en la fabricación de fertilizantes nitrogenados (Kotz, 2005). Los fertilizantes nitrogenados y fosforados son los de mayor importancia, ya que las entradas de nitrógeno y fósforo son indispensables para la agricultura sostenible (Schröder, et. al, 2004), además ambos elementos tienen una mayor influencia en el desarrollo de la planta:

- Nitrógeno**
- Motor del crecimiento de la planta. Es transformado en el interior de plantas a las formas $-N=$, $-NH-$ O, $-NH_2$.
 - Es transformado en compuestos complejos hasta ser transformado en proteínas.
 - Importante constituyente de las proteínas, es parte integral de la clorofila.
 - Un adecuado suministro de este elemento está asociado con un vigoroso crecimiento vegetativo y un color verde intenso.
 - Deficiencia de nitrógeno provoca que las plantas se vuelvan raquílicas y amarillas (clorosis), esto se observa en las hojas inferiores.

4.3.1 Contaminación y degradación ambiental por nitrógeno, principalmente en suelo y agua.

El uso excesivo de agroquímicos (fertilizantes, plaguicidas, herbicidas, etc.) constituye uno de los principales problemas ambientales en todos los países, tanto los desarrollados como en vía de desarrollo (www.fao.org). En las últimas décadas las entradas al ambiente de nitrógeno se han incrementado. Schröder, et. al. (2004) junto con otros autores (IPCC, 1996; Galloway, 1998; Tunney et al, 1997; Pierzynski et al, 2000. ; Cartón y Jarvis, 2001; Freibauer, 2003) enfatizan los daños que estas entradas provocan al ambiente tales como la **contaminación de cuerpos de aguas** por la **lixiviación**, escurrimiento superficial de nitratos, fosfatos y otros agroquímicos (Schröder, 2004), la producción de gases de efecto invernadero como el metano y óxido nitroso, pérdida de la biodiversidad del suelo y la **degradación de suelos** como la salinización y acidez (www.fao.org).

Otro proceso que favorece la contaminación del ambiente por fertilizantes es la erosión, la cual ocurre por arrastre de las partículas más finas del suelo (que son las que contienen mayormente nutrimentos) hacia los cuerpos de agua (Millar, et. al., 1981), en los sitios con pendientes pronunciadas es muy común. De manera general es posible decir que la principal causa que lleva a un fertilizante a ser un contaminante es el uso desmedido de los mismos.

Suelo.

El uso excesivo de fertilizantes provoca dos tipos de problemas al suelo, por un lado, los hacen susceptibles a la salinidad y por otro los acidifica, ambos problemas degradan la calidad de éstos. (Brady, 2008; Porta, 2003; Siebe, et.al., 2006; Millar, et. al., 1981; Assimakopoulos, et. al., 2003). Cuando existe el problema de salinización lo que ocurre es un aumento en la concentración de las sales en la solución del suelo y por consiguiente aumenta el pH y los valores de la conductividad eléctrica. Por lo contrario al usar fertilizantes ricos en amonio (sulfato de amonio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$, urea $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$), lo que acontece es una transformación del amonio a nitrato, la cual libera iones hidrógeno (H^+) a la solución del suelo. Si el suelo no tiene agentes buffer para que se unan a los iones de hidrógeno, éstos quedarán libres en la solución del suelo y por lo tanto el pH disminuirá (Porta, 2003; Assimakopoulos, et. al., 2003). Aunado a lo anterior los suelos ácidos son más susceptibles a que el pH siga disminuyendo, ya que no hay ningún agente buffer que se una a los iones hidrógeno que son liberados (Porta, 2003; Brady & Weil, 2008; Millar, et. al., 1981). Otro proceso importante que ocurre en el suelo es la co-lixiviación de los nitratos con otros elementos como el calcio (Ca^{2+}), el magnesio (Mg^{2+}) y el potasio (K^+) (Brady & Weil, 2008; Assimakopoulos, et. al., 2003), este problema puede intensificarse cuando el pH disminuye (Assimakopoulos, et. al., 2003) y en consecuencia el suelo se hace más ácido.

Al acidificarse y salinizarse el suelo se afecta el proceso de adsorción de los aniones (fosfatos, sulfatos y cloruros), la neoformación de minerales de arcilla y por último la meteorización química (Porta, 2003). Mientras que las propiedades físicas afectadas por el exceso de sales en el suelo son la porosidad y en consecuencia la aireación, el régimen de humedad y la temperatura.

La salinidad y acidez no solo llega afectar algunas propiedades del suelo, sino que afecta también a la vegetación que se desarrolla sobre ellos. La salinidad afecta el crecimiento de las plantas, provoca una toxicidad iónica y desequilibrios nutricionales. Afecta también la absorción de nutrimentos como K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y NO_3^- por parte las plantas (Villa, et. al., 2006; Brady & Weil, 2008). En cuanto a la acidez existe una toxicidad para las plantas al incrementarse la concentración de los iones Al^{3+} y Mn^{2+} . Ambos procesos afectan la movilidad de los elementos que llegan a ser nutrimentos para las plantas en el suelo, en otras palabras, se afecta la disponibilidad de los nutrimentos. Finalmente, algunas propiedades biológicas que se afectan son las relaciones bacterias-hongos, la fijación de nitrógeno, las poblaciones bacterianas, la humificación y la nodulación en leguminosas (Porta, 2003).

Agua.

En 1991 la FAO/CEPE citó dos problemáticas respecto a las consecuencias de la fertilización en exceso sobre los cuerpos de agua, la primera se refiere a la eutrofización de las aguas superficiales

y la segunda la contaminación del agua subterránea por los nitratos (Ongley, 1997; Millar, et. al., 1981). Los principales nutrimentos que se convierten en contaminantes en los cuerpos de agua son el nitrógeno (nitrato) y el fósforo (fosfato) y en ocasiones llega a serlo el potasio (K). Como se habló en el apartado 4.2 (Lixiviación en suelos) la forma en que entran estos nutrimentos, principalmente sus especies químicas, a los cuerpos de agua es a través de la lixiviación y en ocasiones por escurrimiento superficial en zonas con pendientes pronunciadas (Delin, et. al., 2014; Drury, et. al., 2014; Lenka, et. al., 2013; Van der Laan, et. al., 2010; De Paz, et. al., 2009; Brady & Weil, 2008; Yang, et. al., 2013, 2007; Ten Berge, et. al., 2007; Babiker, et. al., 2004; Schröder, 2004; Akselsson, et. al., 2004; Assimakopoulos, et. al., 2003; Porta, 2003)

Agua subterránea.

La calidad del agua subterránea se ve afectada cuando aumentan los niveles de nitratos (más de 2 mg/l), este aumento tiene efectos en la salud cuando esta agua se utiliza para el consumo humano. Los elevados contenidos de nitratos causan bajo oxígeno en la sangre de los infantes, una enfermedad conocida como metahemoglobinemia o síndrome del bebé azul, incrementa los riesgos de padecer cáncer en el estómago y en ocasiones provocan en las mujeres abortos espontáneos (Drury, et. al., 2014; Lockhart et. al. 2013; Schröder, et. al. 2004; Brady & Weil, 2008; Yang, et. al., 2013; De Paz, et. al., 2009; Babiker, et. al., 2004; Assimakopoulos, et. al., 2003, De Paz, et. al., 2004). Por tal razón, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció un límite estándar para la concentración de nitratos en el agua potable que se extrae de las aguas subterráneas (11.3mg/l de $\text{NO}_3^- \text{N}$ o 50 mg de nitrato/l) (Lockhart, et. al, 2013; Schröder, et. al, 2004; Brady & Weil, 2008; Yang, et. al., 2013; Babiker, et. al., 2004; Jordan, et. al., 1994).

Agua superficial.

La acumulación y la falta de circulación de los nutrimentos en los cuerpos de agua degradan la calidad de los ecosistemas acuáticos (en los estanques, en los lagos y en los ríos abajo) reduciendo su productividad (Brady, 2008; Bin-Le Lin, et. al., 2001). Esta baja en la calidad de las aguas se debe a un fenómeno conocido como eutrofización, el cual se manifiesta por la alta producción en la biomasa de fitoplancton y algas asociadas, que lleva a una modificación del hábitat y sustitución de especies. Algunas consecuencias más graves son la producción de toxinas por algunas algas (Ongley, 1997; Brady & Weil, 2008; Porta, 2003; Bin-Le Lin, et. al., 2001; Akselsson, et. al., 2004; Drury, et. al., 2014; Yang, et. al., 2007, 2013; De Paz, et. al., 2002, 2009; Jordan, et. al., 1994).

Aún no se conoce con exactitud la contribución de la agricultura a la eutrofización de los cuerpos de agua y con respecto a las aguas subterráneas es difícil aún más la cuantificación. El National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM), 1990, calcula que en Europa un sesenta por ciento del nitrógeno al Mar del Norte (Ongley, 1997). Países como Canadá, China, Dinamarca, Noruega y Finlandia reportan problemas en las aguas por la proliferación de algas, consecuencia de los altos niveles de nitrógeno y fósforo que son aportados por la actividad agrícola (Brady & Weil, 2008; Ongley, 1997; Porta, 2003; Bin-Le Lin, et. al., 2001; Delin, et. al., 2014; Van der Laan, et. al., 2010; Drury, et. al., 2014; Yang, et. al., 2007; Akselsson, et. al., 2004; Yang, et. al., 2013; Ten Berge, et. al., 2007; Cavero, et. al., 1999; Lenka, et. al., 2013; De Paz, et. al., 2009; Babiker, et. al., 2004;

Skop, et. al., 1998; Assimakopoulos, et. al., 2003; Jordan, et. al., 1994; De Paz, et. al., 2002; Schröder, 2004).

4.4 Dinámica del nitrógeno en el suelo.

El nitrógeno es un elemento esencial para las plantas (Brady & Weil, 2008; Porta, 2003; Bin-Le Lin, et. al., 2001; Drury, et. al., 2014). Puede perderse de los ecosistemas a través de diferentes vías o puede acumularse en el suelo (Lenka, et. al., 2013). El ciclo del nitrógeno comprende diferentes compartimentos ambientales como la atmósfera, la biosfera, la litósfera, la hidrosfera y la pedosfera. Los procesos más importantes que ocurren en este ciclo son: la fijación de N_2 atmosférico; la fijación en compuestos orgánicos de seres vivos, la inmovilización, la mineralización, la nitrificación, la fijación de $N-NH_4^+$ en las arcillas minerales; la lixiviación, el lavado y escorrentía superficial; la desnitrificación y la volatilización (Porta, 2003). En un sistema agrícola este ciclo presenta ligeras variaciones, en las entradas de nitrógeno se incluye el ingreso por parte de la fertilización y abonos de estiércol, mientras que en las salidas se hace énfasis en la asimilación por parte del cultivo (Yang, et.al., 2013).

Entender con precisión y claridad como ocurre el ciclo de nitrógeno en los sistemas agrícolas resulta aún difícil, debido principalmente a que las prácticas de gestión de los cultivos y las condiciones atmosféricas son muy variables, además resulta complejo cuando esta información se combina con la de los suelos y el paisaje (Yang, et. al., 2013). El ciclo del nitrógeno en los ecosistemas puede ser alterado cuando hay un exceso de este elemento, lo cual provoca varios problemas ambientales (globales, regionales y locales) (Bin-Le Lin, et. al., 2001).

Los ingresos de nitrógeno al suelo se dan a través de los fertilizantes químicos, el abono de ganado, deposición atmosférica y a través de la mineralización de los residuos del cultivo y el nitrógeno orgánico del suelo (Drury, et. al., 2014). Ya en el suelo el nitrógeno puede mineralizarse e inmovilizarse, estos dos procesos son lo contrario, la mineralización implica la liberación del nitrógeno por la actividad microbiana, hay una conversión de nitrógeno orgánico a formas inorgánicas, mientras que la inmovilización ocurre cuando los iones NO_3^- y NH_4^+ se transforman en formas orgánicas (Brady & Weil, 2008). Las tasas de mineralización se incrementan cuando aumenta la deposición atmosférica, y al aumentar la deposición junto con la actividad microbiana también se acrecienta la acidez en el suelo (Akselsson, et. al., 2004). Otra forma en que se libera el NH_4^+ ocurre cuando hay una baja relación de C/N en la materia orgánica, esto provoca que quede disponible para las plantas, aunque también incrementa el riesgo de pérdidas (Assimakopoulos, et. al., 2003).

La inmovilización ocurre por la atracción de cargas, el amonio siendo un catión, se fija en las arcillas minerales y algunos compuestos de materia orgánica que tienen carga negativa en la superficie, mientras que los nitratos al ser de carga negativa se mueven hacia abajo libremente (lixiviación del suelo) (Bin-Le Lin, et. al., 2001; Brady & Weil, 2008, Porta, 2003, Assimakopoulos, et. al., 2003). En el subsuelo hay mayor contenido de arcillas minerales, por esta razón hay mayor fijación de amonio en el subsuelo. La actividad microbiana del suelo también es participe de la inmovilización del amonio y nitrato ya que los convierte en formas orgánicas (Assimakopoulos, et. al., 2003; Brady & Weil, 2008).

Cuando el suelo tiene valores altos de pH el amonio puede volatilizarse en forma de gas amoniaco, sin embargo, los coloides del suelo adsorben a este gas, al menos cuando los contenidos de estos son suficientes. En suelos arenosos, calcáreos y alcalinos ocurren las pérdidas de gas amoniaco con mayor frecuencia (Brady & Weil, 2008). De acuerdo con Assimakopoulos, et. al., (2003) el agua del suelo convierte el amoniaco a iones de amonio (NH_4^+) y en consecuencia se disminuye el pH.

Otro proceso que ocurre es la nitrificación, donde los iones amonio a través de la oxidación enzimática se transforman en nitratos y nitritos, la primera transformación es la conversión de amonio a nitrato por un grupo de bacterias conocido como *Nitrosomonas*, la segunda transformación es la de nitratos a nitritos por la *Nitrobacter* (Brady & Weil, 2008; Porta, 2003). Este proceso ocurre con mayor rapidez donde hay calcio y magnesio intercambiable y se ve limitado por los altos contenidos de esméctita y alofano. El proceso contrario es la desnitrificación, donde el nitrato se reduce a gases como N_2O , NO y N_2 . Es un proceso que ocurre bajo condiciones anaerobias. En condiciones completamente anaerobias se produce N_2 , mientras que en condiciones parcialmente anaerobias se produce N_2O (Brady & Weil, 2008; Porta, 2003; Drury, et. al., 2014), en otras palabras, es la pérdida de nitrógeno del suelo a través de formas gaseosas.

Los principales procesos que ocurren en el suelo se resumen en lo siguiente:

<i>Denominación</i>	<i>Descripción</i>
<i>Fijación de N₂ atmosférico</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Incorporación por la lluvia al suelo: N-NO₃⁻, N-NH₄⁺. • Fijación simbiótica: N-NH₄⁺ en el suelo. • Actividad bacteriana: <i>Rhizobium</i> N₂+6H⁺→ 2NH₃. • Fijación no simbiótica: N-orgánico y N-NO₃⁻.
<i>Fijación en compuestos orgánicos de seres vivos</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Plantas, animales y sus residuos, estiércoles, purines y desechos urbanos.
<i>Inmovilización</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilización en el suelo en forma N-orgánico (humus). • Incorporación del N por la actividad microbiana.
<i>Mineralización</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Paso de N-orgánico a N- NH₄⁺ y N- NO₃⁻ por hidrólisis. Afecta anualmente a un 2-3% del N-inmovilizado en el suelo, y parcialmente a la materia orgánica recién incorporada.
<i>Nitrificación</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Paso de N- NH₄⁺ a N- NO₃⁻ por oxidación enzimática, que tiene lugar en dos etapas: N- NH₄⁺ → HONH₂ → HONNOH → NO₂⁻ NO₂⁻ + O₂⁻ → NO₃⁻
<i>Fijación de N-NH₄⁺ en arcillas</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de complejos de esfera interna.
<i>Adsorción de N-NH₄⁺ en arcillas</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de complejos de esfera externa, el N- NH₄⁺ se halla en forma intercambiable.
<i>Lavado y escorrentía superficial</i>	<ul style="list-style-type: none"> • El N-NO₃⁻ no absorbido por las plantas, al no poder ser adsorbido por las arcillas ni por la materia orgánica es susceptible de ser lavado siendo transferido del suelo al agua freática. • También puede haber pérdida por erosión. • El N-NO₂ se produce en suelos con drenaje insuficiente y condiciones reductoras.
<i>Desnitrificación</i>	<ul style="list-style-type: none"> • El paso de N-NO₃⁻ a N-NO_x y a N-N₂ tiene lugar en medios anaerobios.
<i>Volatilización</i>	<ul style="list-style-type: none"> • El N- NH₄⁺ puede perderse como N-NO₃⁻ en suelos calizos y en suelo arenoso.

Procesos que ocurren en el suelo (Modificado de Porta, 2003)

4.4.1 Nitrógeno residual.

El nitrógeno residual del suelo se refiere al nitrógeno inorgánico (nitrato y amonio) que permanece en el suelo después de la temporada del cultivo (Druy, et. al., 2010, 2014; Ten Berge, et. al., 2007; Yang, et. al., 2007; 2013). Ha sido usado como un indicador de la agricultura sustentable al estimar el nitrógeno que puede ser lixiviado en los campos de cultivo y al reflejar el exceso de nitrógeno que los cultivos no necesitan (Druy, et. al., 2010, 2014; Yang, et. al., 2007). Aunque algunos autores como Sieling, et. al. (2007) consideran que no siempre se puede usar como un indicador de la lixiviación,

sin embargo, es usado en varios países por ejemplo Canadá debido a que es una forma fácil y no cara de medir la lixiviación.

Cuando se excede la administración de los fertilizantes nitrogenados los niveles de nitrógeno residual en el suelo pueden aumentar, principalmente cuando el cultivo no lo aprovecha. Existen otros factores que incrementan también los niveles de nitrógeno residual en el suelo tales como las condiciones climáticas principalmente la precipitación, la mineralización de los residuos de los cultivos, la compactación de los suelos y la estructura degradada (Druy, et. al., 2010).

El nitrógeno residual es propenso a lixivarse en zonas donde la precipitación es alta (áreas húmedas), otra forma de perderse es a través de desnitrificación (Druy, et. al., 2014). Cuando ocurren estas pérdidas es común que el nitrógeno residual medido sea muy bajo.

Para calcular el nitrógeno residual se considera los ingresos del nitrógeno como la fertilización química, abonos de estiércol de animales, la fijación biológica por microorganismos y por las plantas fijadoras y el nitrógeno en los residuos del cultivo; y las salidas tales como la desnitrificación, la volatilización y la absorción por parte del cultivo (Druy, et. al., 2014; Yang, e. al., 2007).

Druy, et. al. (2014) y Yang, et. al. (2007) muestran en sus trabajos ecuaciones para el cálculo del nitrógeno residual en kg N ha^{-1} , de hecho, Druy, et. al. (2014) tienen un cálculo para zonas húmedas y otro para zonas áridas. En forma general la siguiente ecuación representa el cálculo del nitrógeno residual:

$$\text{NRS} = (\text{N}_{\text{ingresos}} - \text{N}_{\text{salidas}}) / \text{el polígono del área total cultivada}$$

NRS= Nitrógeno Residual del Suelo

El cálculo del NRS propuesto es un valor teórico, no obstante, la toma de muestras del suelo, para su posterior extracción de nitrógeno residual (amonio y nitrato) después del periodo del cultivo representa también el nitrógeno residual de campo medido en laboratorio.

4.5 Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En 1986 Burrough define a los SIG como “un instrumento que permite adquirir, almacenar, recuperar, transformar y presentar datos espaciales del mundo real para un conjunto de fines concretos”.

Un sistema de información geográfica (SIG) es un programa creado para poder manipular y crear mapas. Puede definirse también como una base de datos georeferenciada que busca modelar la realidad geográfica, por un lado, de forma gráfica y por el otro digitalizando la información (Mancebo, et. al., 2008). Se puede modelar por ejemplo el medio físico (geología, edafología, vegetación, clima, temperatura, precipitación, altitud, ríos, cuencas.) y la infraestructura urbana (carreteras, localidades urbanas y rurales, divisiones administrativas). Dentro de las ventajas que tienen los SIG está la generación de productos cartográficos de forma sencilla (Porta, 2003).

En los 70's comenzó la aplicación de los SIG en la gestión y protección de los recursos naturales (Porta, 2003). Hoy día son una necesidad creciente para seguir gestionando a los recursos naturales,

ya que permiten manipular numerosa información espacial. En la actualidad existen diferentes programas para el público como el ArcGIS, Autodesk, Geomedia, Grass, Idrisi, Manifold, Mapinfo, Microstation Geographics, Smallworld y Spring (Mancebo, et. al., 2008).

4.5.1 (SIG) como una herramienta para identificar zonas susceptibles a la contaminación.

Antes de usar los SIG como una herramienta para identificar zonas susceptibles a la contaminación por actividades antropogénicas (sitios contaminados por metales pesados, jales mineros y por la actividad agrícola), es necesario realizar una caracterización de los suelos y de sus contaminantes (principalmente conocer su concentración), por lo que se necesita un amplio muestreo y análisis de laboratorio (Porta, 2003). Es necesario además incluir información de la hidrología de la zona.

A pesar de los numerosos muestreos de suelos que se hacen en los trabajos es imposible tener toda la información, para lo cual la interpolación de ésta resulta útil para localizar las áreas con mayor y menor concentración de los contaminantes, así que se requiere recurrir a técnicas geostatísticas (por ejemplo, la técnica de Krigin, la cual mejora las interpolaciones) para poder tratar los datos obtenidos (Porta, 2003).

Para la generación de mapas con mayor detalle se requiere de combinar los mapas digitalizados, un buen muestreo y análisis de laboratorio, técnicas geostatísticas y modelos de transporte y/o lixiviación de los contaminantes en el suelo.

La ventaja de usar los SIG es que permiten hacer trabajos a escalas regionales como los de Behrendt, et. al. (1996), Rubaek, et. al. (2013), Roger, et. al. (2014), Yang, et. al. (2007), De Paz, et. al. (2004, 2006, 2009), Shaffer, et. al. (1995), Kiese, et. al. (2011), Akselsson, et. al. (2004) y Skop, et. al. (1998), los cuales buscan identificar sitios susceptibles a la lixiviación de fertilizantes (nitrógeno y fósforo) a nivel de país. Esta clase de estudios permite tomar decisiones para hacer un mejor uso por ejemplo de los fertilizantes, o en dado caso de que la contaminación sea por metales pesados. Los trabajos permiten identificar la vocación del suelo que ya está contaminado, es decir de acuerdo con el grado de contaminación que presenta se determina el uso del sitio.

5. ÁREA DE ESTUDIO

5.1 Área de estudio.

5.1.1 Localización del área y generalidades.

El área de estudio es la Cuenca del Río Grande de Comitán-Lagos de Montebello, se encuentra ubicado al sur del estado de Chiapas y a 90Km de distancia con la frontera de Guatemala (figura 5), tiene una superficie de 810km². Geográficamente se ubica en las coordenadas 90°10'7.6" y 91°39'41.2" longitud Oeste y 16°04'17.1" y 16°25'30.8" de latitud Norte. En cuanto a la altitud los sitios más altos alcanzan 2400msnm, el Parque Nacional de los Lagos de Montebello tiene una altitud de 1500msnm y las zonas más bajas es de 1300msnm. Existen en la cuenca tres municipios: Comitán de Domínguez, La Independencia y La Trinitaria, aunque una pequeña porción del municipio Las Margaritas forma parte de la cuenca (Alvarado, 2015; Alcocer, 2016).

Dentro del área de estudio se encuentra el Parque Nacional de los Lagos de Montebello (PNLM) decretado así por su categoría de protección en 1959. Actualmente es una de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) más importantes en el país, al ser una región hidrológica prioritaria de alta riqueza biológica y de importancia para la conservación de las aves y humedales. Aunque la riqueza de la región no se limita sólo a la biodiversidad que reside en la zona, sino también a la parte cultural, ya que alberga grupos étnicos de habla tojolabal y chuj, siendo así uno de los escenarios naturales más bellos de México (CONANP, 2007).

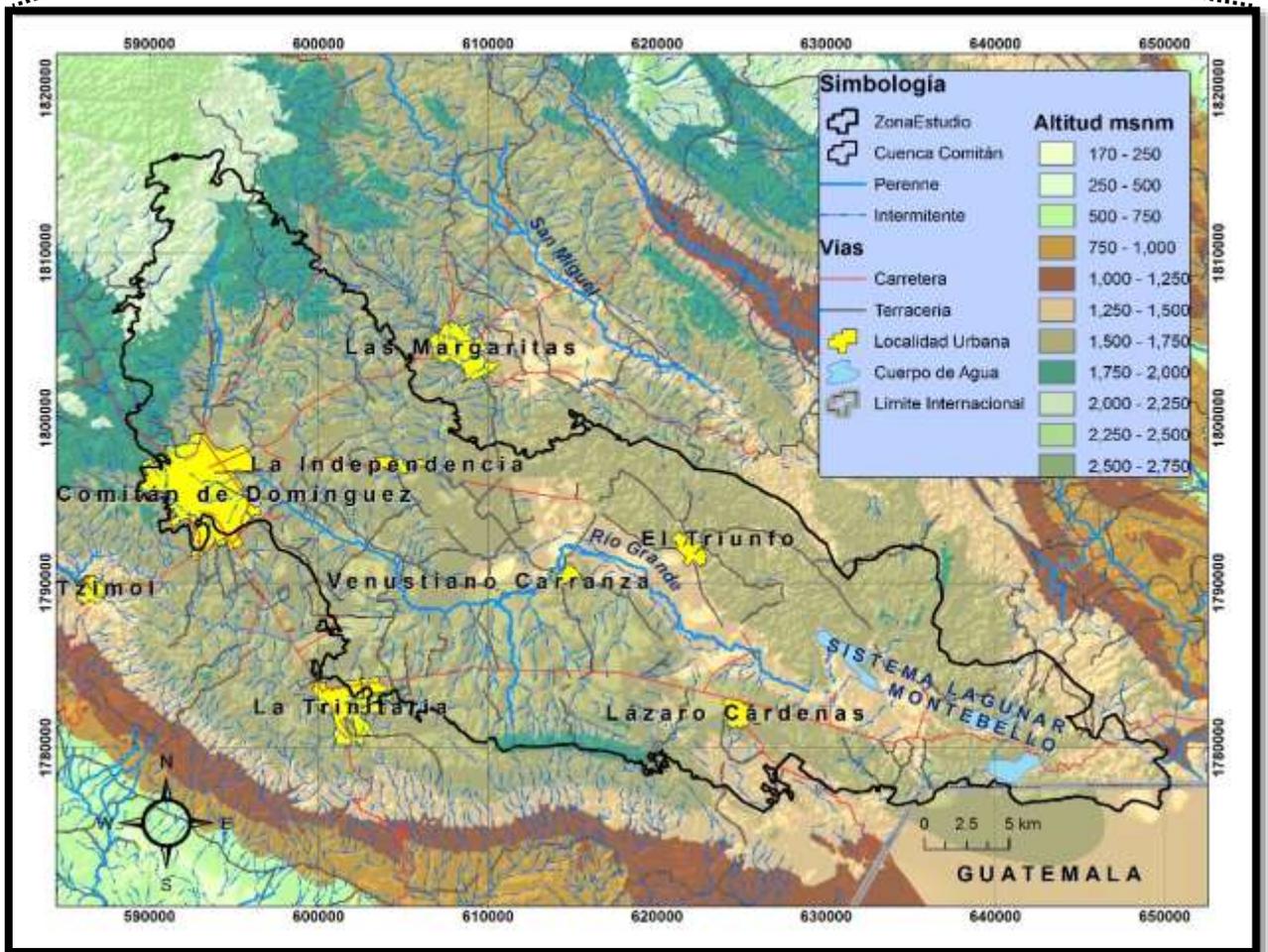
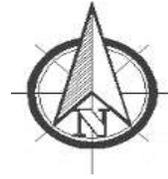


Figura 5 Mapa del área de estudio, elaboración propia (Fuente INEGI, 2007).

5.1.2 Geología y geomorfología.

La geología que predomina en la cuenca es de origen sedimentario, está constituida por rocas calizas cretácicas en un 62% de color grisáceo y rojizo, algunas asociaciones con dolomita y lutita. Cerca del Sistema Lagunar Montebello (SLM) alcanzan espesores de hasta 80m, en esta zona las calizas presentan una intensa fracturación. El 19% está representado por areniscas y limolitas del terciario superior a cuaternario y el otro 19% pertenece al aluvión del cuaternario (CONANP, 2007; SGM 1997- 1:250 000; issuu.com/inesachiapas/docs/plan_de_gestion_de_la_cuenca_del_rio). De acuerdo Sistema Geológico Mexicano (SGM) también hay registros de rocas de yeso-conglomerado polimíctico y aluvión, en el límite de la cuenca cerca de la localidad El Triunfo se registra limolita-arenisca y al sureste de la cuenca muy cerca al SLM existe una extensión de lutita-arenisca.

Las principales geoformas del sitio es el sistema kárstico (figura 6), montañas de plegamiento y planicies, no obstante el sitio también está conformado por un sistema fluvial, un sistema de pie de monte y sierras (INEGI 2000-1:250 000, Pérez et. al., 2007), hacia el SLM se encuentran lomeríos de poca altura con laderas que tienen una inclinación muy variable (CONANP, 2007). Dentro de la zona se han identificado diversas fallas, principalmente hacia el límite norte y sur de la parte central de la cuenca y una fuerte fracturación de las calizas en el PNLM (Durán, 2013).

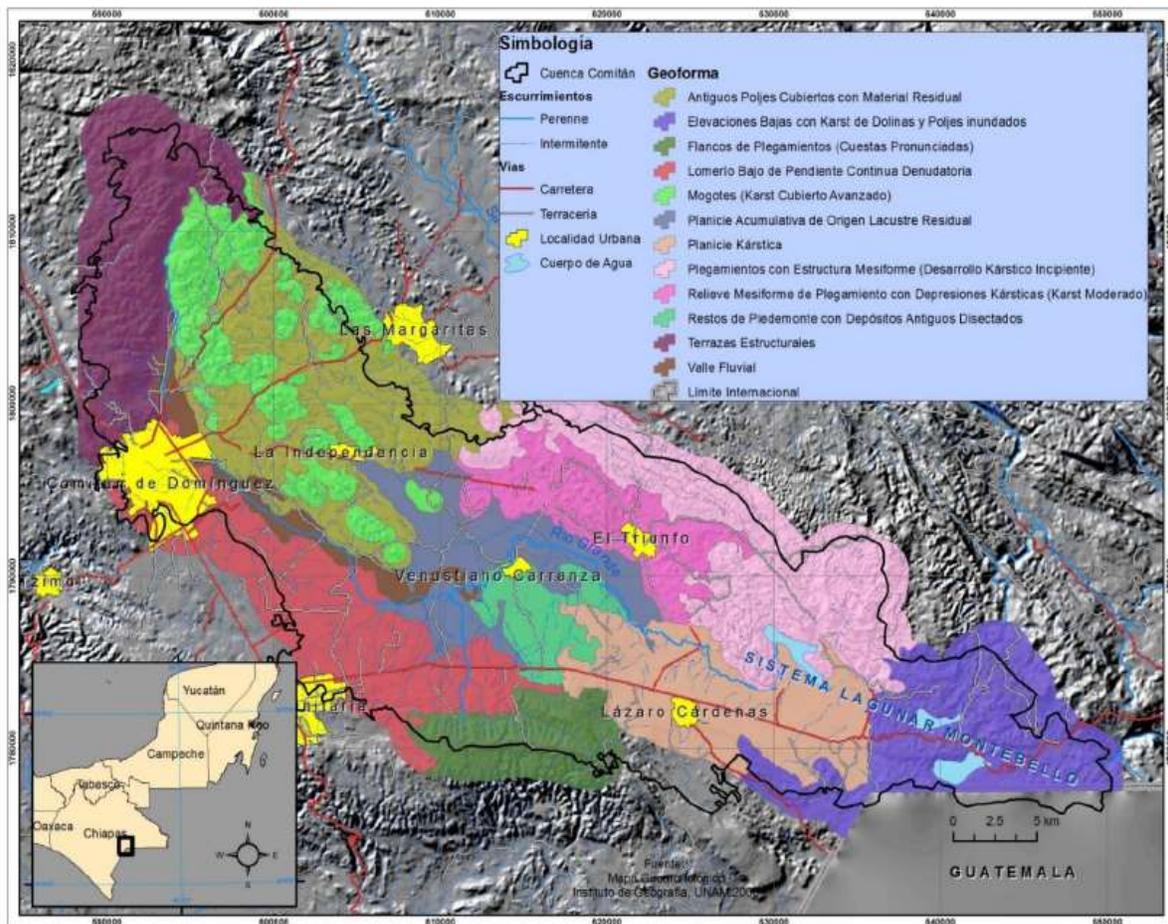


Figura 6. Unidades Geomorfológicas de la Cuenca del Río Grande de Comitán (Mora, et.al, 2016).

La Cuenca del Río Grande de Comitán está ubicado entre la región fisiográfica de la Altiplanicie Central de Chiapas y la Depresión Central de Chiapas, que son parte de la provincia fisiográfica Sierras de Chiapas y de Guatemala (CONANP, 2007; www.e-local.gob.mx/; Juárez, 2014).

5.1.3 Hidrología.

La Cuenca del Río Grande de Comitán se conforma por diversos cuerpos de agua tales como ríos perennes e intermitentes, lagos y esteros (Alcocer, 2016; Juárez, 2014). Forma parte del Río Lacantún y está dentro de la Región Hidrológica Nacional No. 30 Grijalva-Usumacinta (CONANP, 2007). El Río Grande de Comitán (figura 7) es el principal río perenne dentro de la cuenca, nace como desagüe de la Laguna Juznajib al Norte del Municipio Comitán de Domínguez (ONCA-CONAGUA, 2007) y desagua en el lago de Tepancuapan (www.e-local.gob.mx/). Recibe los aportes de corrientes intermitentes durante la época de lluvias y tiene una longitud de 80,555m, la elevación más alta es de 2195m y la mínima de 1455m. Las aguas negras que se vierten en el Río Grande de Comitán se producen del municipio Comitán de Domínguez y parte del drenaje de las localidades de Independencia y El triunfo.

Por otro lado la zona de estudio presenta muchas vertientes de agua subterránea, aunque muchas de ellas no se han investigado a detalle (issuu.com/inesachiapas/docs/plan_de_gestion_de_la_cuenca_del_rio).

El Sistema Lagunar de Montebello constituye un complejo lacustre de origen cárstico, los lagos que conforman este sistema se comunican entre ellos a través de inundaciones de sus áreas colindantes, de conductos subterráneos y algunos canales pequeños, principalmente cuando la precipitación es alta, de tal forma que las fuentes que alimentan a los lagos es el agua proveniente de la lluvia y la subterránea (CONANP, 2007). De acuerdo con Mullerried (1957) la ubicación de los lagos está tanto en el noreste y sureste de Comitán, son lagos profundos pero de poca extensión (figura 7). A continuación se describen algunos parámetros morfométricos de los lagos de Montebello, Chiapas:

Lagos	Orientación	Lmáx km	bmax km	bprom km	A ha	SL km	V km ³	Zmax m	Zprom m	Zr %	DL	DV	IBP
Agua Tinta	N-S	0.21	0.20	0.14	3.0	0.65	0.00044	24	14.7	13.7	1.07	1.81	0.670
Balantetic	O-E	0.81	0.23	0.17	13.6	2.33	0.00023	3	1.7	0.7	1.79	1.65	0.099
Bosque Azul	NO-SE	1.32	0.82	0.40	52.5	5.81	0.01050	58	20.0	7.1	2.26	1.04	1.808
Chajchaj	N-S	0.45	0.31	0.21	9.2	1.33	0.00048	12	5.3	3.5	1.23	1.30	0.365
Cinco Lagos	NO-SE	0.82	0.60	0.29	23.7	3.78	0.01006	162	42.5	29.5	2.19	0.79	2.660
Dos Lagos	NE-SO	0.34	0.23	0.16	5.2	0.99	0.00132	42	25.2	16.4	1.22	1.78	1.341
Ensueño	NE-SO	0.22	0.19	0.12	2.7	0.66	0.00058	35	21.6	19.0	1.13	1.84	0.884
Esmeralda	NE-SO	0.14	0.11	0.08	1.1	0.42	0.00004	7	3.6	5.8	1.11	1.57	0.097
Kichail	SO-SE	0.58	0.44	0.21	12.5	2.38	0.00119	22	9.5	5.5	1.90	1.29	0.499
La Encantada	O-E	0.39	0.31	0.21	8.2	1.28	0.00241	89	29.4	27.5	1.26	0.99	1.880
Liquidambar	NO-SE	0.95	0.70	0.43	40.5	5.68	0.00453	24	11.2	3.3	2.52	1.42	0.797
Montebello	NE-SO	1.69	1.14	0.57	96.2	7.84	0.01186	45	12.3	4.0	2.26	0.83	1.513
Patianu	O-E	0.26	0.18	0.13	3.4	0.73	0.00037	26	10.8	12.5	1.12	1.25	0.504
Pojoj	NE-SO	1.06	0.74	0.41	43.7	3.61	0.01538	198	35.2	41.6	1.54	0.53	4.258
San José	NO-SE	1.76	0.66	0.34	60.6	4.54	0.00623	30	10.3	7.3	1.64	1.03	1.372
San Lorenzo	NO-SE	3.09	1.29	0.59	181.3	15.01	0.02147	67	11.8	4.4	3.14	0.53	0.001
Tziscaco	NE-SO	3.20	1.48	0.96	306.6	13.22	0.08852	86	28.9	11.7	2.13	1.00	6.695
Yalalush	NE-SO	0.54	0.33	0.21	11.5	1.87	0.00114	23	9.9	19.6	1.56	1.29	0.607
X		0.99	0.55	0.31	48.6	4.01	0.00982	53	16.9	12.9	1.73	1.22	1.447
max		3.20	1.48	0.96	306.6	15.01	0.08852	198	42.5	41.6	3.14	1.84	6.695
min		0.14	0.11	0.08	1.1	0.42	0.00004	3	1.7	0.7	1.07	0.53	0.001

Lmáx (máxima longitud), bmax (máxima anchura), bprom (promedio de anchura), A (área de superficie), SL (línea de costa o perímetro), V (volumen), Zmax (profundidad máxima), Zprom (profundidad promedio), Zr (profundidad relativa), DL (desarrollo de la línea de costa), DV (desarrollo de volumen), IBP (Índice de permanencia de la cuenca), (Modificado de Alcocer, et. al., 2016).

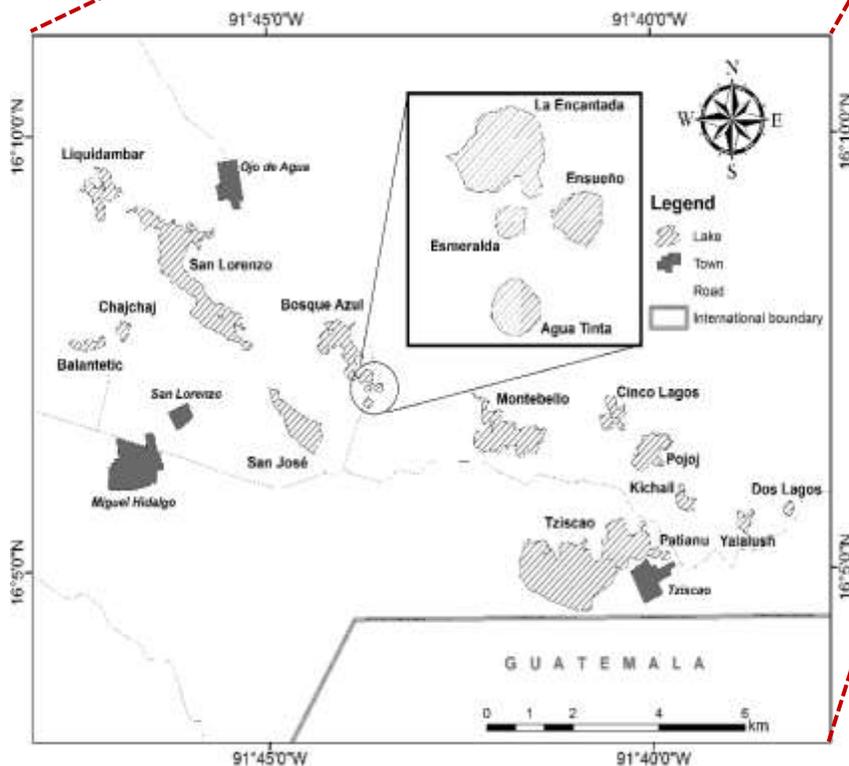
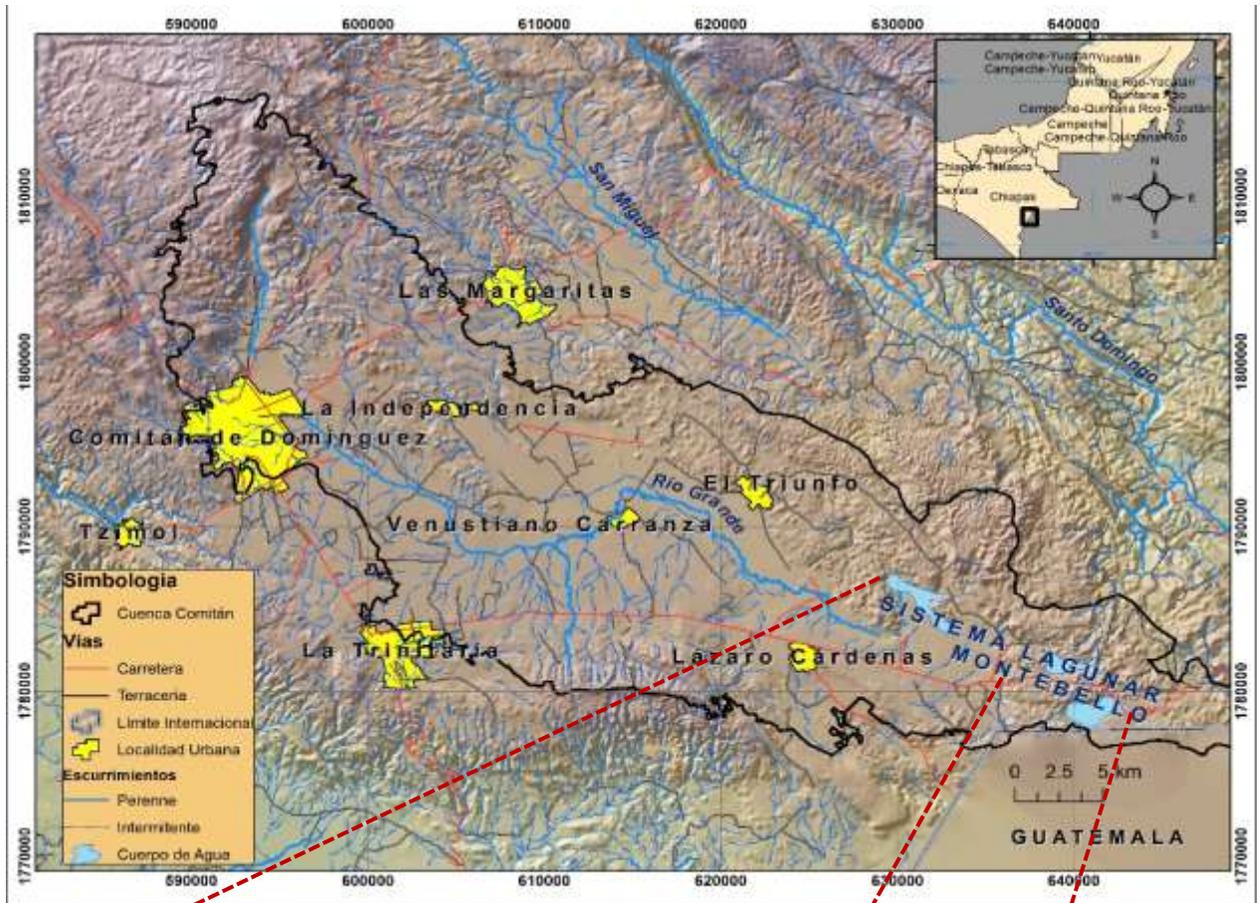


Figura 7. Hidrología de la Cuenca del Río Grande de Comitan y el Sistema Lagunar de Montebello (SLM), Chiapas (modificado de INEGI; 2010, 1:1000000; FUENTE: Alcocer, et al., 2016).

5.1.4 Clima

De acuerdo con el mapa de climas de INEGI (2000, 1:250000) hay cuatro climas que se distribuyen en la cuenca:

Clima	Descripción
(A) C (w1)	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual.
C (w1 y w2)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
C (m)f	Templado húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

La temperatura máxima ocurre en los meses de mayo y octubre (24-27°C), mientras que las zonas de montañosas y más altas de la cuenca se encuentran las temperaturas más bajas (9-15°C). En los meses de noviembre a Abril la temperatura máxima es de 21 a 27°C, mientras que la mínima es de 9-12°C. En cuanto a la precipitación, los meses más lluviosos también corresponden al periodo de mayo a octubre con una variación en la precipitación de 900 a 1700mm, sin embargo los meses con menor precipitación es el periodo de noviembre a abril con una precipitación de 100 a 500mm (CONAGUA, 2009) (ver anexo 5 *Precipitaciones de las estaciones meteorológicas que se ubican dentro de la cuenca del Río Grande de Comitán*).

5.1.5 Edafología.

Muchos de los suelos que se han desarrollado en la Cuenca del Río Grande de Comitán lo han hecho sobre material calcáreo, sedimentos fluviales y lacustres. INEGI (2004) en su carta a escala 1:250 000 (cartas E15-11, E15-12-D15-13) reporta siete grandes grupos: Cambisol (0.52%), Chernozem (8.22%), Feozem (19.80%), Leptosol (24.91%), Luvisol (19.08%), asociación de Planosoleútrico-Leptosol hiperesquelético (7.67%) y Vertisol (18.57%). El suelo urbano es tan sólo el 1.23% de todo el suelo de la cuenca. Aunado a lo anterior Vásquez y Méndez (1994) describen cinco grupos más los cuales se encuentran cerca del PNLN: Acrisoles, FLuvisoles, Gleysoles, Litosoles y Rendzinas. Los

Leptosoles son los suelos con una mayor extensión en la cuenca ocupando 23571ha, por otro lado los Cambisoles con 493ha son los que ocupan una menor superficie (tabla 2).

Tabla 2. Suelos de la Cuenca del Río Grande de Comitán y sus características de acuerdo con la WRB (2007).

SUELO	DESCRIPCIÓN	MATERIAL PARENTAL	DISTRIBUCIÓN EN CLIMAS	MANEJO Y USO
CAMBISOL	Tienen un horizonte superficial incipiente, ya hay formación de estructura y decoloración principalmente parduzca, incremento en el porcentaje de arcilla y la remoción de los carbonatos.	Materiales de textura media a fina derivados de un amplio rango de rocas.	Se distribuye en un amplio rango de climas.	Son buenos suelos para la actividad agrícola.
CHERNOZEM	Son suelos con una capa superficial gruesa negra rica en materia orgánica. Son oscuros con un croma menor o igual a 2.	Sedimentos eólicos y eólicos retrabajados (loess).	Regiones con clima continental con inviernos fríos y veranos calientes, que están secos por lo menos al final del verano.	Agricultura.
FEOZEM	Tienen un horizonte superficial oscuro, rico en humus, son menos ricos en bases. Presentan mayor lixiviación.	Materiales no consolidados, eólicos (loess), till y glaciario.	Cálido a fresco, regiones moderadamente continentales.	Agricultura.
LEPTOSOL	Son suelos someros sobre roca continua y suelos extremadamente gravillosos y/o pedregosos.	Varios tipos de roca continua o de materiales no consolidados con menos de 20% en volumen de tierra fina.	Todas las zonas climáticas.	Pastoreo y también para conservación de bosques.
LUVISOL	Tienen altos contenidos de arcilla en los horizontes inferiores que los superficiales, especialmente por la migración de las arcillas que forman un horizonte árgico. Las arcillas que contienen son de alta actividad y además de la alta saturación de bases a ciertas profundidades	Son muy variados: tillglaciario, depósito eólico, aluviales y coluviales.	Se distribuyen en zonas templadas hasta subtropicales y tropicales.	Aptos para la agricultura.

SUELO	DESCRIPCIÓN	MATERIAL PARENTAL	DISTRIBUCIÓN EN CLIMAS	MANEJO Y USO
PLANOSOL	Suelos con un horizonte superficial de color claro que muestra signos de estancamiento de agua periódico y suprayace abruptamente un subsuelo denso, lentamente permeable con significativo incremento de arcilla respecto del horizonte superficial.	Depósitos aluviales y coluviales arcillosos	Regiones subtropicales y templadas con una alternancia clara de estación seca y húmeda	Pastoreo extensivo
VERTISOL	Son suelos con altos contenidos de arcilla que se mezclan constantemente, las arcillas son de tipo expandibles. Se forman grietas anchas y profundas desde la superficie hacia abajo cuando se secan.	Tiene altos contenidos de arcillas expandibles.	Principalmente en climas tropicales, subtropicales, semiárido a subhúmedo y húmedo con una alternancia clara de estación seca y húmeda.	Agricultura.

Los principales suelos donde se desarrolla la actividad agrícola son Chernozem, Feozem, Vertisol, Luvisol, Leptosol y Cambisol. La actividad agrícola en el sitio es de temporal y riego. Los principales cultivos que se desarrollan en el área son maíz y frijol de temporal, jitomate, café, calabaza, chilacayote, pepino, tomate verde y algunas hortalizas como el repollo y la lechuga. De acuerdo con la figura 8, que se basa en el mapa de uso de suelo (INEGI, 2010), se observa que un 52.7% corresponde a suelo bajo actividad agrícola y que sólo el 47.3% es de conservación.

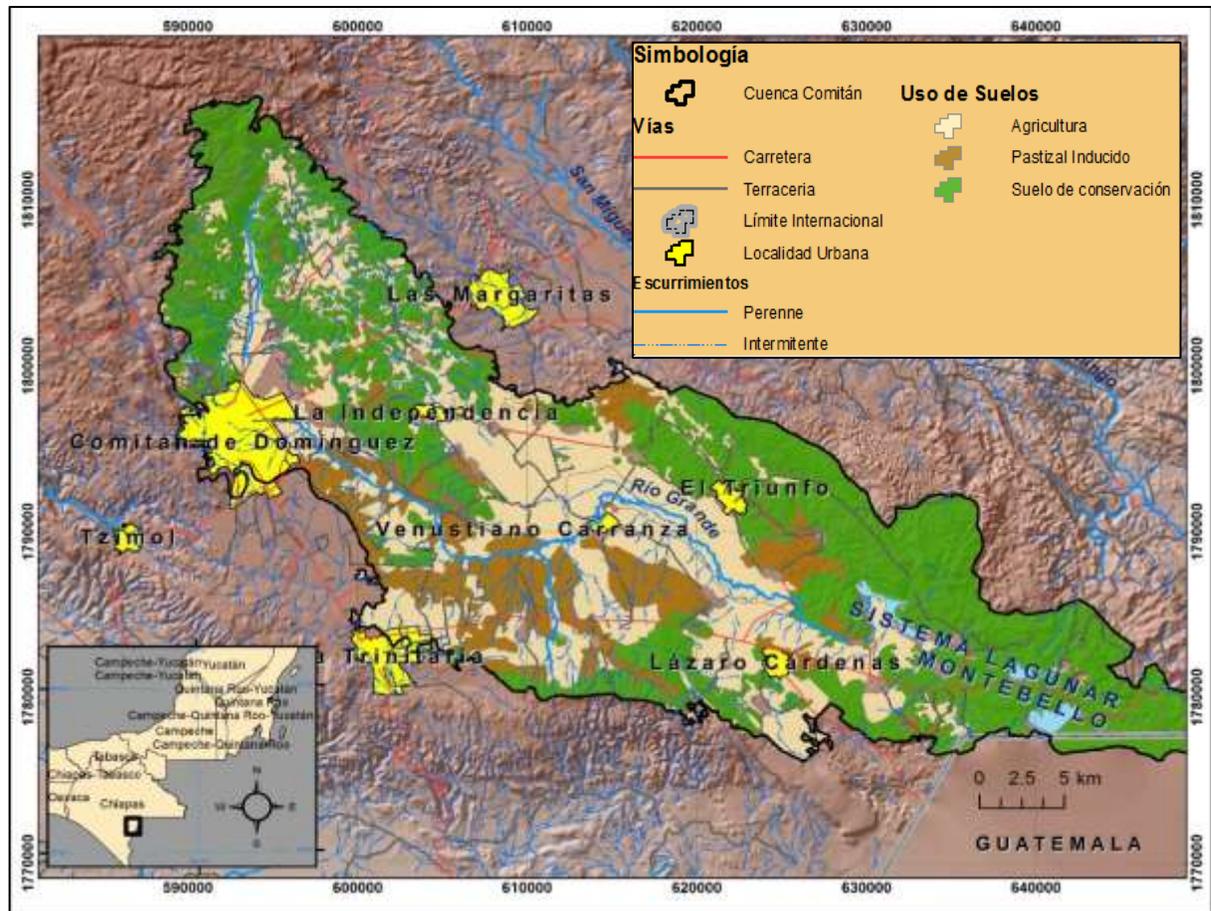


Figura 8. Mapa modificado de uso de suelos (INEGI, 2010 1:25000), donde se observa la superficie ocupada por suelo de conservación y la superficie agrícola y de pastizal inducido.

De acuerdo con el mapa de uso de suelo y vegetación el 52.7% del área corresponde agricultura, los remanentes de vegetación natural en la cuenca son asociaciones de pino-encino (17.4%, algunos ejemplos nanche, roble, caoba, ciprés, pino, romerillo, sabino, manzanilla, amate, cedro, ceiba y chicozapote.), bosque de pino (1.3%), bosque de encino (9.4%), bosque mesófilo de montaña (7.8%), chaparral (0.5%) y pastizal inducido (8.6%) y cultivado (0.9%). A lo largo del río se distribuye vegetación riparia (por ejemplo géneros como *Taxodium* y *Salix*). Dentro del Parque Nacional de los Lagos de Montebello (PNLM) existe flora de interés especial como las orquídeas, cuenta con 35 variedades de orquídeas, algunas están dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2001 como *Lycasteskinneriy Stanhopeaoculata* (INEGI, 2000, 1:250000; CONANP, 2007).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Localización de las parcelas.

Para definir los sitios de muestreo se utilizó la cartografía digital de INEGI de los mapas edafológico (INEGI 2004; 1:250000) y el de uso de suelo y vegetación (INEGI 2000; 1:250000). Se identificaron los principales suelos (los suelos con mayor expansión) y la zona agrícola de la Cuenca. Con el programa Arc GIS 10 se hizo un traslape de ambos mapas para poder identificar los suelos que están bajo la actividad agrícola y así obtener el mapa agrícola de suelos (figura 9).

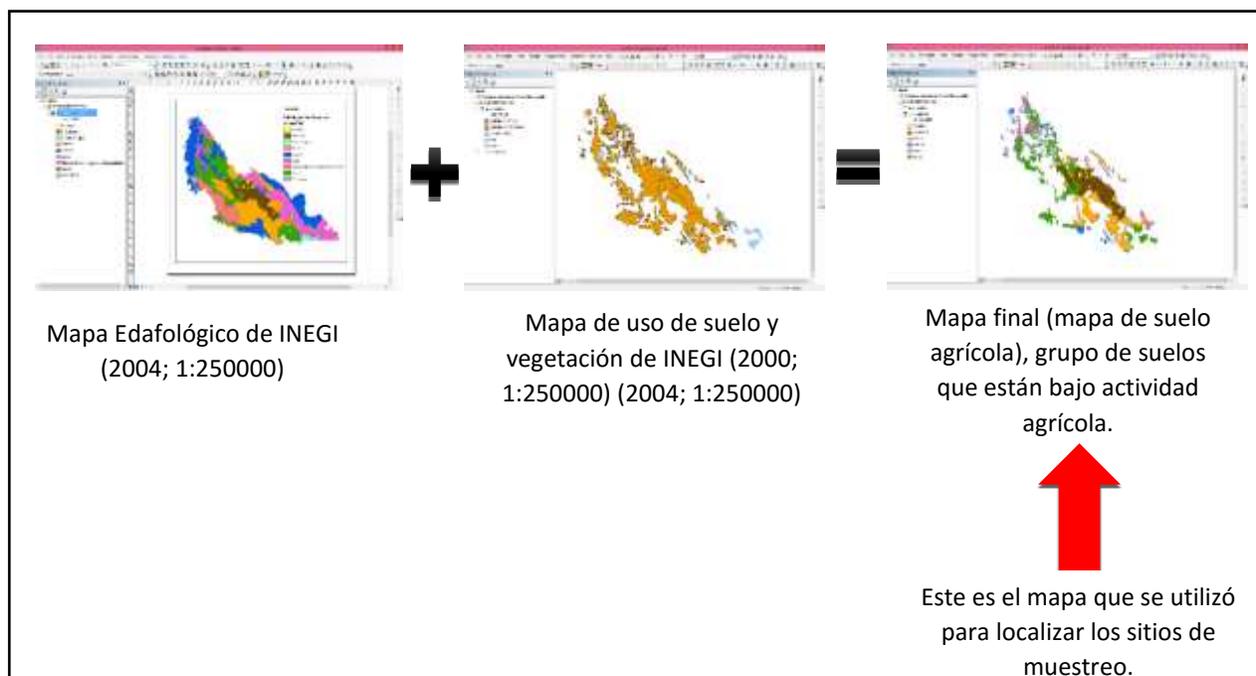


Figura 9. Mapa obtenido de suelos agrícolas de la Cuenca del Río Grande de Comitán.

Se realizaron recorridos en campo para verificar la información del mapa final, por tanto se buscó que el suelo identificado en el mapa realmente coincidiera con el que se encuentra en la región. Para corroborar la información se hizo una barrenación en la zona más homogénea de la parcela, posteriormente la descripción edafológica de ésta (se describió: espesor de horizontes, textura, carbonatos, pH, color en húmedo, revestimientos de arcilla o materia orgánica, manchas, motas, concreciones y nódulos de cada horizonte, **ver Anexo 4. Descripción de las barrenas en las parcelas de las muestras compuestas**) utilizando el Manual de Campo (Siebe et al., 2006). La información obtenida se comparó con la descripción de los perfiles que se usaron para la elaboración del mapa edafológico; y así tener certeza de que el suelo que se iba a muestrear pertenecía a la unidad edafológica de interés.

En los recorridos se identificaron todos los cultivos de la Cuenca y se escogieron los dos más comunes (jitomate y maíz de temporal). Se procedió a identificar las principales unidades de suelos que se encontraban bajo estos dos cultivos, utilizando el mapa de suelo agrícola y los recorridos de

verificación de la información. Finalmente se escogieron las parcelas a muestrear de los diferentes suelos bajo los dos diferentes cultivos y se buscaron que los puntos de muestreo fueran homogéneos en toda la Cuenca para tratar de evitar un sesgo de la información.

6.2 Muestreo compuesto y descripción de perfiles.

DISEÑO DE MUESTREO COMPUESTO: El diseño de muestreo que se hizo se representa en la figura 10. Para la elección de las unidades de suelos a muestrear para cada cultivo se incluyó información de los recorridos en campo junto con la información de la fisiología de dichos cultivos, la cual sirvió para identificar los suelos más aptos donde es posible el desarrollo de cada uno de éstos. Se muestrearon cinco unidades de suelo para el maíz (Leptosol, Vertisol, Luvisol, Feozem y Chernozem), mismos que se usaron para el jitomate a excepción del Leptosol debido a la poca profundidad que presenta y en consecuencia no permite el desarrollo de las raíces. Para cada unidad edafológica se muestrearon 4 parcelas, por lo tanto para el cultivo de jitomate se muestrearon un total de 20 parcelas, y para el de maíz sólo 16.

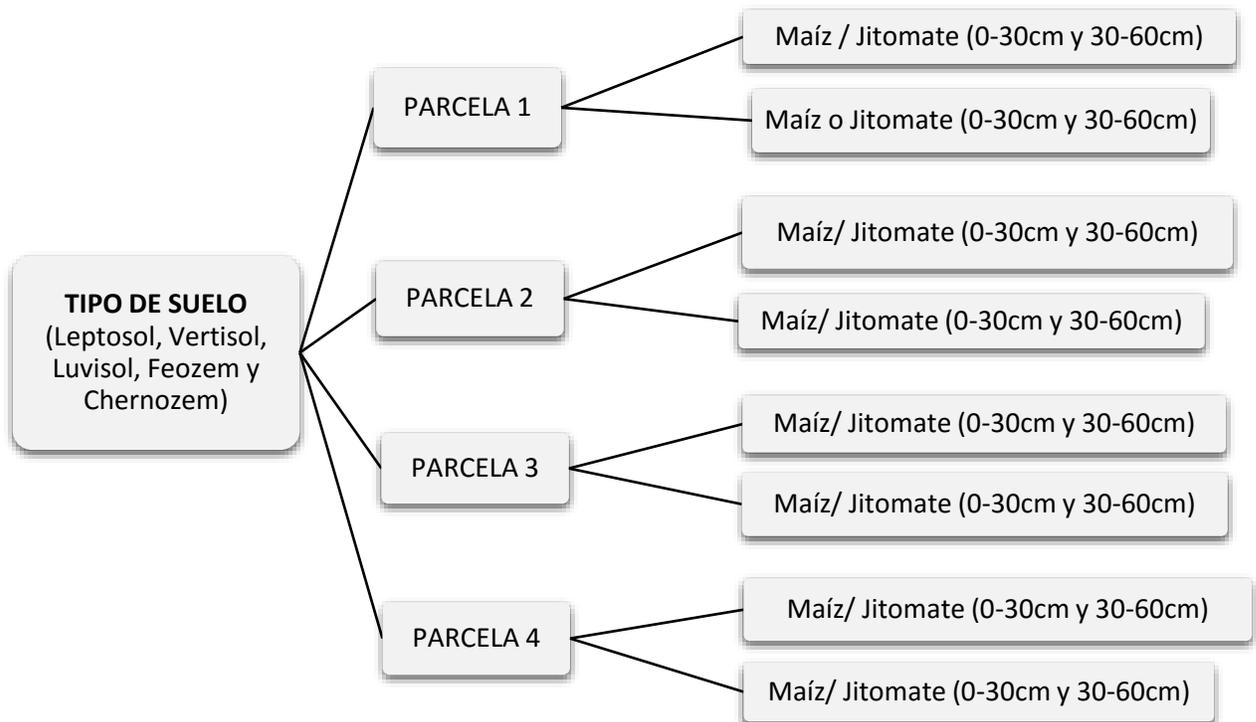


Figura 10. Diseño de muestreo para las muestras compuestas por unidad de suelo.

TOMA DE MUESTRAS COMPUESTAS: una muestra compuesta está conformada por varias submuestras (Rodríguez, 2002). Para disminuir la variabilidad de los datos en cada parcela se tomaron dieciséis submuestras para formar una muestra compuesta, ya que los suelos son muy heterogéneos (figura 11). Se utilizó una barrena de media caña y un mazo de plástico para tomar las submuestra de suelo. La parcela se dividió en 4 líneas y en cada línea se tomaron cuatro puntos, el

diagrama de la figura 12 ejemplifica como se hizo el muestreo dentro de la parcela y los puntos que se tomaron. En cada punto se tomaron dos muestras compuestas una que va de 0-30cm de profundidad y la segunda de 30-60cm. Las submuestras, de cada muestra compuesta, se fueron colectando en cubetas, posteriormente se mezclaron y homogenizaron, una cubeta correspondía a la muestra compuesta de 0-30cm y otra para la muestra compuesta de 30-60cm. Las muestras se metieron en bolsas de plástico y se etiquetaron (*ver traslado de muestras de este subcapítulo*).

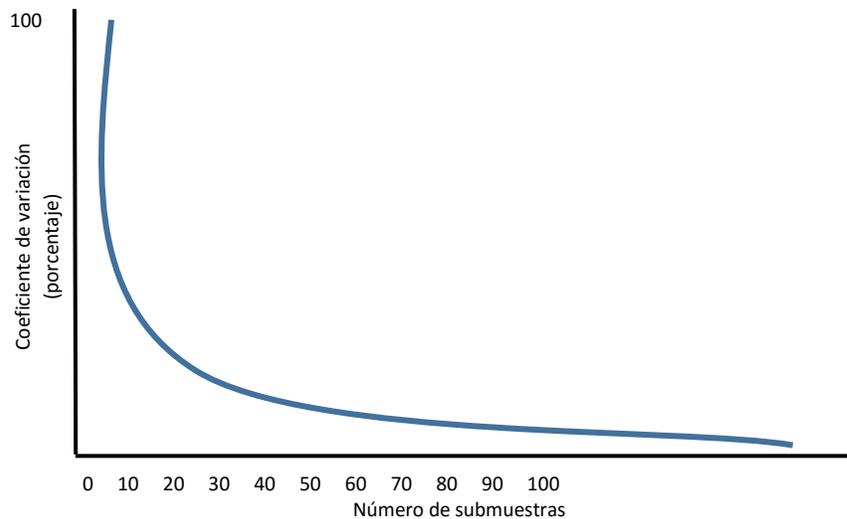


Figura 11. Relación entre el coeficiente de variación y el número de submuestras tomadas para formar una muestra compuesta de suelo (Rodríguez, 2002).

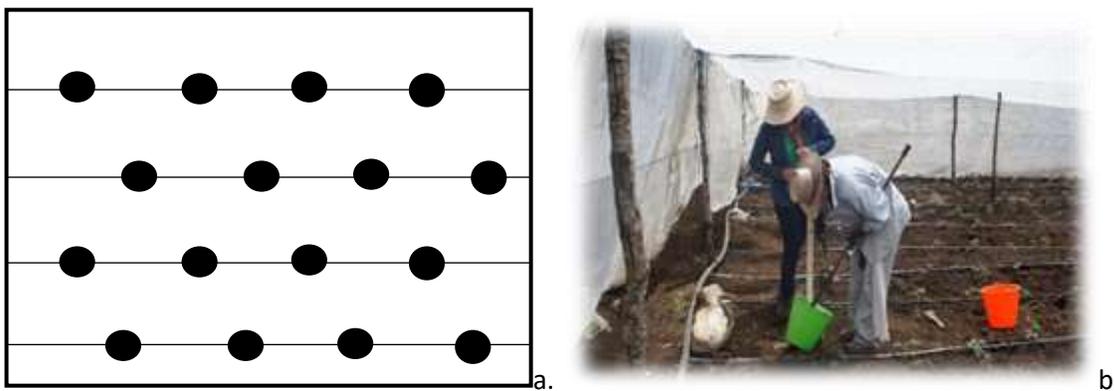


Figura 12. **a.** Los círculos negros representan los puntos donde se tomaron las submuestras en una parcela para formar una muestra compuesta (el mínimo de submuestras a tomar es un total de 16). **b.** Toma de muestras compuestas en una parcela agrícola.

MUESTREO Y DESCRIPCIÓN DE PERFILES DE SUELO: se utilizó el mapa de suelo agrícola (*ver localización de las parcelas*) para ubicar dos sitios con suelos arcillosos y se corroboró con la barrenación en la parcela. Uno de los sitios corresponde al cultivo de jitomate y el otro al de maíz.

Se ubicaron dos extremos homogéneos de la parcela y se procedió hacer una calicata para su posterior descripción (2 calicatas por parcela), para dicha descripción en campo y evaluación edafocológica se utilizó el Manual de Campo de Siebe et al. (2006), Para la asignación del nombre de los suelos se hizo de acuerdo con la WRB (2007). Al término de la descripción edafocológica se tomaron muestras de cada horizonte para los análisis físico-químicos, la toma de muestras de los horizontes se hizo de uno en uno y de abajo hacia arriba para evitar contaminación entre ellos, para la toma de muestra se utilizó una pala jardinera y se muestreó diferentes partes del horizonte para poder tener una muestra más representativa. Las muestras se metieron en bolsas de plástico y se etiquetaron (*ver traslado de muestras de este subcapítulo*).

TRASLADO DE LAS MUESTRAS: todas las muestras de suelo (tanto de los perfiles como de las muestras compuestas) se metieron en bolsas de plástico y se les colocó al interior una etiqueta de papel albanene con la siguiente información: clave de muestra, fecha de muestreo, nombre de la persona que muestreo, el lugar, la profundidad a la que la muestra fue tomada, el cultivo y el tipo de suelo. Posteriormente se cerraron con una liga y con un marcador permanente en el exterior de la bolsa se reescribió: la profundidad a la que la muestra fue tomada, el nombre del sitio, el nombre del cultivo y el tipo de suelo. Posteriormente se colocaron las bolsas con las muestras de suelo en hieleras, y se agregó hielo para evitar que la actividad biológica continuara y degradará principalmente al amonio. Se cercioró de que las bolsas estuvieran bien cerradas para evitar que el agua se introdujera en la muestra de suelo, así mismo el hielo se cambió constantemente para evitar la inundación de las muestras.

6.3 Instalación de los contenedores de resinas de intercambio iónico en las parcelas con suelos arcillosos.

6.3.1 Preparación de los contenedores de resinas de intercambio iónico.

LAVADO DE ARENA SÍLICA: en una tina de plástico se colocaron aproximadamente 10kg de arena sílica, se deben realizar cinco lavados, los primeros cuatro lavados se hicieron con agua de la llave y el quinto con agua destilada. Durante 24 hrs se dejó escurrir y secar la arena sílica.

CONSTRUCCIÓN DE LOS CONTENEDORES DE RESINAS: se utilizan tubos de pvc, los cuales se cortaron de 10 cm de diámetro y 10 cm de longitud, los bordes de los tubos se limaron con un papel lija. En la parte superior del tubo se hicieron dos orificios donde se colocaron los hilos guía de 1m de largo cada uno, el hilo que se usó es hilo cáñamo. En la base de los tubos se pegó una malla de nylon con silicón evitando que la malla quedara holgada. Finalmente se lavan los contenedores con agua destilada para quitar impurezas (figura 13).



Figura 13. Contenedor de resinas de intercambio iónico, tomado de Díaz (2011).

PREPARACIÓN DE LAS RESINAS IÓNICAS: se hizo un lavado de las resinas aniónicas y catiónicas con una solución de cloruro de sodio (NaCl) 1M. Por cada 5L de resina se usaron 15L de solución de NaCl. Las resinas se dejaron sumergidas en la solución por una hora, agitando cada 15 minutos. Después de la hora se utilizó un tamiz malla para separar las resinas de la solución de NaCl. Estos pasos se repitieron dos veces. Las resinas catiónicas se lavaron por separado de las aniónicas (**ver Anexo 2 fichas técnicas de las resinas catiónicas y aniónicas**).

MEZCLA DE RESINAS Y ARENA SÍLICA: como instrumento de medida se usaron los contenedores de resinas previamente elaborados. La relación que se hizo fue de 1:1 (una de resina catiónica por una de aniónica). Posteriormente se hizo la mezcla final, que incluyó la mezcla de las resinas aniónicas con las catiónicas y la arena sílica en una relación de 1:2.5 respectivamente.

6.3.2 Instalación en campo de los contenedores de resinas de intercambio iónico.

La instalación de los contenedores de resinas de intercambio iónico se realizó en mayo de 2013 (tabla 3). La instalación se llevó a cabo en las calicatas previamente hechas y descritas en los suelos arcillosos, la profundidad a la que se instalaron fue de 60 cm, para evitar el contacto de las raíces con los contenedores y no hubiese interferencia. Por cada calicata se instalaron 10 contenedores, este número de contenedores es el mínimo recomendado para cuantificar la lixiviación, ya que disminuye la variación en los resultados obtenidos. Los sitios de instalación fueron los perfiles de suelos arcillosos de un cultivo de Maíz y el otro de Jitomate.

Tabla 3. Información de la instalación de los contenedores de resinas de intercambio iónico, en los sitios de estudio, los periodos de instalación y permanencia.

SITIO	PERFIL	NÚMERO DE RESINAS	PERIODO DE PERMANENCIA	CULTIVO
LOS RIGOS	R1 y R2	10	10 resinas: mayo-diciembre 2013	Jitomate
LA ESPERANZA	E1 y E2	10	10 resinas de mayo-diciembre de 2013	Maíz

La correcta instalación se hizo de la siguiente manera: en una de las caras de la calicata (se sugiere no utilizar la cara que se muestreo y describió, ya que se alteró la estructura natural al momento de tomar la muestra de cada horizonte) se midió aproximadamente 60 cm de profundidad de la parte superficial hacia abajo, posteriormente con una barrena se hicieron cinco orificios, se cuidó de no romper la estructura natural del suelo o generar flujos preferenciales al provocar la formación de grietas (figura 14). Posteriormente con una cuchara plana se procedió a dar forma al túnel redondo a una forma cuadrada, con la misma cuchara recta se verificó y corrigió cada una de las caras del orificio buscando tener caras con estructuras naturales (figura 14). Con sólo arena sílica se formó una capa de aproximadamente 2 cm de espesor en cada una de las caras, posteriormente se introdujo uno de los contenedores (un túnel por contenedor) y se rellenó con el resto de la arena sílica, la arena evita el ascenso capilar del agua, para finalizar el cierre de cada túnel se generó un tapón con el suelo del perfil para que la arena no se desmorone (figura 15). Los hilos guías quedaron al descubierto y se comenzó a cerrar la calicata, cuando la calicata iba a la mitad de su cierre se esparcieron los hilos guía y se terminó de cerrarla (Bischoff 2007 & Díaz 2011).



Figura 14. a y b Construcción de los túneles de instalación, c. Cuadrar y elaborar el techo del túnel y d. Instalación de los contenedores.



Figura 15. **a y b** Cierre de los túneles con arena sílica y por último con suelo.

6.3.3 Desinstalación de los contenedores de resinas de intercambio iónico.

Para la adecuada señalización del sitio de instalación de los contenedores de resinas (para su posterior localización al momento de desinstalarlos) se hizo una triangulación que se ejemplifica en la figura 16 y 17, se emplearon cintas métricas de 50 m de longitud y por lo menos dos personas. La primera persona se paró en el sitio de instalación, mientras que la segunda persona se paró en un punto de referencia (por ejemplo un árbol, un poste, etc.). Ambas personas sujetaron la misma cinta métrica, la persona que está sobre el sitio de instalación enfocó detrás de la segunda persona un segundo punto de referencia, esto se repitió para tres puntos. En cada punto se tomaron las medidas. Después del periodo de permanencia de los contenedores se hizo la misma triangulación en el sitio (con los mismos puntos de referencia que se usaron la primera vez que se hizo la triangulación) para buscar el sitio de instalación, durante la excavación se buscaron los hilos guía que dirigen a los contenedores.

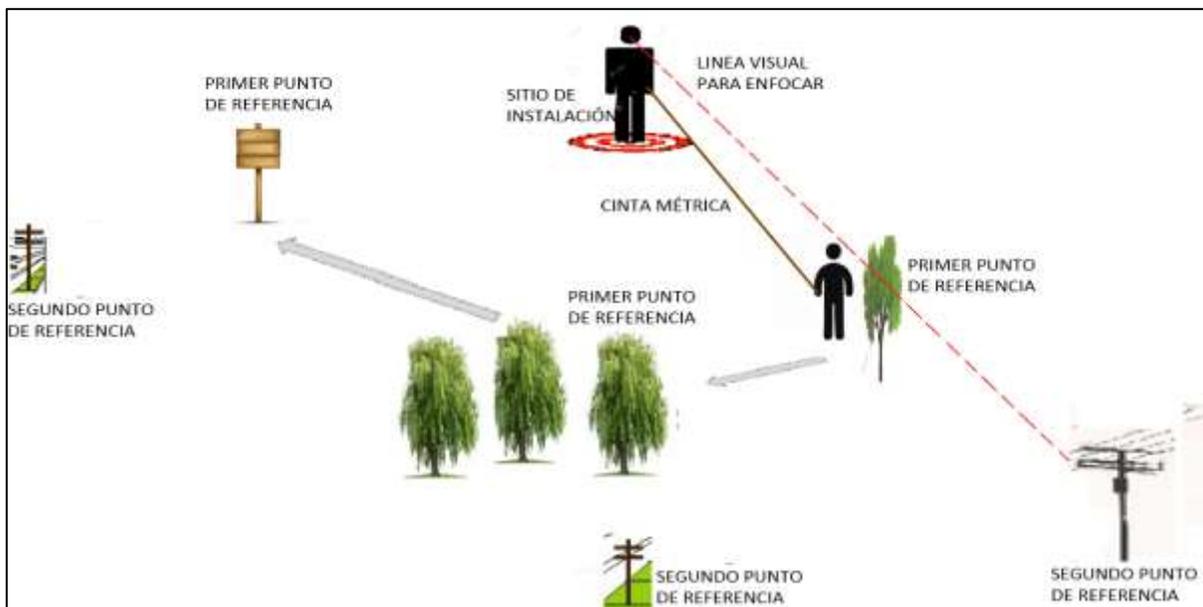


Figura 16. Triangulación para localizar el sitio de los contenedores de resinas de intercambio iónico después del periodo de instalación.



Figura 17. **a, b y c** Triangulación para localizar el sitio de los contenedores de resinas de intercambio iónico después del periodo de instalación, **d.** búsqueda de los hilos guía y de los contenedores.

6.3.4 Análisis de muestras en el laboratorio.

PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE SUELO: las muestras se colocaron en el cuarto refrigerado a una temperatura de 4°C, para disminuir la actividad biológica. Posteriormente para los análisis físico-químicos se llevaron al cuarto de temperatura controlada para extraer la humedad (solamente se utilizó la mitad de cada muestra el resto siguió en el cuarto refrigerado), antes de introducir las muestras al cuarto de temperatura controlada previamente se mezcló y se cuarteo la muestra para homogenizarlas. Por último, se trituraron con un mazo de madera y se tamizaron por un tamiz de 2mm de apertura.

Se utilizó un mortero de ágata para moler de 15 a 20 gr de muestra de suelo para los análisis de materia orgánica, nitrógeno total, carbono total y carbono inorgánico se molió hasta obtener una textura muy fina parecida al talco, entre cada muestra se enjuagaba el mortero con agua destilada hasta retirar todas las partículas finas de la muestra anterior.

MUESTRAS COMPUESTAS: para llevar un orden en el análisis de las muestras compuestas se procedió a agruparlas por cultivo, se separaron las muestras de los cultivos de maíz de las de jitomate. Así mismo se agruparon las muestras por parcelas y tipo de suelo. Para el trabajo en laboratorio se utilizaron las muestras que fueron previamente secadas y tamizadas en cuarto de temperatura constante. Los análisis que se hicieron en las muestras compuestas fueron: pH, conductividad, nitratos, amonio, carbono orgánico total, carbonatos, materia orgánica y humedad del suelo.

MUESTRAS DE HORIZONTES DE PERFILES: se agruparon las muestras por sitio y posteriormente por perfil. Para el trabajo en laboratorio se utilizaron las muestras que fueron previamente secadas y tamizadas en cuarto de temperatura constante. Los análisis que se hicieron en las muestras compuestas fueron: pH, conductividad, nitratos, amonio, bases intercambiables, carbonatos, materia orgánica, carbono orgánico total y humedad del suelo.

pH: La lectura de pH se realizó utilizando un potenciómetro BECKMAN $\phi 34$ pH Meter. Se hizo una calibración con una curva de tres puntos utilizando los buffer pH 4, 7 y 10. El pH de cada muestra se determinó en tres soluciones diferentes (agua destilada, cloruro de potasio KCl 1M y una solución de cloruro de calcio CaCl_2 0.01M) en una relación 1:2.5. Se utilizó el método MET-012 de Van Reeuwijk (1992) "Determinación del pH del suelo en H_2O , KCl 1M y CaCl_2 0.01M". La cantidad de suelo utilizada fue de 10 gr y el tiempo de agitación fue de 24 hrs debido a los altos contenidos de arcilla en las muestras.

Antes de la medición se agitó manualmente dos veces el frasco y se colocó el electrodo en la parte superior de la suspensión, se tomó la lectura cuando ésta se estabilizó, se consideró estable cuando ya no cambió 0.1 unidad por segundo o 0.02 unidades por 5 seg (Van Reeuwijk, 1992).

Después de cada 10 muestras medidas se introdujo por duplicado la última, para verificar si el electrodo del potenciómetro no presentaba alteraciones y la medición no tuviera variaciones. Si se tiene muestra suficiente se recomienda hacer duplicados.

Conductividad eléctrica: para determinar la conductividad eléctrica se hizo en la solución de agua destilada utilizando el mismo método (MET-012), se utilizó una celda (La Motte CON6), las unidades en que se miden son micro Simens (μS).

Se calibró el electrodo con una muestra patrón. Después de cada 10 muestras medidas se introdujo por duplicado la última, para verificar si la celda de conductividad eléctrica no presentaba alteraciones en las mediciones. Si se tiene muestra suficiente se recomienda hacer duplicados.

Determinación de cationes: para determinar los cationes intercambiables se hizo a través del método MET-007 "Determinación de cationes intercambiables por extracción de Acetato de amonio 1N pH 7" de Van Reeuwijk (1992). Se utilizó un espectrofotómetro Perkin Elmer 3110 en flama de aire-acetileno para determinar Calcio (Ca^{+2}) y magnesio (Mg^{+2}). Por otro lado, se utilizó un flamómetro Corning 400 en llama de una mezcla de butano 65% y propano 35% para determinar Sodio (Na^{+1}) y Potasio (K^{+1}). En cuanto a los resultados se reportaron en $\text{cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$.

Extracción de Nitrógeno disponible: la extracción del nitrógeno disponible (amonio y nitratos) se hizo de acuerdo con el método MET-04 "Determinación de amonio y nitratos intercambiable en suelo", para lo cual se utilizó una solución de cloruro de potasio (KCl) 2M, por cada litro de agua se pesó un total de 149gr de KCl. Las extracciones se hicieron en frascos de plástico (Nalgen® y Vectra de boca ancha con una capacidad de 100ml), cada extracción se hizo en 5 gr de suelo, y se usó 50ml de la solución extractante. Para poder llevar a cabo el intercambio del nitrógeno disponible por el KCl se colocaron los frascos en un agitador SHAKER SK-71 durante 30 min a 120 rpm. Posteriormente se realizó un filtrado (papel filtro Whatman de 40) en frascos de plástico con una capacidad de 50ml.

Para cada muestra se realizó su duplicado y se etiquetaron los frascos con las claves de las muestras para tener un mejor control en el laboratorio.

Determinación de Amonio: se hizo mediante el método del azul de indofenol (Eaton, et. al., 2005) y se preparó una curva de calibración de acuerdo con la siguiente tabla:

Conc. inicial (mg/l)	Vol _{inicial} (ml)	Conc. final (mg/l)	Vol. final (ml)
10	0.000	0	50
10	0.125	0.025	50
10	0.25	0.05	50
10	0.5	0.1	50
10	1	0.2	50
10	2.5	0.5	50
10	5	1	50
10	10	2	50
10	15	3	50
10	20	4	50

En tubos identificados se colocaron 2.5 ml de las muestras de las extracciones de nitrógeno disponible y a cada muestra se le adicionó 0.2 ml de la solución de fenol en cada muestra, 0.2 ml de la solución de nitroprusiato y 0.3 ml de la solución oxidante. Se taparon y colocaron en un contenedor durante 10 min en la oscuridad para generar la reacción, posteriormente en un espectrofotómetro se leyó la absorbancia de cada muestra en la longitud de onda de 655 nm. Posteriormente se utilizó la siguiente fórmula para determinar la concentración en mg/L de amonio en cada muestra:

$$\text{Conc. (mg/L)} = \frac{Abs - b}{m} * \text{dil} \dots \dots \dots \text{ec.1}$$

Determinación de Nitratos: se determinó mediante el método de salicilato de sodio (MET-056, Monteiro, et.al., 2003), para lo cual se preparó una curva de calibración:

Conc. inicial (mg/l)	Vol _{inicial} (ml)	Conc. final (mg/l)	Vol. final (ml)
10	0.000	0	50
10	0.125	0.025	50
10	0.25	0.05	50
10	0.5	0.1	50
10	1	0.2	50
10	2.5	0.5	50
10	5	1	50
10	10	2	50
10	15	3	50
10	20	4	50

En los tubos identificados se colocó 1 ml de cada muestra y se adicionó 0.5 ml de salicilato, posteriormente se dejó secar las muestras a 110°C, después se adicionó 0.5 ml de H₂SO₄ concentrado, se dejó durante 10 min y finalmente se adicionaron 4ml de agua Milli-Q y 3ml de la mezcla de tartrato de potasio y sodio. Se pasó una alícuota a una celda de cuarzo y se leyó el valor de la absorbancia en el espectro a una longitud de onda 430 nm se utilizó la ecuación 1 para determinar la concentración en mg/L de nitratos.

Carbono Total: Se utilizó un analizador elemental CHN/O Perkin Elmer 2400 series II en el modo CHN bajo las siguientes condiciones Helio como gas acarreador, una temperatura de combustión 980°C y una de reducción de 640°C, con una conductividad térmica como detector y la acetanilida como compuesto de calibración. Las muestras que se utilizaron para este análisis fueron las que se tamizaron con el mortero de ágata y se hizo el procedimiento por duplicado.

Carbono inorgánico (carbonatos): Para la cuantificación de carbono inorgánico se pesaron 100 mg de muestra en cápsulas de porcelana, se adicionó 0.5 mL de ácido fosfórico a la muestra a fin de lograr el cambio de especiación de carbonatos y bicarbonatos hacia CO₂, posteriormente se introdujeron en un horno purgado con oxígeno a 200°C., el CO₂ el cual fue llevado a través de una corriente de aire hasta el detector IR.

Carbono orgánico: El carbono orgánico se determinó mediante la diferencia del carbono total menos el carbono inorgánico.

Materia orgánica: El contenido de materia orgánica se obtuvo multiplicando el porcentaje de carbono orgánico por el factor de materia orgánica 1.724 (factor de Van Bemmelen).

Humedad gravimétrica del suelo: Para medir la humedad del suelo se pesaron charolas de aluminio, posteriormente se pesaron 3 gr aproximadamente (se debe registrar el peso real que marca la balanza) de suelo a humedad de campo en la balanza granataria (OHAUS® PRECISION Standard, TS400D). Se colocaron las charolas con el suelo en una estufa a 105°C durante 24 hrs. Después de ese tiempo las charolas se sacaron de la estufa y se colocaron dentro de un desecador para ser pesadas posteriormente y obtener su peso. El procedimiento se repitió cuantas veces fue necesario hasta obtener un peso constante. Para obtener la humedad del suelo gravimétrica (g/g) se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%HGS = ((\text{peso de suelo húmedo} - \text{peso de suelo seco a } 105^\circ) / \text{peso de suelo seco}) * 100 \dots \text{ec.2}$$

$$\text{Peso de suelo seco a } 105^\circ = (\text{peso de la charola más suelo a } 105^\circ - \text{peso de la charola}) \dots \text{ec.3}$$

ó

$$\%HGS = ((\text{peso de suelo húmedo} / \text{peso de suelo seco a } 105^\circ) - 1) * 100 \dots \text{ec.4}$$

% HGS= Porcentaje de Humedad Gravimétrica del Suelo

$$\text{Factor de corrección de humedad} = (100 + \%HGS) / 100 \dots \text{ec.5}$$

EXTRACCIÓN DE CATIONES Y ANIONES RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO: En el laboratorio el contenido de cada contenedor de resinas fue dividido en tres capas para su posterior análisis (de acuerdo con lo que se establece en la Patente No. 197 26 813, registrada en la República Federal de Alemania por la consultora TerraAquat, DE205918338), esto es para poder hacer la interpretación de la dirección del flujo. La capa superior es de 5 cm, una media de 2 cm y la inferior de 3 cm, aunque en algunos contenedores la última capa solo media 2.5 cm. La extracción de cada capa se hizo introduciendo una espátula en los contenedores y con una cuchara de plástico se retiraba la primera capa y posteriormente las demás (figura 18), se hizo así ya que algunos contenidos (arena sílica más las resinas iónicas) estaban secos y por consiguiente voltear el contenedor para retirarlo y sacar las capas como los describe Díaz (2011) en su trabajo no fue posible.



Figura 18 Separación de las capas de los contenedores de resinas de intercambio iónico.

Cada capa se colocó por separado en bolsas resellables para obtener después su peso en la balanza granataria (OHAUS® PRECISION Standard, TS400D). Sobre las bolsas se le escribió la clave correspondiente. Para hacer la extracción de los iones se pesaron 15g de cada capa y se colocaron en frascos Nalgen® y Vectra de boca ancha con una capacidad de 100ml. La solución que se usó de extractante, para intercambiar a los iones que se adsorben en las resinas, fue el ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0.5 M, la cantidad que se administró fueron 60 ml. Los frascos se agitaron a 180rpm en el equipo SHAKER SK-71 durante 30 minutos. Por último, se realizó un filtrado con papel Whatman No. 40 en frascos de plástico con una capacidad 50ml.

Se requirió de medir la humedad de cada capa. Primero se pesó la charola en la balanza granataria (OHAUS® PRECISION Standard, TS400D), después se registró el peso de la mezcla (arena sílica más resinas iónicas) de cada capa y posteriormente se metieron en una estufa a 105°, durante 24 hrs. Finalmente se registró el peso final y se hicieron los cálculos que se describen a continuación:

$$\%HGM = ((\text{peso de mezcla húmedo} - \text{peso de mezcla seca a } 105^\circ) / \text{peso de mezcla seca}) * 100 \dots \text{ec.6}$$

$$\text{Peso de mezcla seca a } 105^\circ = (\text{peso de la charola más mezcla a } 105^\circ - \text{peso de la charola}) \dots \text{ec.7}$$

$\%HGM = ((\text{peso de mezcla húmedo} / \text{peso de mezcla seca a } 105^\circ) - 1) * 100 \dots \dots \dots ec.8$

$\% HGM = \text{Porcentaje de Humedad Gravimétrica de la Mezcla (arena sílica más resinas iónicas)}$

$\text{Factor de corrección de humedad} = (100 + \%HGM) / 100 \dots \dots \dots ec.9$

DETERMINACIÓN DE NITRATOS Y AMONIO: la determinación de nitratos y amonio en las resinas de intercambio iónico se hizo de la misma forma que en las muestras de suelo, sin embargo, las curvas de calibración para determinar nitratos y amonio se diferenciaron por la matriz en la que se hizo la extracción del nitrógeno disponible, mientras que en las muestras de suelo fue cloruro de potasio el extractante, para las resinas de intercambio iónico se utilizó ácido sulfúrico.

DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO Y NITRATOS: los iones que almacena la primera capa son los provenientes del proceso de la lixiviación, corresponden a los flujos verticales en el perfil de suelo en el periodo de tiempo que permanecieron instalados los contenedores. La capa de en medio tiene dos funciones, por un lado, indica si la capa superior se saturó y por otro lado indica si hubo ascenso capilar desde la parte inferior, la teoría menciona que esta capa debe estar libre de iones o con una concentración inferior a la capa superior. La capa inferior acumula los iones que ingresaron al contenedor a través del ascenso capilar, es un transporte que provienen de la parte baja del perfil y que va hacia la superficie (Díaz, 2011).

Para calcular la lixiviación de nitrógeno y en específico de nitratos en los contenedores de resinas de intercambio iónico se promedió las concentraciones obtenidas de los contenedores de resinas de intercambio iónico.

Para las muestras compuestas de los diferentes tipos de suelos bajo los cultivos de jitomate y maíz, se comparó la concentración de nitratos de la primera capa (0-30cm) con respecto a la segunda (30-60cm) para poder determinar si existe lixiviación de nitratos.

6.3.5 Cultivo con mayor aporte de nitrógeno residual al suelo.

CULTIVO CON MAYOR APORTE DE NITRÓGENO RESIDUAL AL SUELO: se entrevistó a los dueños de las parcelas para conocer los fertilizantes y las cantidades que utilizaban durante el periodo de cultivo tanto del maíz como del jitomate, se incorporó la información de los paquetes tecnológicos de los cultivos de jitomate y maíz registrados en el Distrito de Desarrollo Rural (SAGARPA) (**ver Anexo 6**). De cada fertilizante nitrogenado utilizado para el cultivo de maíz y jitomate se obtuvo los kg de nitrógeno que contenía cada uno de ellos, y se calculó el ingreso de kilogramos de nitrógeno por hectárea de cultivo de cada una de las parcelas muestreadas por tipo de suelo, para esta parte se consideró una densidad real promedio de $1.3g/cm^3$ (FitzPatrick, 1996).

CLASE DE SUSCEPTIBILIDAD EN FUNCIÓN DEL NITRÓGENO RESIDUAL DEL SUELO: Se obtuvo de las muestras compuestas de cada parcela por tipo de suelo y cultivo el Nitrógeno Residual, el cual se hizo a partir de la suma de los nitratos y amonio, las unidades que se trabajaron al final fueron kg de N/ha (kilogramos de nitrógeno por hectárea). Para determinar cuál sería el grado de riesgo del nitrógeno residual en los diferentes suelos bajo el cultivo de maíz o jitomate se consideró la clasificación que propone Drury (2010):

CLASE DE SUSCEPTIBILIDAD	kg de N/ha
Muy bajo	0-9.9
Bajo	10-19.9
Moderado	20-29.9
Alto	30-39.9
Muy Alto	>40

6.3.6 Identificación de los sitios susceptibles a la lixiviación.

IDENTIFICACIÓN DE SITIOS SUSCEPTIBLES A LA LIXIVIACIÓN: Para identificar los sitios susceptibles se utilizó el programa Arc GIS 10 y se hizo una interpolación espacial, para la cual se creó una superficie a partir de los puntos medios basados en la extensión de la similitud. Para poder determinar qué sitios son susceptibles a la lixiviación se consideró la siguiente información: precipitación, textura de los suelos, desarrollo kárstico en la región, zonas de acumulación y dispersión de agua (pendientes).

La interpolación espacial consistió en generar una matriz de ponderación, para la cual a cada factor que favorece la lixiviación se le asignó un valor numérico en cuanto al grado de impacto que tienen. Es decir a cada pixel de los mapas en formato raster se le asignó un valor (1, 2 y 3) del más bajo al más alto, posteriormente se hizo un cruce de mapas para poder obtener el mapa resultante, a continuación se muestran los rangos de cada factor que entran en las categorías numéricas:

Valor asignado	Precipitación	Textura	Desarrollo kárstico en la región	Zonas de acumulación y dispersión (pendientes)
1 (Bajo)	800-1200mm	Arcilla	Flanco de plegamiento (cuestas pronunciadas). Lomeríos bajos de pendiente continua denudatoria. Plegamiento con estructura mesiforme (desarrollo kárstico incipiente). Restos de piedemonte con depósitos antiguos disectados.	>18°
2 (Medio)	1200-1500mm	Franco-Limosa	Elevaciones bajas con karst de dolinas y poljes inundados. Mogotes (karst cubierto avanzado). Plegamientos con estructura mesiforme (desarrollo kárstico vertical) Terrazas estructurales.	4-18°
3 (Alto)	1500-2000mm	Arenosa	Antigua planicie kárstica cubierta con material residual. Planicie acumulativa de origen lacustre residual. Planicie kárstica. Relieve mesiforme de plegamiento con depresiones kársticas (karst moderado). Valle fluvial.	0-4°

Para los grados de susceptibilidad las sumas resultantes del cruce de los mapas (suma ponderada) se agruparon en tres grados: los valores más bajo de la suma ponderada de los pixeles 3, 4 y 5

corresponden al grado de susceptibilidad Bajo, mientras que los valores de los pixeles 6, 7 y 8 corresponden al grado de susceptibilidad Medio, finalmente los valores de los pixeles 9, 10 y 11 corresponden al grado de susceptibilidad Alto. Cabe mencionar que los tamaños de los pixeles son de 100m.

Para interpretar los resultados del mapa se estableció el grado de susceptibilidad a la lixiviación asignando un valor:

Suma ponderada de los pixeles	Grado de susceptibilidad a la lixiviación	Simbología en el mapa
3, 4, 5	Bajo	Verde
6, 7, 8	Medio	Amarillo
9, 10, 11	Alto	Rojo

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Suelos Agrícolas de la Cuenca del Río Grande de Comitán.

Los principales suelos agrícolas de la Cuenca del Río Grande de Comitán y la superficie que ocupan: Leptosol (175, 937ha), Luvisol (38,033ha), Vertisol (33,817ha), Chernozem (8,723ha) y Feozem (29,899ha), ver figura 19. Los suelos bajo actividad agrícola con mayor extensión son los Leptosoles, estos suelos se encuentran principalmente en las zonas elevadas y cerca de los límites de la cuenca. Después de los Leptosoles, los Luvisoles, Vertisoles y Feozems son los que predominan en la Cuenca. Los Chernozem son los suelos agrícolas con menor extensión. La asociación entre Vertisol, Feozem y Chernozem se encuentran ubicados en el centro de la Cuenca mientras que los Luvisoles se observan en las orillas al igual que los Leptosoles.

La zona agrícola más importante para el cultivo de jitomate está localizada al centro de la subcuenca (puntos rojos en la figura 20), donde se ubican los suelos más profundos, principalmente cerca de los municipios El Triunfo y La Independencia, por dicha razón el muestreo de suelos bajo el cultivo de jitomate se enfocó en esta zona. El maíz, por otro lado, tiene una extensión más homogénea en toda la subcuenca debido a su fácil desarrollo en los distintos suelos y bajo diversas condiciones. Como se observa en la figura 20, la zona con mayor actividad agrícola se encuentra dentro de la subcuenca, es importante mencionar que además existen pequeños manchones fuera de ésta.

En la tabla 4 se muestran las propiedades y generalidades de los principales grupos de suelos agrícolas de la subcuenca, de acuerdo con el trabajo de [Martínez \(2015\)](#) y la [WRB \(2007\)](#), la mayoría de los suelos presentan altos contenidos de arcilla, los más ricos en materia orgánica son los Chernozem y Feozem, mientras que la conductividad hidráulica es menor para los suelos Vertisol y Luvisol por la textura arcillosa que resulta en el predominio de poros de menor tamaño respecto a los otros suelos. El suelo con mayor percolación es el Leptosol debido a la pedregosidad que favorece el paso del agua. El Vertisol, Feozem y Chernozem a diferencia del resto de los suelos tienen una gran cantidad de nutrientes que permiten el adecuado crecimiento de los cultivos

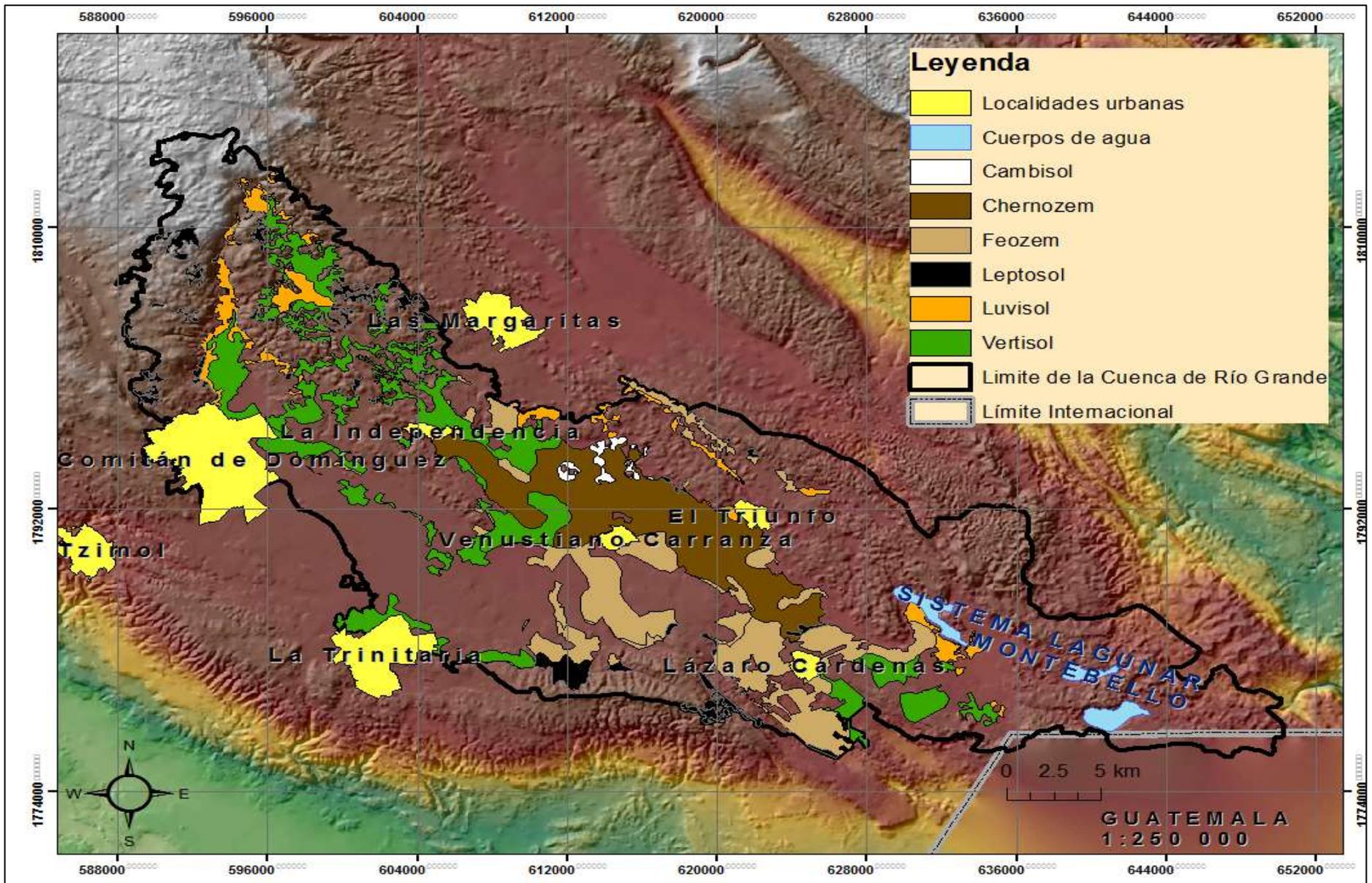


Figura 19. Mapa de suelos agrícolas escala 1:250 000. Se muestran los principales suelos bajo la actividad agrícola.

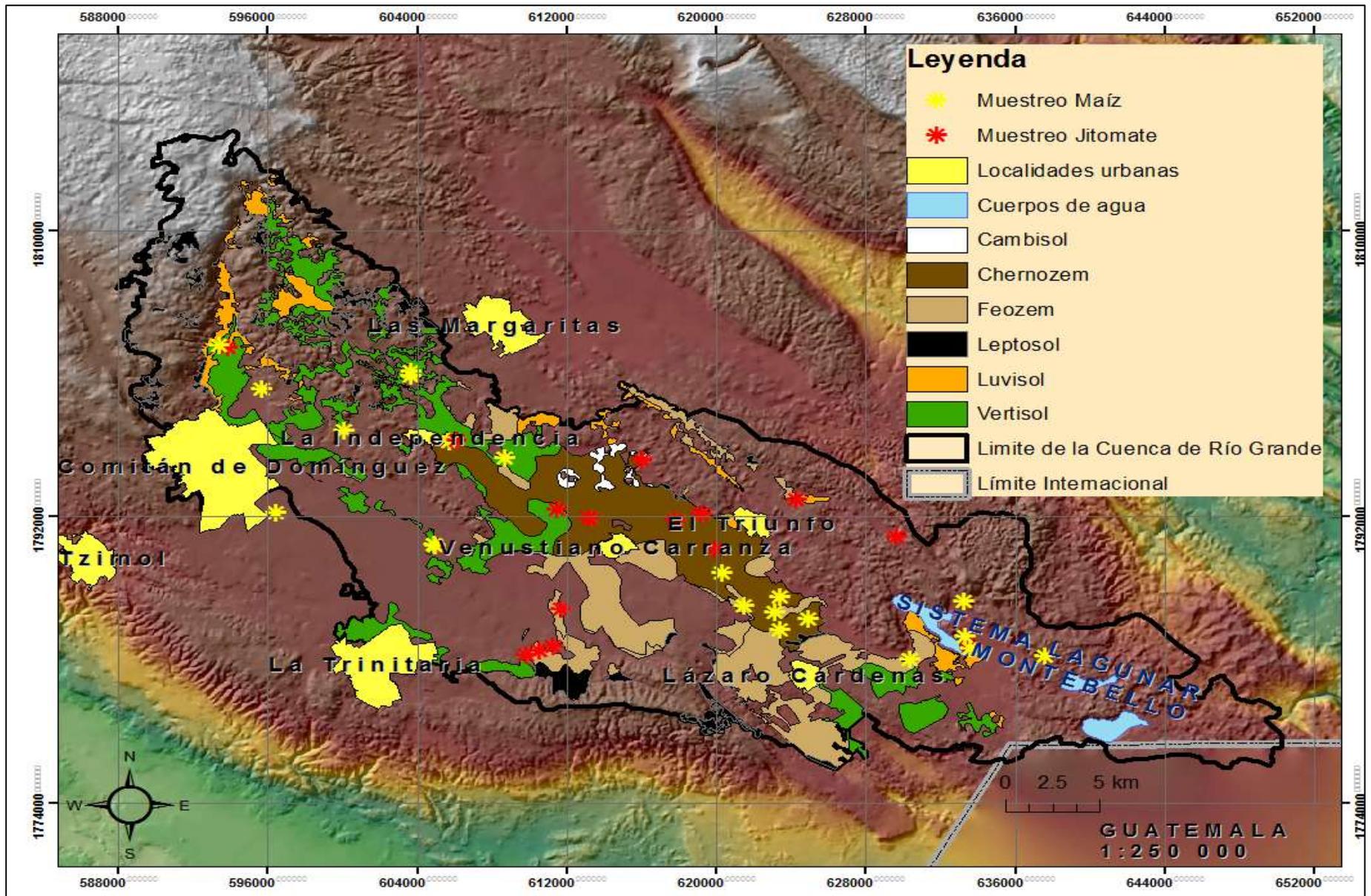


Figura 20. Puntos de muestreo de las muestras compuestas para el cultivo de maíz y jitomate en los (Mapa de suelos agrícolas escala 1:250 000).

Tabla 4. Propiedades seleccionadas de los principales suelos agrícolas de la Cuenca del Río Grande de Comitán (WRB, 2007; Martínez, 2015).

SUELO	DESCRIPCIÓN	pH	CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA	TEXTURA	ESTRUCTURA	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA
Leptosol	Suelos poco profundos, pedregosos	Ligeramente ácido a alcalino (6.4-7.0)	Medio	Limo-Arcillosa	Bloques Subangulares	Alta
Vertisol	Suelos con arcillas expandibles	Ligeramente ácido (5.2-5.6)	Medio	Arcillosa	Subangulares y angulares Formación de Grietas	Baja
Chernozem	Suelos oscuros provenientes del sedimento eólico y eólicos re trabajados Acumulan materia orgánica y alta saturación de bases	Ligeramente alcalino (7.0-8.0)	Alto	Franco-Limosa	Subangulares	Media
Feozem	Suelos medianamente profundos Acumulan materia orgánica y mayor lixiviación	Ligeramente alcalinos (7.0-7.8)	Alto	Franco-Limosa y Arcillosas	Bloques Subangulares	Moderada
Luvisol	Suelos con bajo contenido de arcilla en la superficie y uno mayor en el subsuelo (arcillas con alta actividad) alta saturación en bases a ciertas profundidades.	Ligeramente alcalino (7.0-8.0)	Alto	Arcillosa	Subangulares y angulares	Baja

7.2 Fertilizantes nitrogenados: dosis y compuestos aplicados en las parcelas agrícolas bajo cultivo de maíz y jitomate en los diferentes tipos de suelo.

Durante el trabajo de campo, se realizaron entrevistas a los agricultores de la región, para conocer las prácticas agrícolas entre las que se incluye el tipo de fertilizantes y las dosis aplicadas (ver anexo 6).

La tabla 5 muestra la información referente a los agroquímicos, nombre comercial y principio activo, utilizados en la región.

Tabla 5. Registro de agroquímicos utilizados en la Cuenca del Río Grande de Comitán.

NOMBRE COMERCIAL	PRINCIPIO ACTIVO
UREA (46-00-00)	46% nitrógeno ureico
FOSFATO DIAMONICO (18-46-00)	18% nitrógeno amoniacal; Fósforo asimilable (P ₂ O ₅)
NPK	5% Nitrógeno, fósforo (P ₂ O ₅), potasio (K ₂ O)
TRIPLE 18	18% Nitrógeno (NH ₃), 18% fósforo (P ₂ O ₅), 18% potasio (K ₂ O), 1% magnesio (MgO), 400ppm hierro (Fe), 100ppm cobre (Cu)
PHYTO GROW	11% Nitrógeno total (N), 3.84% nitrógeno ureico (N), 7.16% nitrógeno amoniacal, 28% fósforo (P ₂ O ₅), 2% ácido policarboxílico, 2% polisacáridos, 0.30% ácido húmico, 40ppm auxinas.
ULTRASOL 15-30-15	15% Nitrógeno, 30% fósforo (P ₂ O ₅), 15% potasio (K ₂ O), 1% magnesio, 500ppm boro (B), 1000ppm zinc (Zn).
ULTRASOL TOMATE	15% Nitrógeno total (N), 9.1% nitrógeno nítrico, 5.9% nitrógeno amoniacal, 9% fósforo (P ₂ O ₅), 26% óxido de potasio (K ₂ O)
ULTRASOL MAGNIT	11% Nitrógeno total, 16% óxido de magnesio (MgO)
NITRATO DE CALCIO	15% nitrógeno total, 15% nitrógeno nítrico, 26% de Calcio (CaO)
PHYTO GIB	26% Nitrógeno Total, 15% Potasio (K ₂ O), 2% Zinc
SPEEDFOL STARTER	9% Nitrógeno total, 45% fósforo (P ₂ O ₅), 15% Potasio (K ₂ O), 0.5% óxido de magnesio (MgO), 0.05% Hierro (Fe), 0.01% manganeso (Mn), 0.01% zinc, 0.01% boro (B), 0.01% cobre (Cu), 0.01% molibdeno (Mo)
TRIPLE 16	16% Nitrógeno total, 6% nitrógeno nítrico, 10% nitrógeno amoniacal, 16% fósforo (P ₂ O ₅), 16% Potasio (K ₂ O), 3.4% calcio total (CaO),
NITROFOSKA	12% Nitrógeno (N), 12% fósforo (P ₂ O ₅), 17% Potasio (K ₂ O), 2% óxido de magnesio (MgO), 0.01% zinc, 0.02% boro (B), 20% sulfitos (SO ₃)
ULTRASOL 18	18% nitrógeno nítrico, 18% fósforo (P ₂ O ₅), 18% Potasio (K ₂ O), 1% óxido de magnesio (MgO), 400ppm Hierro (Fe), 100ppm Cobre (Cu)
ULTRASOL NKS	12% Nitrógeno total, nítrico 12%; potasio 45%; azufre 1.2% (S)
ULTRASOL MAP	12% Nitrógeno total, 12% nitrógeno amoniacal, pentóxido de fósforo (P ₂ O ₅), 26.6% fósforo (P).

En las entrevistas se detectó una diversidad de fertilizantes utilizados para el cultivo de jitomate, así como una variación en la dosis de aplicación, esta variación está en función de si el agricultor recibió o no asesoría por parte de autoridades o servicios externos.

En el sitio estudiado, la aplicación de fertilizantes nitrogenados se hace de forma y cantidad diferente en los cultivos de maíz y de jitomate, así como en cada uno de los suelos estudiados. Lo anterior debido a que la aplicación de fertilizantes nitrogenados tiene el propósito de complementar el aporte de nitrógeno del suelo para satisfacer la demanda del cultivo, de este modo, en cada tipo de suelo, y para cada uno de los dos cultivos, se presume un aporte/necesidad diferente. La tabla 6 muestra las dosis de fertilizantes nitrogenados aplicados en cada una de las parcelas evaluadas en el cultivo de maíz y la tabla 7 en el cultivo de jitomate, según información de los agricultores de la región.

Tabla 6. Fertilizantes nitrogenados aplicados al cultivo de maíz durante un ciclo, en cada parcela estudiada. Información proporcionada por el agricultor.

<i>Tipo de suelo</i>	Sitio	Fertilizantes que aplican	Fertilizantes aplicados durante el ciclo del cultivo (kg)	Nitrógeno que ingresa (kg)	Superficie real de la parcela (m²)	N kg/ha	
<i>Leptosol</i>	LOS RIEGOS	UREA	200	92	5000	184	
	SAN MIGUEL TINAYAB	UREA	200	92	7500	122.7	
	1RO DE MAYO	UREA	100	46	2500	214	
		NPK	50	7.5			
	CHINCULTIC	UREA	150	69	5000	192	
		18-46-00	150	27			
<i>Feozem</i>	SAN RAFAEL	UREA	400	184	40000	59.5	
		18-46-00	300	54			
	PROVENIR AGRARISTA	UREA	250	115	10000	142	
		18-46-00	150	27			
	BUENAVISTA	UREA	100	46	5000	110	
		TRIPLE 18	50	9			
	LA INDEPENDENCIA	UREA	50	23	2500	128	
		18-46-00	50	9			
	<i>Chernozem</i>	CHICHIMA	UREA	300	138	7500	208
			18-46-00	100	18		
LA ESPERANZA 1		UREA	200	92	10000	110	
		TRIPLE 18	100	18			
LA ESPERANZA 2		UREA	200	92	10000	110	
		TRIPLE 18	100	18			
LA ESPERANZA 3		UREA	100	46	2500	256	
		18-46-00	100	18			
<i>Vertisol</i>	LA ESPERANZA	UREA	200	92	10000	110	
		TRIPLE 18	100	18			
	LOS RIEGOS 1	UREA	100	46	5000	110	
		18-46-00	50	9			
	OJO DE AGUA	UREA	100	46	10000	55	
		TRIPLE 18	50	9			
	LOS RIEGOS 2	UREA	250	115	10000	115	
	<i>Luvisol</i>	1RO DE MAYO	UREA	1000	460	7500	613.3
ANTELA		UREA	200	92	10000	101	
		18-46-00	50	9			
OJO DE AGUA 1		UREA	125	57.5	2500	320	
		TRIPLE 18	125	22.5			
OJO DE AGUA 2		UREA	300	138	2500	216	

Tabla 7. Fertilizantes nitrogenados aplicados al cultivo de jitomate durante un ciclo, en cada parcela estudiada. Información proporcionada por el agricultor.

<i>Tipo de suelo</i>	Sitio	Fertilizante que aplican	Fertilizantes aplicados durante el ciclo del cultivo (kg)	Nitrógeno que ingresa (kg)	Superficie real de la parcela (m²)	N kg/ha
<i>Feozem</i>	DIVISORIA	TRIPLE 18	150	27	2500	115.2
		NKS	15	1.8		
	EL TRIUNFO	ULTRASOL TOMATE	45	6.8	2500	27
	PORVENIR AGRARISTA	UREA	150	69	2500	384
		18-46-00	150	27		
	SANTA RITA "EL CAMARON"	TRIPLE 18	25	4.5	2500	22.8
NKS		10	1.2			
<i>Chernozem</i>	LA INDEPENDENCIA 1	TRIPLE 18	48	8.6	2500	41.8
		NKS	15	1.8		
	EL TRIUNFO	ULTRASOL TOMATE	150	22.5	2500	306
		TRIPLE 18	150	27		
		NKS	75	9		
		ULTRASOL MAP	150	18		
	LA INDEPENDENCIA 2	UREA	48	22.1	2500	88.3
EL PRADO	18-46-00	500	90	2500	360	
<i>Vertisol</i>	CINTA EL ENCUENTRO 1	TRIPLE 16	562	89.9	5000	179.8
	CINTA EL ENCUENTRO 2	TRIPLE 16	55	8.8	5000	229.9
		TRIPLE 18	33	5.9		
		NITROFOKCA	275	44.6		
		UREA	121	55.7		
	EL TRIUNFO	ULTRASOL TOMATE	36	5.4	2500	21.6
	SANTA RITA	18-46-00	60	10.8	2500	86.4
TRIPLE 18		60	10.8			
<i>Luvisol</i>	EL TRIUNFO	TRIPLE 18	72	12.9	2500	95.0
		ULTRASOL TOMATE	72	10.8		
	LA PATRIA	TRIPLE 18	80	14.4	2500	105.6
		ULTRASOL TOMATE	80	12		
	EL NARANJO	18-46-00	90	16.2	2500	984.8
		UREA	500	230		
SANTA RITA	18-46-00	60	10.8	1250	172.8	
	TRIPLE 18	60	10.8			

De forma general se observa que el uso de fertilizantes para el cultivo de maíz es más homogéneo que para el cultivo de jitomate, así mismo el nitrógeno que ingresa (N kg/ha) a las parcelas por tipo de suelo en el cultivo de maíz también es más homogéneo con respecto a los de jitomate, en este último es más evidente la variación del nitrógeno que ingresa (N kg/ha) en las parcelas por tipo de suelo.

Utilizando los datos de las tablas anteriores (ver tabla 6 y 7), y considerando la forma en que se encuentra el nitrógeno en cada uno de los fertilizantes utilizados, se obtuvo un valor promedio, desviación estándar y el coeficiente de variación de la dosis de nitrógeno total aplicada en cada tipo de suelo para cada tipo de cultivo, así como un valor promedio de la forma en que se encuentra el elemento: amonio, nitrato y urea (Tabla 8 para el maíz y tabla 9 para el jitomate). Los valores promedios y la desviación estándar de dosis por tipo de suelo y tipo de cultivo para el cultivo de maíz y para el cultivo de jitomate, se muestran en forma de gráfico en las Figura 21, 22 y 23.

Tabla 8. Valores promedio de la dosis de nitrógeno empleada (kg/ha) de nitrógeno en forma de urea, nitrato y amonio, en el cultivo de maíz.

<i>Tipo de suelo</i>	Media Urea (kg/ha)	Media Nitrato (kg/ha)	Media Amonio (kg/ha)	Media NTotal (kg/ha)	DESVEST NTotal (kg/ha)	%CV NTotal (kg/ha)
<i>Luvisol</i>	372	23	2	397	234	59.0
<i>Vertisol</i>	86	7	5	98	28	29.2
<i>Chernozem</i>	138	9	24	171	73	42.7
<i>Feozem</i>	86	5	19	110	36	32.8
<i>Leptosol</i>	158	0	20	178	39	22.0

En los suelos bajo cultivo de maíz, el mayor ingreso de nitrógeno total (397 kg/ha) ocurre en los suelos de tipo Luvisol, en los Feozem y Vertisoles (110kg/ha y 98kg/ha) ocurre el menor ingreso de nitrógeno total, mientras que en los Leptosoles y Chernozem el ingreso de nitrógeno total es muy similar (178kg/ha y 171kg/ha). Por otra parte, la urea es la forma de nitrógeno que más ingresa al cultivo de maíz en comparación del nitrato y amonio. El mayor ingreso de urea, en los suelos bajo cultivo de maíz, se reportó en los suelos de tipo Luvisol (372kg/ha), seguido de los Leptosoles (158kg/ha), los Chernozem (138kg/ha), los valores más bajos de ingreso de urea se registran para los suelos de tipo Vertisol y Feozem con 86kg/ha. Por otra parte, el mayor ingreso de amonio se registró en los suelos tipo Chernozem (24kg/ha), Leptosol (20kg/ha) y Feozem (19kg/ha), en los suelos de tipo Vertisol y Luvisol el ingreso de amonio es mínimo entre 2 a 5 kg/ha. El ingreso de nitrato, en comparación con el amonio y la urea es muy bajo, los suelos de tipo Luvisol presentan un ingreso de 23kg/ha, mientras que en el resto de ellos ingresa entre 0-9kg/ha (ver tabla 8).

En la tabla también se reporta la desviación estándar y el coeficiente de variación del ingreso de nitrógeno total, donde se observa que la mayor variación ocurre en los suelos de tipo Luvisol, en comparación con el resto (ver figura 21).

Tabla 9. Valores promedio de la dosis de nitrógeno empleada (kg/ha) de nitrógeno en forma de urea, nitrato y amonio, en el cultivo de jitomate.

<i>Tipo de suelo</i>	Media Urea (kg/ha)	Media Nitrato (kg/ha)	Media Amonio (kg/ha)	Media NTotal (kg/ha)	DESEST NTotal (kg/ha)	CV NTotal (kg/ha)
<i>Luvisol</i>	230	63	47	340	432	127.1
<i>Vertisol</i>	28	45	51	124	85	69.1
<i>Chernozem</i>	22	76	99	198	156	79.0
<i>Feozem</i>	69	39	30	137	170	123.8

En los suelos bajo cultivo de jitomate, la mayor aplicación de nitrógeno total ocurre en los Luvisoles (340kg/ha), seguido de los Feozem (198kg/ha), mientras que el ingreso de nitrógeno total en los Feozem y Vertisoles es muy parecido (137kg/ha y 124kg/ha) (ver tabla 9). En los suelos de tipo Luvisol se reporta el mayor ingreso de urea (230kg/ha), seguido de los Feozem con 69kg/ha, mientras que en los suelos de tipo Vertisol y Chernozem el ingreso de urea es muy similar (28kg/ha y 22kg/ha) y en ellos se reportan los valores más bajos, sin embargo, en estos últimos el amonio y nitrato son la forma de nitrógeno que más ingresa en ellos (ver tabla 9).

En la tabla 9 se observa también que en el cultivo de jitomate las formas de nitrógeno que predominan son los nitratos y amonios, a excepción de los suelos tipo Luvisol donde el valor de la urea sobresale.

En la tabla también se reporta la desviación estándar y el coeficiente de variación del ingreso de nitrógeno total, la mayor variación del nitrógeno que ingresa ocurre en los suelos de tipo Luvisol, Feozem y Chernozem, mientras que dicha variación es menor en los suelos de tipo Vertisol (ver figura 21).

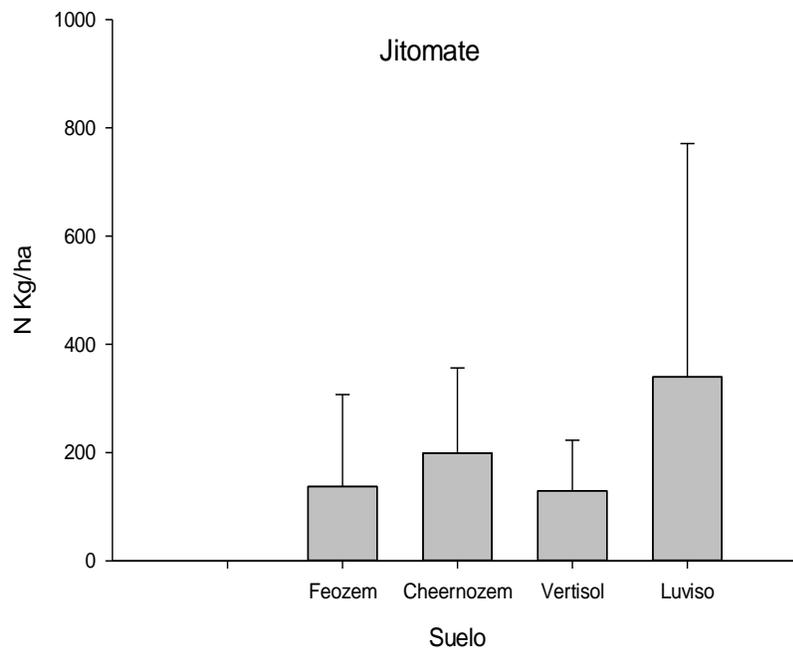
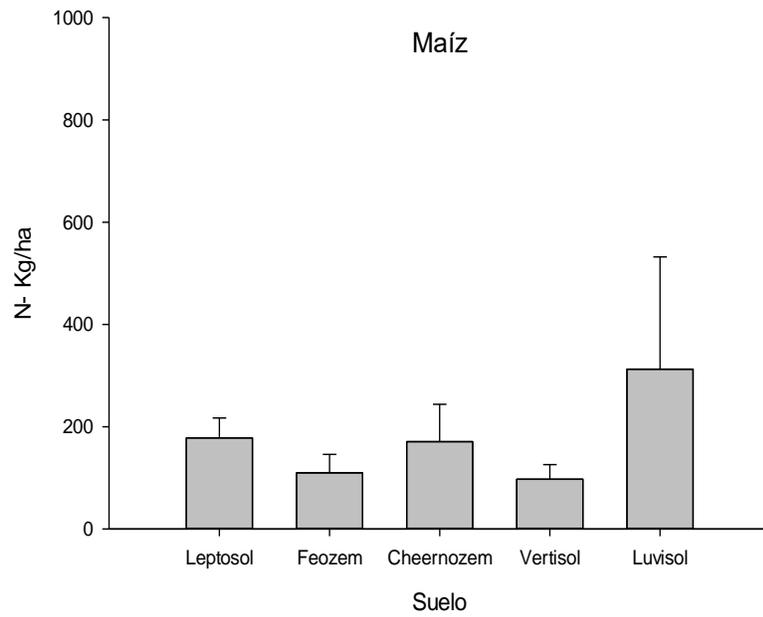


Figura 21. Cantidad promedio y desviación estándar de Ntotal que se adiciona al suelo en los cultivos de maíz y jitomate.

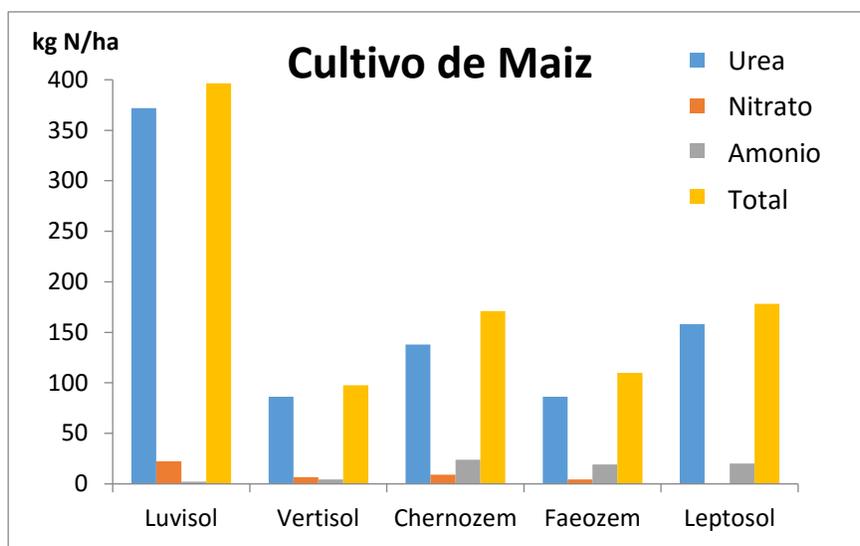


Figura 22. Dosis media de nitrógeno total y nitrógeno en forma de urea, nitrato y amonio aplicados en el cultivo de maíz.

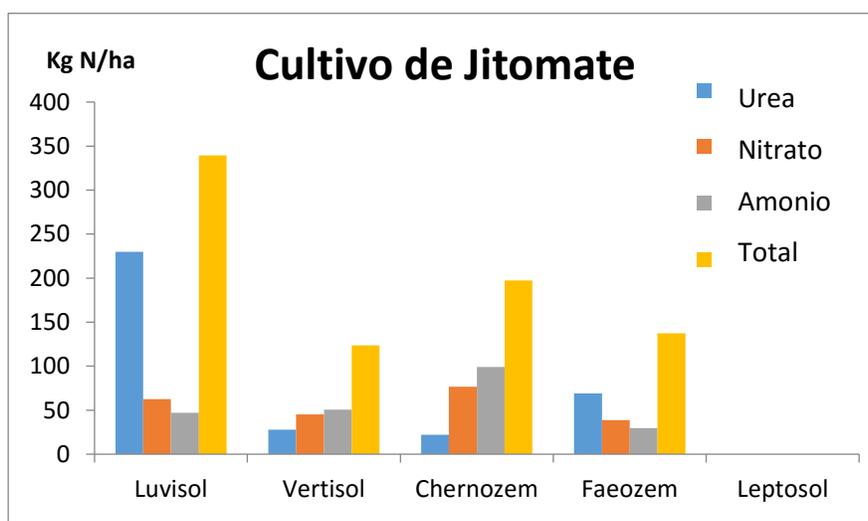


Figura 23. Dosis media de nitrógeno total y nitrógeno en forma de urea, nitrato y amonio aplicados en el cultivo de jitomate.

Comparando los gráficos 22 y 23 se observa que la mayor aplicación de nitrógeno es en forma de urea, principalmente en los suelos de tipo Luvisol, Leptosol y Feozem, tanto en el cultivo de maíz como de jitomate. Sin embargo, en los suelos de tipo Chernozem y Vertisol las principales formas de nitrógeno que ingresan son amonio y nitratos.

Las principales formas de nitrógeno utilizadas en los fertilizantes para la agricultura son urea, nitrato y amonio. Una de las razones por las cuales predomina el uso la urea como fertilizante nitrogenado en estos cultivos es porque es la fuente de nitrógeno con más alta concentración y es un fertilizante

económico. Además el transporte de solutos a través de las células vegetales ocurre por la bomba de protones que proporciona la energía, dicha bomba de protones es responsable de la carga negativa en el interior de la célula por lo que los cultivos absorben el nitrógeno preferentemente en las formas de urea y amonio por la facilidad que tienen en permear la barrera, y por lo tanto los nitratos prevalecen en los suelos al no ser absorbidos preferentemente por las plantas. Es decir la urea se hidroliza en amonio y amoniaco, dejando a los nitratos en el suelo disponibles para ser movilizados por el agua, cuando estos no llegan a ser absorbidos por los cultivos (Campbell, 2005).

La información colectada alrededor de las dosis de fertilizante, muestra que los suelos de tipo Luvisol; Chernozem y Leptosol bajo el cultivo de maíz son los que mayor aporte de Nitrógeno reciben, mientras que para el jitomate el mayor aporte está en los suelos de tipo Luvisol y Chernozem.

En ambos cultivos el ingreso más alto de fertilizantes ocurre en los Luvisoles, lo cual se explica a través de las propiedades de estos tipos de suelos, ya que no son suelos tan fértiles en comparación con los Feozems, Vertisoles y Chernozem por lo tanto requieren de una mayor administración de nutrientes para el buen desarrollo de los cultivos. Sin embargo es importante resaltar que la desviación estándar en el ingreso de nitrógeno tanto para el cultivo de jitomate y maíz que se desarrollan sobre suelos de tipo Luvisol es alta, esto nos indica que la aplicación de nitrógeno para estas parcelas por tipo de cultivo no es homogénea.

Fertilizantes nitrogenados aplicados al cultivo de jitomate durante un ciclo, en cada parcela estudiada. Información proporcionada por el agricultor.

Con base en la información sobre la dosis de fertilizantes proporcionada por los agricultores de las diferentes parcelas evaluadas (ver tabla 6), es posible observar que, en el caso del cultivo de maíz, la parcela “1ro de Mayo” con suelo tipo Luvisol tiene un ingreso de 613.33 kg/ha de nitrógeno, dicho ingreso es mayor que el resto de las parcelas que se desarrollan sobre este tipo de suelo y que a su vez explicaría que la desviación estándar obtenida es alta. En el caso del jitomate, la parcela “El Naranjo” con suelo tipo Luvisol tiene un ingreso de 984.8kg/ha de nitrógeno, dicho valor es superior al compararlo con el ingreso de las demás parcelas que se desarrollan sobre Luvisoles, de igual forma que el maíz esto explica la desviación alta que se tiene en los suelos de tipo Luvisol bajo el cultivo de jitomate (ver tabla 7).

Por otra parte en los Vertisoles tanto para el cultivo de maíz y jitomate el ingreso de nitrógeno es menor, estos suelos se caracterizan por tener alto potencial agrícola, mientras que la disponibilidad de nutrientes se describe como buena, por dicha razón son suelos que requieren de una administración menor de fertilizantes.

De acuerdo con la figura 21 las dosis medias aplicadas en los suelos con cultivo de maíz tienen desviaciones estándar mucho menores que las observadas en los suelos que tiene de jitomate, este resultado puede deberse a la homogeneidad en el uso de fertilizantes para el cultivo de maíz en comparación con el jitomate. Los agricultores de la zona reciben asesoría para el uso de fertilizantes en el cultivo de jitomate, sin embargo no todos ellos tienen la posibilidad de contratar este servicio, por dicha razón la variabilidad en la administración de fertilizantes es mayor para este cultivo. Por otra parte el cultivo de jitomate requiere de diversos cuidados para su desarrollo, como son cuidados en la temperatura, la luz, el riego y la disponibilidad de nutrientes, esta última depende de

las propiedades del suelo y la actividad microbiana que permite la disponibilidad de los nutrientes. El conjunto de factores mencionados puede explicar en parte la variación en la dosis y tipo de fertilizantes que se utilizan para el cultivo de jitomate, mientras que el maíz, sin embargo, no requiere de tantos cuidados y por consecuencia su demanda en los nutrientes no es tan alta en comparación con el de jitomate.

7.3 Análisis de las muestras compuestas: concentración de nitrógeno y Nitrógeno Residual del Suelo (NRS).

La aplicación en exceso de los fertilizantes nitrogenados (aplicar más de lo que la planta requiere), provoca la acumulación de nitrógeno en el suelo, al final del ciclo de cultivo. Tal y como se explicó en la metodología, se colectaron muestras compuestas de suelo, al final de los cultivos de maíz y jitomate, en varias parcelas de los diferentes tipos de suelo (La figura 20 muestra la localización de los sitios muestreados). Las muestras fueron analizadas para pH, conductividad eléctrica, carbono y nitrógeno total, nitrógeno en forma de amonio y en forma de nitrato. Para obtener el nitrógeno residual, se sumó la cantidad de nitrógeno como nitrato y amonio; llamamos nitrógeno residual al nitrógeno que permanece en el suelo después del ciclo de cultivo, es decir, es el nitrógeno que no utilizó la planta y que no fue lixiviado, pero que corre el riesgo de lixivarse posteriormente. Los resultados se muestran en la tabla 10 para el cultivo de maíz, y en la tabla 11 para el cultivo de jitomate.

Tabla 10. Características seleccionadas y concentración de C total y las diferentes formas de N en las muestras compuestas de suelo de las parcelas bajo los diferentes tipos de suelo, para el cultivo de maíz.

TIPO DE SUELO	SITIO DEL MUESTREO	PROFUNDIDAD de la capa cm	pH agua (1:2.5)	pH CaCl ₂ (1:2.5)	Conductividad eléctrica μ S	% Ctotal	% Ntotal	kg/ha NO ₃	kg/ha N- NO ₃	kg/ha NH ₄	kg/ha N-NH ₄	NRS kg/ha
CHERNOZEM	LA ESPERANZA 2	0-30	6.4	7.0	567.0	4.5	0.2	23.4	5.3	2.3	1.7	7.0
	LA ESPERANZA 2	30-60	7.2	6.7	405.0	6.1	0.1	19.1	4.3	2.6	2.0	6.3
	LA ESPERANZA 3	0-30	7.1	6.1	325.0	2.1	0.2	13.6	3.1	3.6	2.7	5.8
	LA ESPERANZA 3	30-60	7.0	5.9	263.0	1.7	0.2	11.4	2.6	4.4	3.3	5.9
	LA ESPERANZA 1	0-30	7.2	6.7	454.0	3.9	0.2	24.6	5.6	2.3	1.7	7.3
	LA ESPERANZA 1	30-60	7.4	6.8	455.0	3.8	0.2	17.9	4.0	2.6	2.0	6.0
LEPTOSOL	CHICHIMA	0-30	7.0	6.7	493.0	1.4	0.1	227.0	51.2	44.2	33.8	85.0
	1ro DE MAYO	0-30	7.6	6.9	581.0	8.4	0.3	57.0	12.9	4.6	3.5	16.4
	SAN MIGUEL TINAYAB	0-30	7.3	7.2	467.0	9.5	0.4	147.1	33.2	16.6	12.7	45.9
	CHINCULTIK ALTO	0-30	6.9	6.1	517.0	5.2	0.4	451.7	102.0	65.2	49.8	151.8
LUVISOL	LOS RIEGOS	0-30	7.7	7.12	398.0	8.6	0.3	101.4	22.9	46.8	35.7	58.6
	1ro DE MAYO	0-30	6.2	6.1	205.0	2.3	0.2	34.7	7.8	3.7	2.8	10.6
	1ro DE MAYO	30-60	6.7	6.2	239.0	1.9	0.1	33.1	7.5	5.4	4.1	11.6
	ANTELÁ	0-30	6.8	6.0	426.0	6.7	0.5	94.2	21.3	6.6	5.0	26.3
	OJO DE AGUA 2	0-30	5.4	4.0	36.9	3.4	0.2	102.3	23.1	124.7	95.2	118.3
	OJO DE AGUA 2	30-60	5.1	4.2	31.2.	1.2	0.1	122.6	27.7	37.2	28.4	56.1
VERTISOL	OJO DE AGUA 1	0-30	5.7	5.0	350.0	5.1	0.4	780.2	176.1	50.3	38.4	214.5
	OJO DE AGUA 1	30-60	5.0	4.2	236.0	1.6	0.2	113.6	25.7	50.6	38.7	64.3
	LOS RIEGOS 1	0-30	7.4	7.0	444.0	2.3	0.1	323.3	73.0	17.5	13.3	86.3
	LOS RIEGOS 1	30-60	7.7	7.2	481.0	2.3	0.1	184.9	41.7	56.8	43.3	85.1
	LA ESPERANZA	0-30	6.4	6.0	337.0	2.0	0.2	14.3	3.2	13.7	10.5	13.7
	LA ESPERANZA	30-60	7.2	6.5	682.0	1.3	0.1	10.1	2.3	3.4	2.6	4.9
	LOS RIEGOS 2	0-30	7.5	7.0	513.0	3.0	0.2	199.4	45.0	31.5	24.1	69.1
LOS RIEGOS 2	30-60	7.6	7.0	443.0	2.8	0.2	190.1	42.9	30.3	23.2	66.1	
FEOZEM	OJO DE AGUA, MC10	0-30	6.6	6.2	298.0	4.5	0.2	297.7	67.2	88.0	67.2	134.4
	SAN RAFAEL	0-30	6.2	5.0	721.0	1.4	0.1	9.8	2.2	3.6	2.8	5.0
	SAN RAFAEL	30-60	5.8	5.8	2705.0	0.9	0.1	10.1	2.3	4.4	3.4	5.7
	BUENA VISTA	0-30	7.9	6.7	354.0	1.9	0.1	17.5	4.0	3.3	2.5	6.5
	BUENA VISTA	30-60	7.9	6.7	408.0	3.9	0.1	17.2	3.9	4.1	3.1	7.0
	PORVENIR AGRATISTA	0-30	7.2	5.8	288.0	1.8	0.2	11.7	2.6	5.0	3.8	6.4
	PORVENIR AGRATISTA	30-60	6.8	5.7	275.0	1.3	0.1	12.0	2.7	5.7	4.3	7.1
	LA INDEPENDENCIA	0-30	7.3	7.0	584.0	4.4	0.2	501.3	113.2	20.0	15.2	128.4
LA INDEPENDENCIA	30-60	7.6	7.1	566.0	3.9	0.2	544.4	123.0	54.9	41.9	164.8	

NRS nitrógeno inorgánico residual, suma de N-NO₃, N-NH₄: extracción con KCl.
Ntotal, Ctotal: analizador elemental.

Tabla 11. Características de los suelos, concentración de C y N total, y las diferentes formas de N en las muestras compuestas de suelo de las parcelas bajo los diferentes tipos de suelo, para el cultivo de jitomate.

TIPO DE SUELO	SITIO DEL MUESTREO	PROFUNDIDAD DE CAPA (0-30) Y (30-60)	pH agua (1:2.5)	pH CaCl2 (1:2.5)	Conductividad eléctrica μS	% Ctotal	% Ntotal	kg/ha NO3	kg/ha N-NO3	kg/ha NH4	kg/ha N-NH4	NRS kg/ha
CHERNOZEM	LA INDEPENDENCIA 1	0-30	7.5	6.9	569.0	2.8	0.2	523.0	118.1	22.3	17.0	135.1
	LA INDEPENDENCIA 1	30-60	7.8	7.0	366.0	3.2	0.1	219.2	49.5	38.6	29.5	79.0
	EL TRIUNFO	0-30	6.0	6.0	353.0	1.7	0.1	20.8	4.7	4.6	3.5	8.2
	EL TRIUNFO	30-60	6.6	6.6	526.0	1.2	0.1	12.0	2.7	3.4	2.6	5.3
	LA INDEPENDENCIA 2	0-30	7.8	6.9	677.0	4.0	0.2	49.2	11.1	6.0	4.6	15.7
	LA INDEPENDENCIA 2	30-60	8.0	6.9	516.0	3.2	0.1	21.7	4.9	8.4	6.4	11.3
	EL PRADO; MC5	0-30	7.7	6.9	417.0	4.0	0.2	214.4	48.4	26.7	20.4	68.8
	EL PRADO; MC5	30-60	7.4	7.0	528.0	2.7	0.2	552.0	124.6	30.4	23.2	147.8
FEOZEM	DIVISORIA	0-30	6.1	6.1	401.0	0.9	0.1	36.6	8.3	5.8	4.5	12.7
	DIVISORIA	30-60	6.7	6.2	371.0	0.6	0.1	25.3	5.7	9.3	7.1	12.8
	SANTA RITA " EL CAMARON"	0-30	6.3	4.7	248.0	1.0	0.1	14.9	3.4	21.8	16.7	20.0
	SANTA RITA " EL CAMARON"	30-60	6.3	5.1	252.0	0.7	0.1	14.3	3.2	44.4	33.9	37.1
	PORVENIR AGRATISTA	0-30	6.6	6.2	1165.0	2.2	0.2	52.4	11.8	5.6	4.2	16.1
	PORVENIR AGRATISTA	30-60	7.2	6.4	819.0	1.5	0.1	252.0	56.9	4.1	3.1	60.0
	EL TRIUNFO	0-30	7.6	5.8	285.0	3.6	0.2	37.3	8.4	5.7	4.3	12.7
	EL TRIUNFO	30-60	6.9	6.3	335.0	2.8	0.2	30.8	6.9	11.9	9.1	16.1
LUVISOL	SANTA RITA	0-30	6.6	6.7	699.0	1.7	0.2	35.6	8.0	4.3	3.3	11.4
	SANTA RITA	30-60	7.1	6.8	633.0	1.3	0.1	39.2	8.8	4.1	3.1	12.0
	EL TRIUNFO	0-30	5.9	4.4	261.0	2.8	0.2	26.6	6.0	5.5	4.2	10.2
	EL TRIUNFO	30-60	5.9	5.1	281.0	2.3	0.2	14.6	3.3	6.0	4.6	7.9
	LA PATRIA	0-30	6.0	5.0	193.0	1.9	0.2	25.0	5.6	3.9	3.0	8.6
	LA PATRIA	30-60	6.2	5.3	186.0	1.6	0.2	13.6	3.1	24.4	18.7	21.7
	EL NARANJO	0-30	6.7	6.4	1094.0	5.8	0.3	161.8	36.5	5.4	4.1	40.7
	EL NARANJO	30-60	7.2	6.2	463.0	2.3	0.2	52.8	11.9	10.4	8.0	19.9

NRS nitrógeno inorgánico residual, suma de N-NO₃, N-NH₄; extracción con KCl.

Ntotal, Ctotal: analizador elemental.

TIPO DE SUELO	SITIO DEL MUESTREO	PROFUNDIAD DE CAPA (0-30) Y (30-60)	pH agua (1:2.5)	pH CaCl2 (1:2.5)	Conductividad eléctrica μS	% Ctotal	% Ntotal	kg/h ^a NO3	kg/ha N- NO3	kg/h ^a NH4	kg/ha N-NH4	NRS Kg/ha
VERTISOL	EL TRIUNFO	0-30	5.7	5.5	320.0	1.6	0.1	21.4	4.8	8.3	6.3	11.1
	EL TRIUNFO	30-60	6.9	6.7	699.0	1.1	0.1	14.3	3.2	5.8	4.4	7.7
	CINTA EL ENCUENTRO 1	0-30	6.9	6.3	754.0	2.0	0.2	37.3	8.4	5.7	4.3	12.8
	CINTA EL ENCUENTRO 1	30-60	7.3	6.5	646.0	1.1	0.1	20.8	4.7	4.3	3.3	7.9
	CINTA EL ENCUENTRO 2	0-30	7.3	6.5	1154.0	1.7	0.2	38.9	8.8	10.8	8.2	17.0
	CINTA EL ENCUENTRO 2	30-60	7.2	6.8	1286.0	1.1	0.1	20.1	4.5	5.3	4.0	8.6
	SANTA RITA	0-30	7.4	6.9	560.0	2.6	0.2	34.3	7.8	2.5	1.9	9.7
	SANTA RITA	30-60	6.7	6.9	541.0	2.3	0.2	31.4	7.1	2.8	2.1	9.2

NRS nitrógeno inorgánico residual, suma de N-NO₃, N-NH₄; extracción con KCl.
Ntotal, Ctotal: analizador elemental.

En la tabla 10 y 11 se muestran las propiedades de las muestras compuestas de las parcelas por tipo de suelo y por cultivo. El pH de la mayoría de los suelos está entre 5.5 a 7.5, son suelos con altos contenidos de sales desde 250 hasta más de 1000 μS .

En la columna de NRS los números en negritas resaltan aquellas parcelas donde la concentración es la capa subsuperficial (30-60cm) y la superficial (0-30cm) es igual o mayor, lo cual se interpreta como movilidad o lixiviación del NRS. En las parcelas bajo cultivo de maíz se observa principalmente la movilidad del NRS, ya que los valores (kg/ha) de la capa de 0-30cm y de 30-60cm son muy similares, por dicha razón no se puede hablar de un proceso de lixiviación como tal. Únicamente en la parcela “La Independencia” del suelo Feozem se hace evidente la lixiviación ya que en la capa de 30-60cm (164.8kg/ha) es mayor los kg/ha del NRS que en la 0-30cm (128.4kg/ha). En las parcelas que están sobre suelos de tipo Feozem en comparación a los otros es donde es más evidente dicha movilidad del NRS (ver tabla 10).

Para el caso de las parcelas bajo el cultivo de jitomate es más evidente la lixiviación del NRS, debido a que los kg/ha de NRS de la capa 30-60cm son mayores que los que están en la capa superficial de 0-30cm, tal es el caso de la parcela “El Prado” que está sobre suelo tipo Chernozem, las parcelas “El Provenir Agrarista, El Triunfo y Santa Rita El Camarón” que están sobre Feozems y “La Patria” sobre Luvisol. Por el contrario, en las parcelas “Santa Rita” que está sobre suelo tipo Vertisol, “Santa Rita” sobre Luvisol y “Divisoria” que está sobre suelo tipo Feozem únicamente se aprecia movilidad del NRS ya que los valores de ambas capas (0-30 y 30-60cm) son muy similares.

Con los datos de las tablas 10 y 11, se calcularon los valores promedio y la desviación estándar del nitrógeno total, nitrógeno en forma de amonio y nitrato, y el nitrógeno residual total, por tipo de suelo y tipo de cultivo, para el cultivo de maíz (ver tabla 12 y figura 24) y jitomate (ver tabla 13 y figura 25).

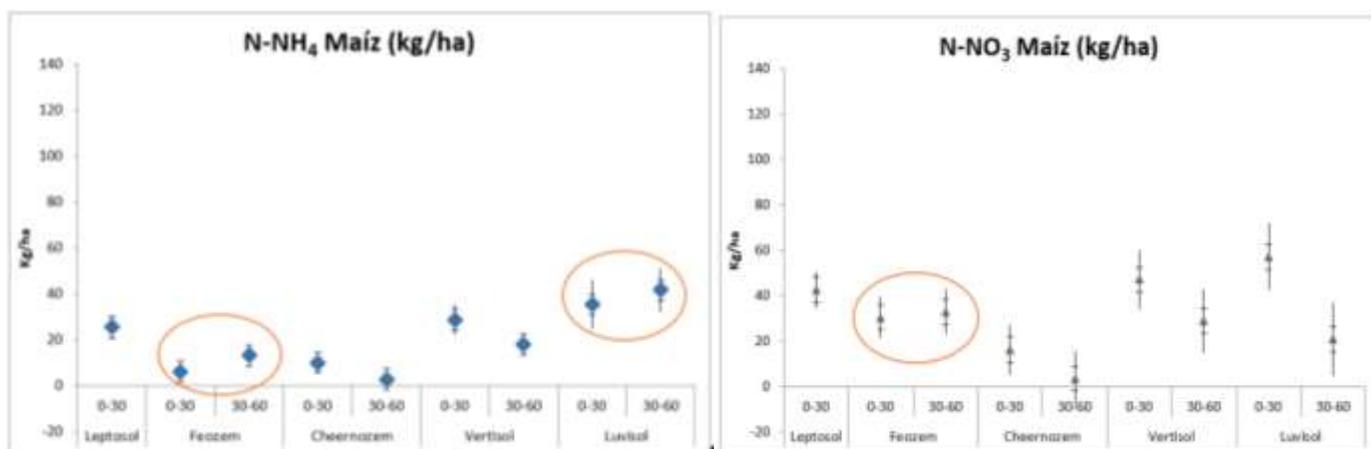


Figura 24. Concentración promedio y desviación estándar en nitrógeno en forma de nitrato y amonio en los diferentes tipos de suelo a la profundidad de 0-30cm y 30-60cm en el cultivo de maíz.

En la figura 24 se puede observar que en los suelos de tipo Feozem para el cultivo de maíz existe movilidad tanto del nitrógeno en forma de nitrato como de amonio de la capa superficial (0-30cm) a la subsuperficial (30-60cm). Por otro lado también en los suelos de tipo Luvisol se observa dicho comportamiento pero únicamente para el nitrógeno en forma de amonio.

Tabla 12. Concentración promedio y desviación estándar de las diferentes formas de N en las muestras compuestas de suelo de las parcelas bajo los diferentes tipos de suelo, en el cultivo de maíz en Kg/ha.

TIPO DE SUELO	NITRÓGENO TOTAL kg/ha		PROMEDIO N-NO3 (Kg/ha)		PROMEDIO N-NH4 (Kg/ha)		NRS Kg/ha	
	PROMEDIO	DESV	PROMEDIO	DESV	PROMEDIO	DESV	PROMEDIO	DESV
CHERNOZEM	4241	2944	16.3	21.5	10.0	15.9	26.3	39.1
LEPTOSOL	11466	7017.8	42.7	40.4	25.4	21.1	68.2	58.5
LUVISOL	7527	4381.8	57.1	79.7	35.4	43.1	92.4	94.2
VERTISOL	7605	827.3	47.1	31.6	28.8	26.3	75.9	49.8
FEOZEM	4609	2514.3	30.5	55.1	6.1	6.1	36.6	61.2

En los suelos bajo cultivo de maíz se encuentra en mayor cantidad nitrógeno en forma de nitrato que de amonio, tal como es el caso de los Luvisoles, Vertisoles y Leptosoles (57kg/ha, 47.1kg/ha, 42.7kg/ha), en los suelos de tipo Luvisol también se registra la mayor concentración de nitrógeno en forma de amonio, en consecuencia en estos suelos se reporta el valor más alto de NRS (92.4kg/ha) (ver tabla 12).

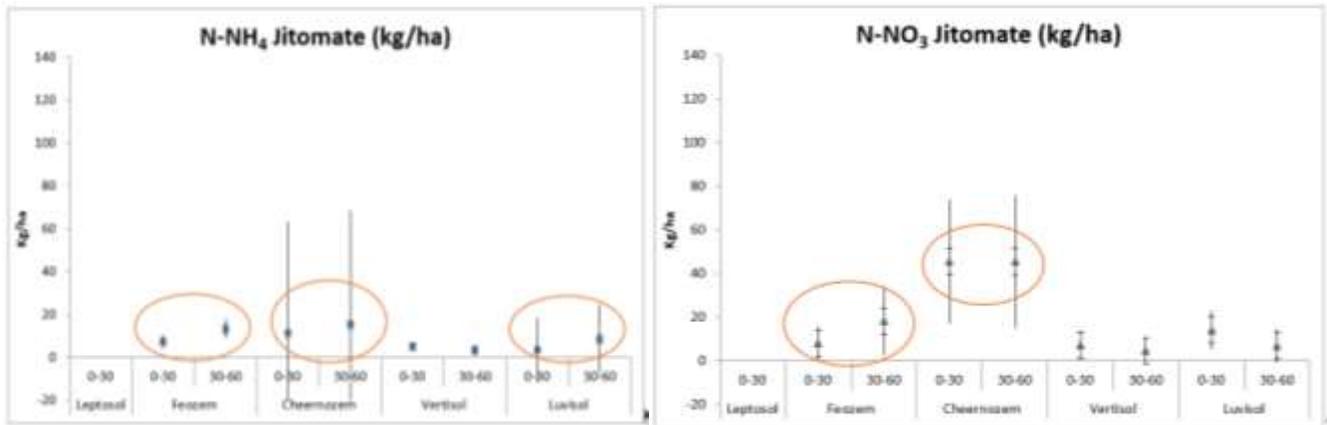


Figura 25. Concentración promedio y desviación estándar en nitrógeno en forma de nitrato y amonio en los diferentes tipos de suelo a la profundidad de 0-30cm y 30-60cm en el cultivo de jitomate.

En la figura 25 la movilidad relativa de nitrógeno en forma de amonio es evidente en los suelos de tipo Feozem, Chernozem y Luvisol, sin embargo la desviación de estos dos últimos es mayor lo que implica una variación entre la concentración en kg/ha de las parcelas muestreadas. No obstante la movilidad del nitrógeno en forma de nitrato es evidente en los suelos de tipo Feozem, mientras que en los de tipo Chernozem se observa que en la capa superficial (0-30cm) y subsuperficial (30-60cm) es muy similar la concentración promedio de nitrógeno en forma de nitrato, sin embargo, las desviaciones de ambas capas es alta lo que implica nuevamente una variación entre la concentración en kg/ha de las parcelas muestreadas.

Tabla 13. Concentración promedio y desviación estándar de las diferentes formas de N en las muestras compuestas de suelo de las parcelas bajo los diferentes tipos de suelo, en el cultivo de jitomate (Kg/ha)

TIPO DE SUELO	NITRÓGENO TOTAL kg/ha		PROMEDIO N-NO3 (Kg/ha)		PROMEDIO N-NH4 (Kg/ha)		NRS Kg/Ha	
	PROMEDIO	DESV	PROMEDIO	DESV	PROMEDIO	DESV	PROMEDIO	DESV
CHERNOZEM	4387.5	1561.1	45.7	52.0	11.4	8.6	56.9	135.1
FEOZEM	6045	1369.6	8.0	3.5	7.4	6.2	15.4	12.7
LUVISOL	7605	1601.2	14.0	15.0	3.7	0.6	17.7	11.4
VERTISOL	5785	1716.3	7.4	1.8	5.2	2.7	12.6	11.1

Los suelos con mayor contenido de nitrógeno en forma de nitrato son los Chernozem y los Luvisoles. Los Feozem, Luvisol y Vertisol tienen valores muy similares en el contenido de NRS, sin embargo la concentración más alta está en los suelos de tipo Luvisol (56.9kg/ha).

El mayor ingreso de nitrógeno total está en los Luvisoles (7605kg/ha) sin embargo la concentración de NRS que hay en ellos es baja (17.7kg/ha). Por otro lado en los suelos de tipo Chernozem está la concentración más alta de NRS (56.9kg/ha), y es en ellos donde el ingreso de nitrógeno es menor.

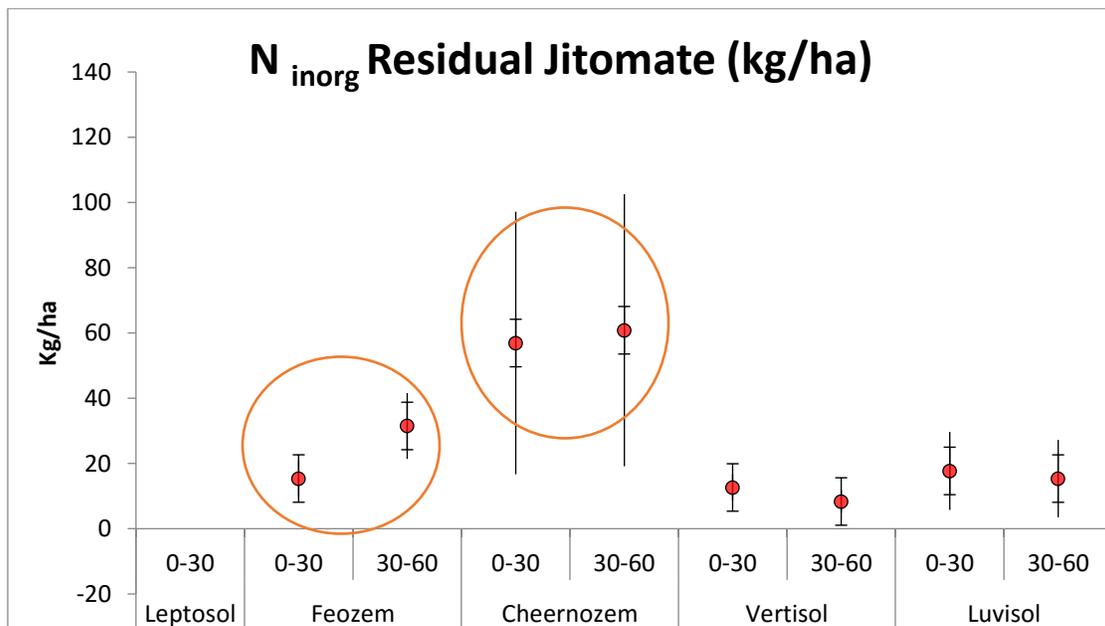
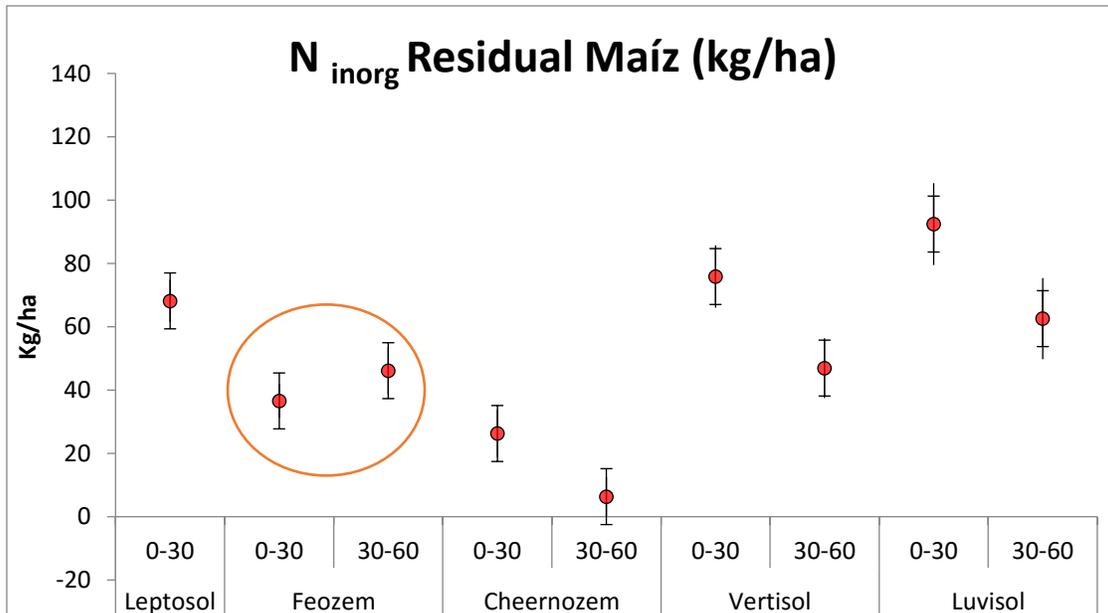


Figura 26. Concentración promedio y desviación estándar del NRS (nitrógeno residual del suelo) obtenido en las muestras compuestas de los diferentes tipo de suelo, a la profundidad de 0-30 cm y 30-60 en los cultivos de maíz y jitomate y por tipo de suelo.

En los suelos de tipo Feozem bajo cultivo de maíz se observa que el NRS en la capa subsuperficial 30-60cm es mayor que en la capa superficial 0-30cm, lo que indica que el NRS se está moviendo. En el resto de los suelos la concentración de NRS es mayor en la capa superficial, lo que significa que no hay movilidad de éste. La movilidad de NRS en los suelos bajo cultivo de jitomate es evidente en los suelos de tipo Feozem y Chernozem (ver figura 26), por otra parte también se aprecia que en los

suelos de tipo Vertisol y Luvisol la diferencia entre la concentración de la capa superficial (0-30cm) con respecto a la subsuperficial (30-60cm) es mínima, lo que podría indicar movilidad del NRS.

Si bien se tienen varias muestras de suelo por unidad de suelo, la variación tan alta (altas desviaciones estándar) nos indica que es necesario aumentar el número de parcelas muestreadas, sin embargo, debido a la extensión de la cuenca, es muy difícil y costoso tener mayor número de réplicas en cada unidad. Por lo tanto, la variabilidad presentada en las concentraciones reportadas en este trabajo es la esperada dado el número de parcelas evaluadas en la tesis.

Además, es importante considerar otra variable que se explica a continuación: el principal criterio del muestreo fue el tipo de suelo y tipo de cultivo, en este sentido las muestras cumplen estos requisitos, pero no cumplen otros criterios, como por ejemplo, el tipo de manejo. Esto se evidencia con las características químicas de las muestras del suelo (Tablas 10 y 11), en donde se observan diferencias en variables como pH y CE, las cuales definen parámetros de disponibilidad de nutrientes.

La movilidad y lixiviación del NRS que se observó en algunas parcelas de las tablas 10 y 11 se explica por el agua que ingresa al sistema, a través de la precipitación y por el riego por goteo cuando aplica, principalmente en el cultivo de jitomate. El riego por goteo implica que el ingreso del agua es constante y en consecuencia favorece la lixiviación del NRS, dada la textura arcillosa de los suelos de la región con el riego por goteo se genera un bulbo de humedad que favorece el flujo de agua y la movilidad del NRS. Por otro lado, en el cultivo de maíz el agua ingresa al suelo únicamente lo hace cuando hay precipitación, es decir, de forma intermitente y con intensidad variable. Así mismo también puede explicarse por los flujos preferenciales que surgen por las raíces de los cultivos y las grietas en superficie de los suelos arcillosos como en los Vertisoles.

Por otro parte en aquellos sitios donde no se observa movilidad y lixiviación, no obstante las altas dosis de fertilizantes, los altos contenidos de arcillas hacen que la movilidad del agua sea lenta y por consecuencia los iones son movidos y lixiviados de la misma forma en el sistema.

Los Leptosoles son suelos susceptibles a la lixiviación por dos factores, su poca profundidad y su ubicación, en párrafos anteriores se mencionó que estos suelos se ubican en los límites de la Cuenca y tienen pendientes elevadas. De este modo, la concentración de NRS obtenida será susceptible de perderse también por erosión. En este tipo de suelo no fue posible tomar muestras del estrato 30-60 debido a la poca profundidad que presentaron, razón por la cual no podemos evaluar la lixiviación.

Si bien es cierto que la urea, nitratos y amonios son las formas más comunes de nitrógeno que se utilizan en la agricultura, en este estudio se mostró que la urea es la principal forma de nitrógeno que ingresa tanto en el cultivo de maíz como en el jitomate. Sin embargo, ésta forma de nitrógeno no se encontró en el suelo y esto se debe a que cuando la urea ingresa al suelo sufre transformaciones a nitratos o amonios, es decir primero la urea se descompone o químicamente se hidroliza a amoniaco y CO_2 . Posteriormente puede ocurrir la amonificación donde el amoniaco se transforma, a través de bacterias amonificantes, en el ion amonio (NH_4^+) y este a su vez con ayuda de las bacterias nitrificantes en nitrato (nitrificación) (Porta, 2003).

Debido a que la urea se transforma en el suelo se utiliza la concentración de nitratos y amonio como indicadores. De este modo, la relación amonio/nitrato de cada una de las parcelas se utilizó como

indicador de si el proceso que ocurre en el suelo es la nitrificación o la mineralización, si el cociente es menor a la unidad indica que la forma de N dominante es el nitrato, se infiere entonces que el exceso de N se transformó a nitrato, de ahí que el proceso dominante es la nitrificación. En caso de que el cociente sea mayor a la unidad, se interpretará como que el proceso dominante es la mineralización. En este estudio los resultados de las parcelas por tipo de suelo y cultivo mostraron que el proceso que domina es la nitrificación (el cociente es menor a 1). Dicha situación representa un riesgo ambiental, pues el nitrógeno en forma de nitratos que proviene de los fertilizantes y de la transformación de la urea quedan libres en el suelo y si no son absorbidos por el cultivo son susceptibles a lixiviarse del sistema, ya que al tener carga negativa no son adsorbidos a los componentes del suelo (arcillas minerales).

En el proceso de nitrificación ocurren reacciones de oxidación que producen iones de hidrógeno, lo que ocasiona acidez al suelo (pH menores a 7) (Brady & Weil, 2008). Los nitratos son de fácil movilidad, por un lado, al tener carga negativa no compiten por los sitios de absorción con cationes como potasio, calcio y magnesio, pudiendo ser lixiviados, por lo tanto se esperaría tener poca concentración de ellos en el suelo. No obstante, en los resultados de las tablas 10 y 11 se observó lo contrario. Dicho resultado puede explicarse por el exceso en la fertilización de nitrógeno (en forma de urea o nitratos), que agrega más N al sistema de lo que requieren los cultivos, la subsecuente conversión a nitrato que se acumula en el suelo a una velocidad más alta de la que se mueve con el agua de riego, dejando un escenario con alta susceptibilidad de lixiviación de nitratos hacia el manto freático.

Finalmente al comparar los resultados de los kilogramos de NRS obtenidos por tipo de suelo y por cultivo con la información de Drury (2010), (ver clase de susceptibilidad en función del nitrógeno residual del suelo en método), la cantidad de nitrógeno que se encontró y cuantifico en el estudio representa un problema ambiental pues está expuesto a ser lixiviado, principalmente en los suelos donde se cultiva maíz, ya que la susceptibilidad es moderada y muy alta en comparación con los suelos donde se desarrolla el cultivo de jitomate, donde únicamente los suelos de tipo Chernozem son de grado muy alto con respecto a la susceptibilidad a ser lixiviados, el resto son de grado bajo:

TIPO DE SUELO	MAÍZ Promedio de NRS	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD (Drury, 2010)	JITOMATE Promedio de NRS	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD (Drury, 2010)
Chernozem	26.3	Moderado	56.9	Muy alto
Leptosol	68.2	Muy alto	n.a.	n.a.
Luvisol	92.4	Muy alto	17.7	Bajo
Vertisol	75.9	Muy alto	12.6	Bajo
Feozem	36.6	Alto	15.4	Bajo

Relacionando y comparando la información de campo, laboratorio y la de Drury (2010), se puede pensar que los suelos bajo el cultivo de maíz son los más susceptibles a ser lixiviados, ya que en ellos se reporta la mayor concentración de NRS. Sin embargo, la lixiviación es más importante y más evidente en el cultivo de jitomate (cuantificada ésta como la masa de N lixiviada respecto a la masa de N aplicada) (ver tablas 10, 11, 12 y 13, así como las figuras 24, 25 y 26).

7.4 Descripción de suelos.

LOS RIEGOS I

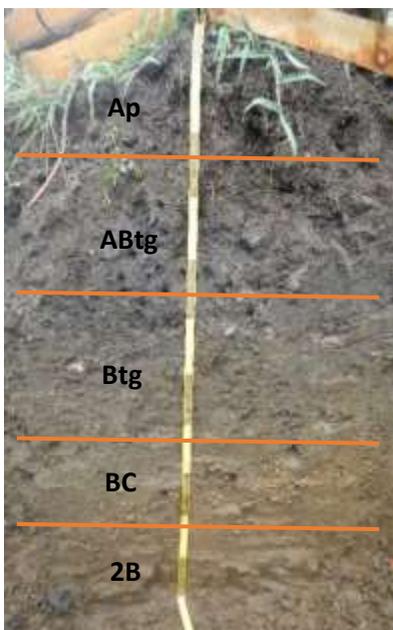


Figura 27 Fotografía del perfil en campo los Riegos I.

En la figura 27 se observa el perfil de los Riegos I, que de acuerdo con la WRB (2007) es un Feozemstágnicolúvico. Tiene una profundidad de 110cm, se cultiva sobre él Jitomate de riego por goteo. El primer horizonte está perturbado por la actividad agrícola, tienen un horizonte organomineral que acumula arcillas por iluviación, posteriormente tiene un horizonte mineral donde ocurre la mayor acumulación de arcillas. La penúltima capa es un horizonte de transición entre un horizonte mineral y uno no consolidado, se observa en la fotografía el cambio de coloración. La última capa es un segundo horizonte mineral donde ocurre acumulación de arcilla. Se observa en el penúltimo horizonte pedregosidad. A lo largo del perfil se observa un cambio en la colocación de pardo oscuro, pardo grisáceo a pardo claro.

En la tabla 14 se recopiló toda la información de las propiedades físicas de este perfil, la textura que predomina en todo el perfil es la arcillosa, existe muy poca variación en los valores de la densidad aparente y real a lo largo del perfil. Es un suelo poroso, principalmente por la presencia de poros finos derivados de la textura.

Tabla 14. Propiedades físicas del perfil LOS RIEGOS I.

Profundidad (cm)	Horizontes	Densidad real gr/cm ³	Densidad aparente gr/cm ³	VTP (%Vol)	Estabilidad de agregados	Textura
0-25/28	Ap	2.6	0.9	64.9	Baja-Moderada	ARCILLOSA
25/28-48	ABtg	2.7	0.9	64.5	Alta	ARCILLOSA
48-74	Btg	2.7	0.9	65.5	Moderada	ARCILLOSA
74-91	BC	2.8	1.1	60.3	Moderada	ARCILLOSA
91->110	2B	2.8	1.1	60.3	Baja	ARCILLOSA

Es un suelo con pH de medianamente básico y básico (Porta, 2003) en ambas soluciones (Agua y Cloruro de Calcio), lo cual indica que gran parte de los nutrientes se encuentran disponibles para las plantas, el pH aumenta conforme a la profundidad. La conductividad eléctrica es mayor en los primeros dos horizontes (763.0 y 576.5 uS/cm), debido a la administración de los fertilizantes, la cual es a través del sistema de riego por goteo. El contenido de carbonatos es mayor en el segundo horizonte y disminuye conforme a la profundidad. El primer horizonte es el más rico en materia orgánica. Tanto para el nitrógeno como para el fósforo sus valores disminuyen conforme a la profundidad, mientras que el primer horizonte alberga la mayor concentración de nitrógeno total y

de fósforo. El valor de fósforo más alto se observa en el primero horizonte con 43.2mg/kg, mientras que el de nitrógeno total es de 0.3%. De las cuatro principales bases intercambiables el calcio es la más abundante, seguido de magnesio, potasio y sodio. Todas las bases intercambiables presentan el mismo comportamiento que el nitrógeno y fósforo, disminuyen conforme a la profundidad (ver tabla 15).

Tabla 15. Propiedades químicas del perfil LOS RIEGOS I

Horizonte	Profundidad (cm)	pH		CE uS/cm	Ct %	CO ₃ %	M.org. %	Nt %	P dispOlsen mg/kg	Ca	Mg	K	Na	Bases Int*
		Agua	CaCl ₂							cmol/kg				
Ap	0-25/28	7.6	7.6	763.0	4.1	0	6.9	0.3	43.2	67.4	13.9	2.0	0	83.5
ABtg	25/28-48	7.8	7.6	576.5	2.4	0.5	3.1	0.1	2.8	50.2	23.4	1.9	0	75.7
Btg	48-74	7.9	7.7	485.5	1.8	0.3	2.6	0.1	1.4	35.9	30.9	3.1	0	70.1
BC	74-91	7.9	7.7	487.0	2.6	0.3	3.9	0.1	1.6	38.8	25.8	2.4	0	67.1
2B	91-110	8.1	7.8	357.5	3.6	0.3	5.6	0.1	0.6	43.7	22.4	2.2	0	68.4

* Bases intercambiables.

En la tabla 16 se observa el nitrógeno residual en este perfil es mayor en la superficie y disminuye con la profundidad hasta el tercer horizonte, posterior a este se observa un incremento nuevamente. Este comportamiento puede deberse a la cercanía que tiene el perfil con respecto al río, lo que provoca un ascenso capilar, dicho ascenso es resultado del alto contenido de arcillas en el perfil.

Tabla 16. Nitrógeno residual en el suelo (amonios y nitratos) del perfil LOS RIEGOS I

Horizonte	Profundidad (cm)	Kg/ha de N-NO ₃	Kg/ha de N-NH ₄	NRS kg/ha
Ap	0-25/28	15.6	2.7	18.3
ABtg	25/28-48	5.9	5.7	11.6
Btg	48-74	2.1	2.6	4.7
BC	74-91	4.3	2.7	6.9
2B	91-> 110	5.7	1.7	7.5

LOS RIEGOS II

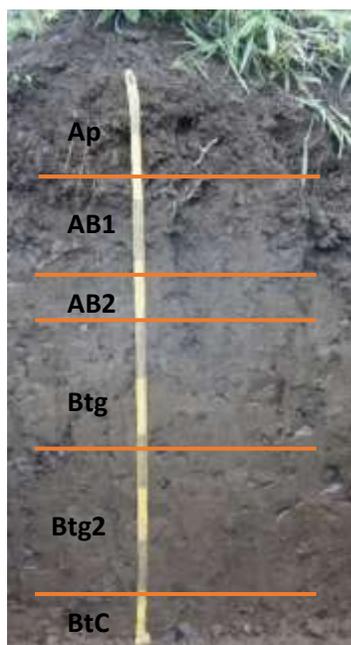


Figura 28 Fotografía del perfil en campo los Riegos II.

El perfil los Riegos II se diferencia del primero por no presentar pedregosidad en la base del perfil, el cambio de coloración es menor. Su primer horizonte está también perturbado por la actividad agrícola, tiene dos horizontes de transición AB, seguidos de dos horizontes de acumulación de arcillas (figura 28). Hay ligeras diferencias entre ambos perfiles, posiblemente por la posición con respecto al río, ya que el perfil los Riegos I está más cercano al Río Grande de Comitán.

Sin embargo, este suelo también es clasificado como un Feozemstágnicolúvico de acuerdo con la WRB (2007). Es claro el límite entre el primer horizonte y el resto, se observa una mayor porosidad, para el adecuado desarrollo de las raíces de la planta de jitomate y se observa una mayor compactación conforme se avanza en la profundidad. La textura de todo el perfil es arcillosa.

Es un suelo poroso, la densidad aparente es baja, mientras que la densidad real tiene un promedio de 2.7g/cm^3 . Debido a los altos contenidos de arcilla la estabilidad de agregados en la mayoría de los horizontes es alta (ver tabla 17).

Tabla 17. Propiedades físicas del perfil LOS RIEGOS II.

Profundidad (cm)	Horizontes	Densidad real g/cm^3	Densidad aparente g/cm^3	VTP (%Vol)	Estabilidad de agregados	Textura
0-17	Ap	2.7	0.9	65.5	Mediana	ARCILLOSA
17-31	AB1	2.7	0.9	66.6	Alta	ARCILLOSA
31-40	AB2	2.7	0.9	66.8	Alta	ARCILLOSA
40-62	Btg	2.7	0.9	67.9	Alta	ARCILLOSA
62-90	Btg ₂	2.8	0.9	64.8	Alta	ARCILLOSA
90->100	BtC	2.7	0.9	64.8	Alta	ARCILLOSA

El pH en ambas soluciones del perfil es de 6.6 a 7.5 lo cual indica que es neutro a medianamente básico (Porta, 2003). La conductividad eléctrica más alta está en el primer horizonte (1259 uS/cm), como se explicó anteriormente debido al suministro de fertilizantes por riego por goteo. El porcentaje de carbono orgánico total es mayor en el primer horizonte, en cuanto a los carbonatos el horizonte AB1 es el que contienen más. La materia orgánica es mayor en comparación al perfil los Riegos II. El nitrógeno total y el fósforo disponible disminuyen conforme a la profundidad, al igual que las bases intercambiables, el calcio es el más abundante (tabla 18).

Tabla 18. Propiedades químicas del perfil LOS RIEGOS II

Horizonte	Profundidad (cm)	pH		CE uS/cm	Ct %	CO ₃ %	M.org. %	Nt %	P dispOlsen mg/kg	Ca	Mg	K	Na	Bases Int
		Agua	CaCl2											
												cmol/kg		
Ap	0-17	6.6	6.7	1259.5	2.9	0	5.1	0.3	97.0	43.4	20.7	3.3	0	67.5
AB1	17-31	6.5	6.4	320.0	2.5	0.3	3.7	0.2	6.2	40.6	19.6	0.4	0	60.7
AB2	31-40	6.7	6.5	258.5	2.2	<0	3.7	0.2	0.9	39.6	18.9	0.4	0	59.0
Btg	40-62	7.1	6.8	383.0	1.8	0	3.2	0.1	<0.3	40.9	19.6	0.4	0	61.0
Btg ₂	62-90	7.3	6.9	254.0	1.7	<0	2.9	0.1	<0.3	38.7	19.5	0.5	0	58.8
BtC	90-100	7.5	7.1	240.0	1.4	<0	2.4	0.1	<0.3	37.1	17.7	0.5	0	55.4

* Bases intercambiables.

En la tabla 19 se observa una disminución del nitrógeno residual con respecto a la profundidad, el horizonte superficial es el que contiene el valor más alto. No se observa movilidad del nitrógeno en el suelo, lo cual es posible por el alto contenido de arcillas en el perfil y que el ingreso del agua no es el suficiente para hacer que los iones de nitrógeno se desplacen a horizontes más profundos.

Tabla 19. Nitrógeno residual en el suelo (amonios y nitratos) del perfil LOS RIEGOS II

Horizonte	Profundidad (cm)	Kg/ha de N-NO ₃	Kg/ha de N-NH ₄	NRS kg/ha
Ap	0-17	13.5	3.2	16.7
AB1	17-31	3.7	3.7	7.4
AB2	31-40	1.2	4.5	5.7
Btg	40-62	0.7	2.7	3.4
Btg ₂	62-90	0.6	2.7	3.4
BtC	90-->100	0.6	3.2	3.8

LA ESPERANZA I

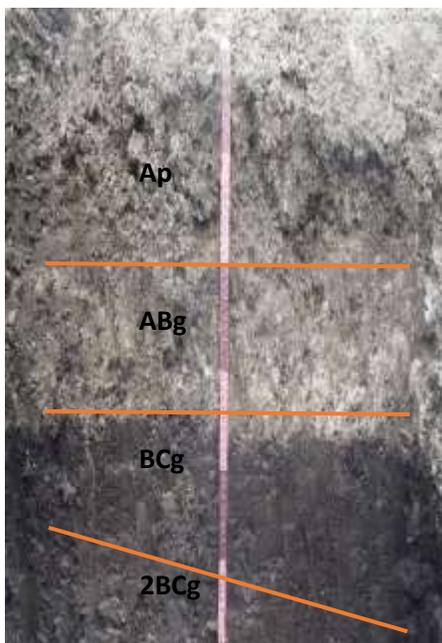


Figura 29. Fotografía del perfil en campo la Esperanza I

El suelo de la Esperanza I se clasificó como un Feozem-Gleyco de acuerdo con la WRB (2007). Presenta poca pedregosidad, principalmente en los dos primeros horizontes, se observa un cambio muy abrupto en la coloración. La densidad de raíces disminuye con la profundidad. El primer horizonte está perturbado por la actividad agrícola. El resto de los horizontes son de transición, con características gleycas.

Predominan las partículas arcillosas, posteriormente las arenas y por último los limos. La textura de todos los horizontes es Franco-Arcillosa. Las partículas de arcillas se incrementan conforme a la profundidad

Es un suelo poroso, la densidad real tiene un promedio de 2.7 y se considera alta. La estabilidad de agregados es de moderada a alta.

Tabla 20. Propiedades físicas del perfil LA ESPERANZA I

Profundidad (cm)	Horizontes	Densidad real g/cm ³	Densidad aparente g/cm ³	VTP (%Vol)	Estabilidad de agregados	Textura
0-20	Ap	2.7	1.4	50.0	Moderada	FRANCO ARCILLOSA
20-35	ABg	2.7	1.4	47.9	Baja	FRANCO ARCILLOSA
35-47/60	BCg	2.7	1.4	50.1	Mediana-alta	FRANCO ARCILLOSA
47/60->80	2BCg	2.7	1.4	49.9	Alta	FRANCO ARCILLOSA

El pH del suelo es de 6.4 a 7.6 ligeramente ácido a medianamente básico (Porta, 2003). en ambas soluciones, la conductividad eléctrica es mayor en los horizontes de en medio. El carbono total es mayor en el segundo y tercer horizonte, aunque comparándolo con el contenido de carbonatos no coincide ya que es mayor en el primer horizonte, la materia orgánica es mayor en el segundo y tercer horizonte, dicho resultado coincide con el carbono total por lo tanto mucho de este carbono es orgánico, el nitrógeno y fósforo también se concentra en esos horizontes al igual que el resto de las bases intercambiables.

Tabla 21. Propiedades químicas del perfil LA ESPERANZA I

Horizonte	Profundidad (cm)	pH		CE uS/cm	Ct %	CO ₃ %	M.org. %	Nt %	P dispOlsen mg/kg	Ca	Mg	K	Na	Bases Int
		Agua	CaCl ₂											
Ap	0-20	7.6	6.4	292.0	0.6	<0	1.0	0.1	0.2	33.5	2.2	0.2	0	36.1
ABg	20-35	7.4	7.3	721.5	1.9	<0	3.2	0.2	15.8	51.6	3.4	0.8	0	56.0
BCg	35-47/60	7.5	7.3	448.5	1.1	0	1.8	0.1	10.3	47.1	2.1	0.2	0	49.5
2BCg	47/60 - 80	7.6	7.3	395.5	0.6	<0	1.0	0.1	0.3	42.5	1.6	0.2	0	44.4

* Bases intercambiables.

En la tabla 22 el nitrógeno residual es menor en el horizonte superficial, se observa que incrementa en los dos siguientes horizontes y disminuye en el último. Se puede considerar que hay movilidad tanto de los nitratos como de los amonios en el suelo por filtración, ya que la textura en estos suelos es más gruesa (franco arcillosa) en comparación a la del perfil los Riegos que es arcillosa (más del 90%).

Tabla 22. Nitrógeno residual en el suelo (amonios y nitratos) del perfil LA ESPERANZA I

Horizonte	Profundidad (cm)	Kg/ha de N-NO ₃	Kg/ha de N-NH ₄	NRS kg/ha
Ap	0-20	4.4	2.5	6.9
ABg	20-35	6.0	5.2	11.2
BCg	35-47/60	6.5	4.9	11.5
2BCg	47/60-80	3.2	4.7	7.9

LA ESPERANZA II

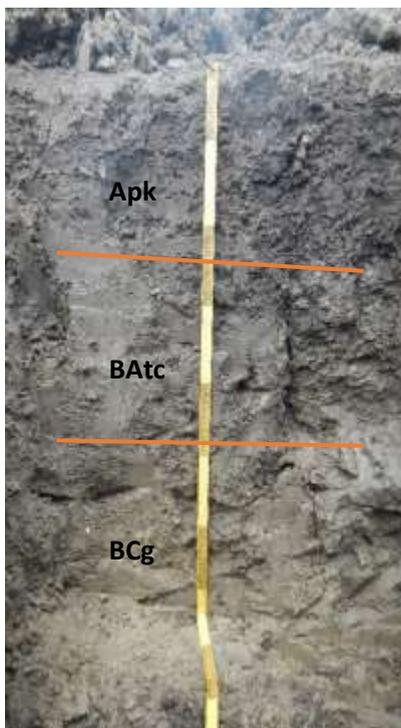


Figura 30. Fotografía del perfil en campo la Esperanza II.

A diferencia del perfil anterior no se observa un cambio abrupto en la coloración, la presencia de raíces se limita al horizonte superficial. No presenta pedregosidad. El primer horizonte está perturbado por la actividad agrícola, y los otros dos son de transición, en el segundo horizonte se acumula la arcilla, mientras que en el tercero se observan características gleyicas. Se clasificó como un FeozemGleyco de acuerdo con la WRB (2007).

En cuanto a su textura en los horizontes predominan las partículas de arcilla, mientras que las partículas arenas y limos se encuentran casi en la misma proporción

Es un suelo poroso, su densidad aparente es mediana, y la real tiene un promedio de 2.7, la textura de todos los horizontes clasificó como arcillosa (tabla).

Tabla 23. Propiedades físicas del perfil LA ESPERANZA II.

Profundidad (cm)	Horizontes	Densidad real	Densidad aparente	VTP (%Vol)	Estabilidad de agregados	Textura
0-23/29	Apk	2.7	1.3	52.5	Mediana-moderada	ARCILLOSA
23/29-49	BAtc	2.8	1.4	50.1	Alta	ARCILLOSA
49->76	BCg	2.8	1.4	48.1	Muy alta	ARCILLOSA

El pH del suelo está en el rango de 6.9 a 7.7 es decir neutro a medianamente básico (Porta, 2003). La conductividad eléctrica es mayor en la superficie, el carbono total es ligeramente mayor en el segundo horizonte respecto al primero, mientras que los carbonatos es al revés, la materia orgánica también lo es en el segundo horizonte, por tanto el ahí mismo el carbono orgánico es mayor. El nitrógeno total es mayor en el último horizonte, mientras que el fósforo disponible lo es para el primero. Las bases intercambiables disminuyen con forma a la profundidad.

Tabla 24. Propiedades químicas del perfil LA ESPERANZA II

Horizonte	Profundidad (cm)	pH		CE uS/cm	Ct %	CO ₃ %	M.org. %	Nt %	P dispOlsen mg/kg	Ca	Mg	K	Na	Bases Int
		Agua	CaCl ₂											
Apk	0-23/29	7.6	7.4	456.0	2.4	1.1	2.3	0.1	4.6	53.8	1.5	0.3	0	55.7
BAtc	23/29-49	7.7	7.4	383.0	2.6	<0	4.4	0.1	1.2	53.1	1.3	0.1	0	54.6
BCg	49-76	7.1	6.9	419.5	1.4	<0	2.4	0.1	1.3	42.2	1.2	0.2	0	43.7

* Bases intercambiables.

En la tabla 25 se observa que el contenido del nitrógeno residual es menor en la profundidad, el contenido del segundo horizonte es ligeramente mayor que el primero, puede decirse que hubo movilidad de los nitratos y amonios por la filtración. Aunque este perfil en comparación del otro (la Esperanza I), que son parte de la misma parcela tiene mayor contenido de arcillas que hace que la movilidad de los iones sea más lenta.

Tabla 25. Nitrógeno residual en el suelo (amonios y nitratos) del perfil LA ESPERANZA II

Horizonte	Profundidad (cm)	Kg/ha de N-NO ₃	Kg/ha de N-NH ₄	NRS kg/ha
Apk	0-23/29	5.9	2.3	8.2
BAtc	23/29-49	5.3	4.1	9.5
BCg	49->76	2.7	2.3	4.9

7.5 Análisis de los Contenedores de Resinas de Intercambio Iónico.

La estimación de la cantidad de N lixiviada se llevó a cabo a partir del uso de resinas de intercambio iónico diseñadas e instaladas de tal forma que capturan el nitrógeno que llega por flujo vertical a la profundidad de instalación. Se instalaron cinco contenedores de resinas de intercambio iónico a 60 cm de profundidad, en dos perfiles de las parcelas Los riegos 1 y La Esperanza 2. Los contenedores fueron dejados en el lugar durante 6 meses, con la finalidad de capturar el N que pudiera lixivarse a lo largo de un ciclo completo del cultivo. Una vez transcurrido el tiempo, las resinas fueron desinstaladas y llevadas al laboratorio. La extracción de N se hizo dividiendo a las resinas en tres capas: inferior, media y superior. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Tabla 26. Concentración de Nitrógeno (kg/ha) en el perfil Los Riegos 1.

	Contenedor de Resinas de Intercambio Iónico Kg N-NO ₃ /ha					
	1	2	3	4	5	Promedio de los cinco contenedores
Capa superior-5cm	331.6	299.2	103.5	1349.8	604.9	244.8
Capa intermedia-2cm	23.8	9.5	6.8	262.4	7.2	61.9
Capa inferior-3cm	194.0	144.3	138.9	135.3	160.9	154.7

Tabla 27. Concentración de Nitrógeno (kg/ha) en el perfil la Esperanza 2.

	Contenedor de Resinas de Intercambio Iónico Kg N-NO ₃ /ha					
	1	2	3	4	5	Promedio de los contenedores
Capa superior-5cm	44.3	42.5	32.0	52.4	46.2	43.5
Capa intermedia-2cm	6.0	9.0	13.7	16.5	19.9	13.0
Capa inferior-3cm	19.8	31.0	44.7	48.2	30.1	34.7

La tabla 26 y 27 muestra la concentración obtenida en las cinco cajas de resinas instaladas en el perfil de Los Riegos 1 y La Esperanza 2, respectivamente. La masa acumulada en la capa superior de los contenedores de las resinas de intercambio iónico, representa la masa de N que alcanza la profundidad a la que fueron instaladas las resinas (60cm) por flujo vertical, lo cual representa a la masa del elemento que abandona la zona radicular, es decir, lo que ya no será utilizado por las plantas.

La capa inferior representa la masa del N que alcanzó la resina por ascenso capilar, mientras que la capa intermedia es utilizada para verificar que el ascenso capilar no subió a la capa superior de tal forma que se garantiza que la masa reportada es en efecto, la que llegó por lixiviación a la caja de resinas (la masa en la capa intermedia debe de ser inferior a la masa acumulada en la parte superior y/o inferior). De este modo es posible decir que en el sitio donde se instalaron (Los Riegos 1 y La Esperanza 2) las resinas de intercambio iónico, si hubo lixiviación de N. En el perfil Los Riegos 1 el contenedor 4 y 5 reportan mayor concentración de lixiviado que el resto lo que ocasiona que el promedio de la concentración del N-NO₃ lixiviado se desplace fuertemente. Aparentemente estas cajas pudieron haberse quedado bajo el efecto de una fractura dentro del suelo, lo cual favoreció el flujo preferencial y explica la elevada concentración acumulada.

El cálculo del promedio de masa de N lixiviada en los cultivos fue estimado sin considerar las cajas con mayor concentración de kg/ha de N-NO₃. Por lo tanto, la masa promedio de la lixiviación fue de 244.8 kg N-NO₃/ha en el perfil de los riegos que estuvo bajo un cultivo de jitomate, mientras que el valor obtenido en la parcela de maíz fue de 43.5 kg/ha de N-NO₃, en el perfil de la esperanza. Estos resultados se pueden observar gráficamente en la figura 31.



Figura 31. Distribución de la concentración de N-NO₃ en los diferentes contenedores de resinas de intercambio iónico instalados en la localidad de los Riegos 1 y la Esperanza 2, bajo cultivo de jitomate y maíz, respectivamente. Cada contenedor presenta tres capas, superior (C-5), media (C-2) e inferior (C-3) que representan la acumulación de N por diferente forma de movilidad.

Un resultado interesante es el hecho de haber observado acumulación de N-NO₃ en la capa inferior de los contenedores, como se mencionó anteriormente, este comportamiento está relacionado principalmente con el fenómeno de ascenso capilar, y esto se presenta en los dos casos evaluados. Nuevamente los promedios encontrados son mayores en el cultivo de jitomate (154.7 N-NO₃ kg/ha) que en el de maíz (34.7 N-NO₃ kg/ha). Este comportamiento se puede explicar a partir del

contenido de arcilla que tienen los suelos evaluados, la presencia de horizontes arcillosos en los suelos favorece los flujos preferenciales, los cuales pueden nitrógeno. En el caso de los riegos el contenido de arcillas es muy alto, sin embargo la posición de las parcelas con respecto al río también podría explicar dicho ascenso, ya que se ubica muy cerca del río.

Finalmente, la capa intermedia de los contenedores tiene una concentración mínima en casi todos los casos, esto nos indica el contenedor no se saturó y, por lo tanto, es posible diferencia el transporte vertical de iones que se asocia a lo evaluado en capa superior de los iones retenidos por ascenso capilar.

Tabla 28. Concentración de Nitrógeno (kg/ha) en el perfil la Esperanza 1.

	Contenedor de Resinas de Intercambio Iónico Kg N-NO ₃ /ha					Promedio de los contenedores
	1	2	3	4	5	
Capa superior-5cm	122.7	877.8	19.1	74.8	18.0	58.7
Capa intermedia-2cm	10.1	98.0	20.3	9.8	3.1	28.3
Capa superior-3cm	72.3	342.9	96.2	88.3	64.9	132.9

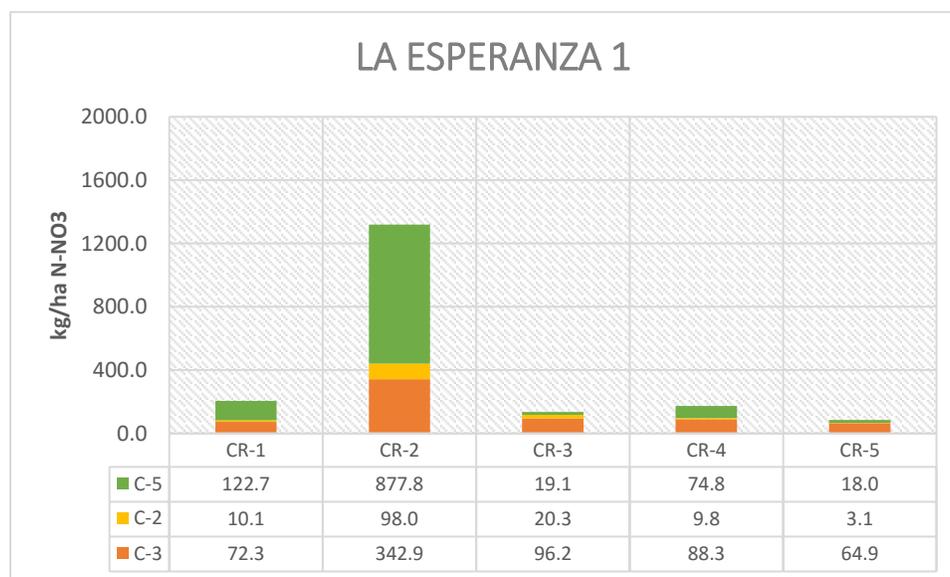


Figura 32. Distribución de la concentración de N-NO₃ en los diferentes contenedores de resinas de intercambio iónico instalados en la localidad la Esperanza 1, bajo cultivo de maíz. Cada contenedor presenta tres capas, superior, media e inferior que representan la acumulación de N por diferente forma de movilidad.

Por otro lado, la tabla 16 y figura 28 muestra el comportamiento del N-NO₃ en 5 cajas instaladas en otro punto de la parcela localizada en localidad de la Esperanza. La lixiviación de estos contenedores

con respecto a los del Perfil la Esperanza 2 es mínima, es similar la cantidad lixiviada con la cantidad del ascenso capilar. La capa intermedia no muestra saturación. Este resultado se explica con el hecho de que, cuando regresamos al sitio de estudio a recuperar las resinas, nos percatamos de que este punto quedó fuera de la parcela sembrada con maíz, el agricultor decidió utilizar esa zona de la parcela como zona de paso peatonal, es decir, este punto nunca estuvo bajo ningún cultivo. El hecho de haber observado que la masa por ascenso capilar fue similar a la obtenida en las resinas que estuvieron debajo del cultivo, nos hace pensar que se trata del N acumulado en cultivos anteriores.

Se omitió para el cálculo del promedio de los contenedores, el valor del contenedor 2 al tener mayor concentración de de kg/ha de N-NO₃, ya que ocasiona que el promedio de la concentración del N-NO₃ lixiviado se desplace fuertemente. Posiblemente esta caja pudo haberse quedado bajo el efecto de una fractura dentro del suelo, lo cual favoreció el flujo preferencial y en consecuencia se elevó la concentración acumulada.

Balace de N en las parcelas evaluadas.

Tabla 29. Balance de Nitrógeno de Maíz kg/ha

CULTIVO DE MAÍZ	
ENTRADAS	Promedio kg N /ha
Ingreso de fertilizantes	160
Deposición atmosférica	12
suma de entradas	172
SALIDAS	Promedio kg N/ha
NRS	23
N absorbido por el cultivo	160
Lixiviación acumulados en contenedores	43.5
suma de salidas	226.5
BALANCE DE NITRÓGENO	54.5

En la tabla 29 se muestran los promedios de los cálculos del balance del cultivo de maíz de cada variable en un suelo de tipo Feozem, las entradas de nitrógeno son de 172kg/ha donde el mayor aporte de nitrógeno es a través de los fertilizantes (93%). El cálculo de la deposición atmosférica se hizo de acuerdo con lo reportado en la literatura por Marschner (1986), quien considera un intervalo global. Las salidas de nitrógeno son de 226.5kg/ha, la salida principal es a través de la absorción por parte del cultivo de maíz 160kg/ha (70%) (Bertsch, 2003). El 19% del nitrógeno sale del sistema a

través de la lixiviación y el 10% restante se queda en el suelo como NRS, el cual es susceptible a lixiviarse con el ingreso de agua.

Tabla 30. Balance de Nitrógeno de Jitomate kg/ha.

CULTIVO DE JITOMATE	
ENTRADAS	Promedio kg N/ha
Ingreso de fertilizantes	458
Deposición atmosférica	12
suma de entradas	470
SALIDAS	Promedio kg N/ha
NRS	35
N absorbido por el cultivo	160
Lixiviación acumulados en contenedores	244.8
suma de salidas	439.8
BALANCE DE NITRÓGENO	-30.2

Por otro lado, en la tabla 30 se muestran los promedios de los cálculos del balance del cultivo de jitomate de cada variable en un suelo de tipo Feozem, las entradas de nitrógeno son de 470kg/ha donde el mayor aporte de nitrógeno es a través de los fertilizantes (97%). Las salidas de nitrógeno son de 439.8kg/ha, a diferencia del cultivo de maíz la salida principal es a través de la lixiviación (56%), el 8% se queda en el suelo como NRS el cual es susceptible a lixiviarse con el ingreso de agua y el 36% restante del nitrógeno es absorbido por el cultivo (Bertsch, 2003).

Para el balance del cultivo de maíz de la parcela Esperanza se omitieron los resultados de las resinas La Esperanza I ya que dichas resinas no quedaron bajo el cultivo, sin embargo cabe destacar que al analizar los resultados de estas mismas se observa que si hay lixiviación, en uno de los contenedores se aprecia mayormente la lixiviación que en el resto, esto es posible por la existencia de flujos preferenciales resultados de las grietas que se forman en el suelo favoreciendo el flujo del agua y en consecuencia el arrastre de los iones.

Comparando ambos cultivos se observa que el porcentaje del NRS es muy parecido, 10% en el cultivo de maíz y 8% para el cultivo de jitomate. Sin embargo si existe una diferencia en los porcentajes en cuanto al resto de las salidas, la salida principal en el cultivo de maíz es la absorción del maíz, este cultivo es muy demandante en cuanto a los nutrimentos, el 70% del nitrógeno es absorbido por él, mientras que sólo el 19% se lixivia, sin embargo en el cultivo de jitomate más de la mitad del nitrógeno que ingresa se lixivia, esto es posible porque el ingreso de agua es más constante que en el maíz, cada tercer día ingresa de 800 a 1000ml a través del riego por goteo, mientras que en el cultivo de maíz únicamente ingresa agua a través de la precipitación.

7.6 Suelos Susceptibles a la lixiviación en la Cuenca.

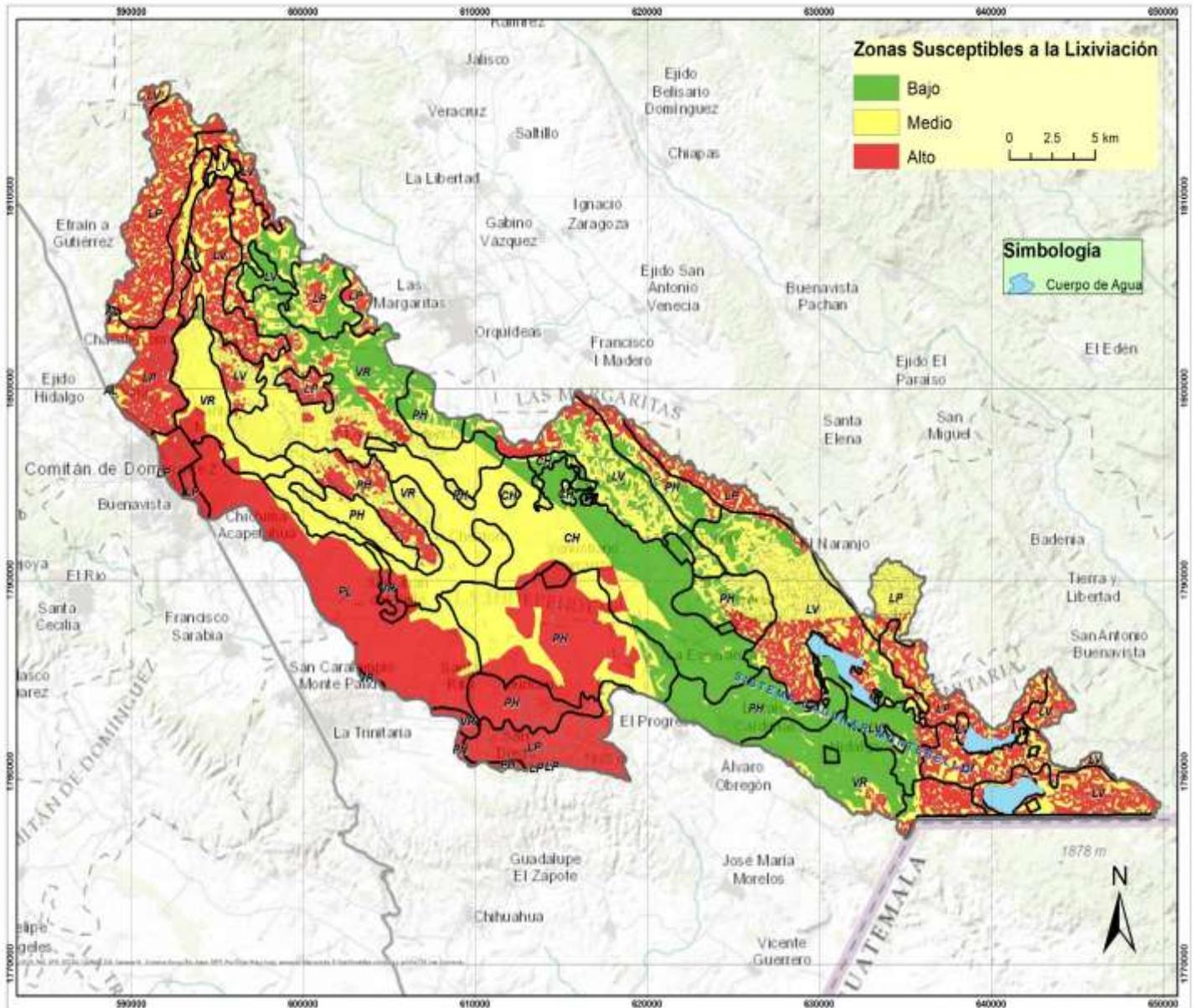


Figura 33. Sitios de la Cuenca del Río Grande de Comitán susceptibles a Lixiviación. LU Luvisol, PH Feozem, CH Chernozem, LP Leptosol, VR Vertisol.

Para el análisis de susceptibilidad de los sitios, se definieron 3 grados de susceptibilidad a la lixiviación con base en cuatro variables: la precipitación (la cual se obtuvo de datos del INEGI; 2010, 1:1000000), la textura del suelo (con base a la información proporcionada por Martínez, 2015), las zonas de acumulación de agua (esto se obtuvo mediante un modelo digital de terreno elaborado en esta tesis) y las zonas que se desarrollan sobre el desarrollo kárstico (con base a la información proporcionada Mora, et. al., 2016), (ver apartado de identificación de sitios susceptibles a la lixiviación en Métodos). En el mapa de la figura 33 puede verse el índice de susceptibilidad asignado a diferentes zonas de la Cuenca, cada color representa a cada grado de susceptibilidad. El grado 1 es

Bajo (verde), el grado 2 Medio (amarillo), y el grado 3 Alto (rojo). Las zonas con alta susceptibilidad a lixiviarse se encuentran en las orillas de la cuenca, y los suelos que se desarrollan en estas zonas son los Leptosoles con el 64.4%, seguido de los Feozem (37.8%), los Luvisoles (36.3%), los Vertisoles (14.9%) y finalmente los Chernozem con el 3.5%. La zona con susceptibilidad media se ubica en el centro de la cuenca y el porcentaje de suelos ubicado en esta zona es mayor en comparación con las zonas susceptibles altas y bajas de la cuenca con excepción de los Leptosoles. En la zona de baja susceptibilidad a la lixiviación, la cual se ubica en el centro y en las orillas norte de la Cuenca se desarrollan predominantemente suelos de tipo Chernozem (45.4%), en una proporción muy similar se encuentran los suelos de tipo Vertisol y Feozem (27.2 y 23.5% respectivamente), el desarrollo de verisoles en esta zona es mínima (4.8%):

Tipo de suelo	Ha de suelo en los diferentes grados de susceptibilidad				% de superficie de suelo en los diferentes grados de susceptibilidad		
	Bajo	Medio	Alto	totales	% Bajo	% Medio	% Alto
Vertisoles	4133.3	8823.2	2259.7	15216.2	27.2	58.0	14.9
Luvisoles	3327.6	8148.9	6539.8	18016.2	18.5	45.2	36.3
Feozem	3662.3	6046.4	5903.1	15611.8	23.5	38.7	37.8
Chernozem	3741.4	4218.6	288.9	8248.9	45.4	51.1	3.5
Leptosol	643.9	4123.0	8630.1	13397.0	4.8	30.8	64.4

Como se mencionó anteriormente en la zona de alta susceptibilidad de lixiviación se desarrollan mayormente los suelos de tipo Leptosol, sin embargo las condiciones de los sitios favorecen más la erosión que el mismo proceso de lixiviación, principalmente por la posición en el relieve de dichos suelos. La zona centro al tener menos pendiente favorece la acumulación de agua, si es bien cierto que la textura de la mayoría de los suelos de la Cuenca es arcillosa, en el estudio con resinas de intercambio iónico se muestra que si llega a ser significativa la lixiviación en suelos con este tipo de textura.

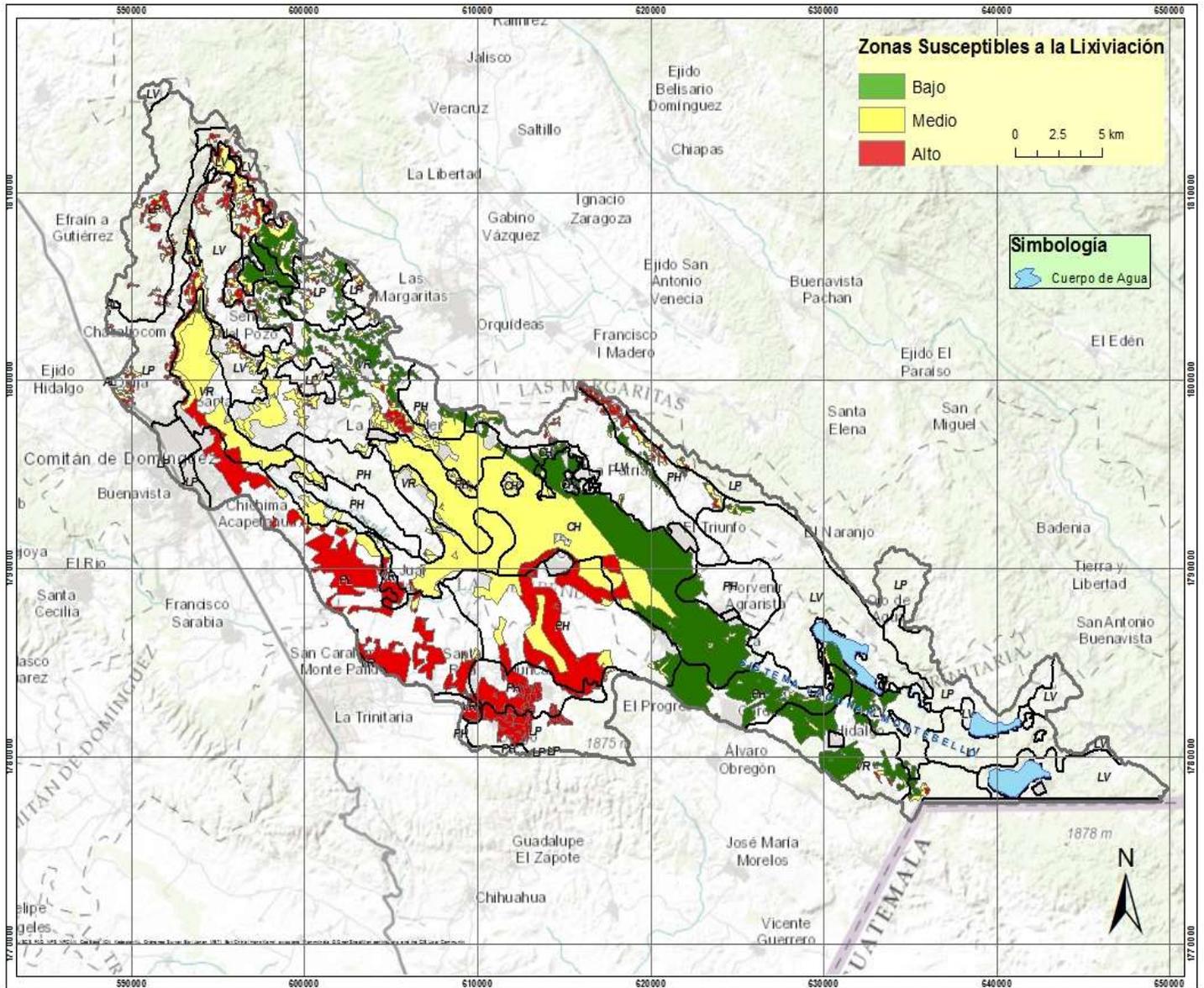


Figura 34. Sitios agrícolas susceptibles a la Lixiviación: LU Luvisol, PH Feozem, CH Chernozem, LP Leptosol, VR Vertisol.

En la figura 34 se observan los suelos bajo actividad agrícola susceptibles a la lixiviación, de acuerdo con el mapa los sitios altamente susceptibles se encuentran en las orillas de la cuenca, mientras que la zona media junto con la baja se encuentran en el centro. A continuación se describen las ha el porcentaje por tipo de suelo que se encuentran en estos tres rangos de susceptibilidad a la lixiviación:

Tipo de suelo	Ha de suelo en los diferentes grados de susceptibilidad				% de superficie de suelo en los diferentes grados de susceptibilidad		
	Bajo	Medio	Alto	totales	% Bajo	% Medio	% Alto
Vertisoles	2094.1	5125.1	961.1	8180.3	25.6	62.7	11.7
Luvisoles	942.4	765.11	514.56	2222.0	42.4	34.4	23.2
Feozem	1836.8	1518.1	2304.5	5659.5	32.5	26.8	40.7
Chernozem	3438.6	4040.9	273.6	7753.1	44.4	52.1	3.5
Leptosol	265.0	386.3	892.0	1543.2	17.2	25.0	57.8

En los sitios altamente susceptibles a lixiviarse predominan los suelos de tipo Leptosol (57.8%) y Feozem (40.7%), mientras que los suelos de tipo Chernozem (3.5%) son los que menos se encuentran en dicha zona. Mientras que en los sitios medianamente susceptibles los suelos que más abundan son los Vertisoles (62.7%) y Chernozem (52.1%) y los leptosoles junto con los Feozem tienen menor desarrollo en estos sitios. Finalmente en los sitios con menor susceptibilidad a lixiviarse se encuentran mayormente los suelos de tipo Chernozem (44.4) y los Luvisoles (42.4%), mientras los leptosoles son los de menor desarrollo con tan sólo el 17.2%. Los sitios medianamente susceptibles a lixiviarse son los que predominan en la zona agrícola de acuerdo con la figura 34. Es decir el 40.2% de la superficie de los suelos agrícolas son medianamente susceptibles a presnetar el proceso de lixiviación, mientras que el 32.4% de ellos se encuentran en la zona baja de susceptibilidad, finalmente el 27.4% de los suelos agrícolas son altamente susceptibles a lixiviarse principalmente los suelos de tipo Feozem.

Si bien es cierto que se consideraron varios factores para obtener el calificativo de la susceptibilidad a la lixiviación de los sitios evaluados, algunos de esos factores no tienen tanto impacto como otros en la obtención de dicho calificativo, por ejemplo, la textura del suelo, aunque es fundamental en el proceso de lixiviación, dado que la mayoría de la Cuenca tienen un alto contenido de arcilla (>60%), ese no es el parámetro que define diferencias entre ellos. En este escenario, factores como la precipitación, zonas de acumulación de agua y las zonas que se desarrollan sobre el desarrollo kárstico tienen un mayor impacto.

8. CONCLUSIONES

- La fertilización en el cultivo de maíz es más homogénea a lo largo de la Cuenca, a diferencia del cultivo de jitomate. La dosis de nitrógeno que ingresa a los suelos bajo cultivo de jitomate es muy variada debido a que no todos los agricultores reciben asesorías sobre el uso de fertilizantes. El mayor aporte de nitrógeno al sistema suelo ocurre en los cultivos de jitomate.
- De los fertilizantes nitrogenados más utilizados en la Cuenca en el cultivo de maíz es la urea, por ser el más económico, al ser una fuente nitrogenada de más alta concentración y porque satisface la demanda de nitrógeno de los cultivos, principalmente el maíz. En el cultivo de jitomate los fertilizantes nitrogenados en forma de amonios y nitratos son más comunes, ya que este cultivo absorbe la mayor parte del nitrógeno en estas formas.
- Los suelos de tipo Luvisol son los que reciben mayor ingreso de fertilizantes nitrogenados tanto en el cultivo de maíz como en el de jitomate, y son los que presentan mayor variabilidad en la administración de los mismos.
- La movilidad del NRS es más común y evidente en los suelos de tipo Feozem, de acuerdo a los resultados de laboratorio, tanto en el cultivo de jitomate como en el de maíz. A pesar de que en los suelos bajo el cultivo de maíz se reporta la mayor concentración de NRS. La lixiviación es más importante y más evidente en el cultivo de jitomate (cuantificada ésta como la masa de N lixiviada respecto a la masa de N aplicada).
- Con base en el conjunto de resultados obtenidos en este trabajo, la movilidad y lixiviación de N, en los suelos estudiados que tienen un alto contenido de arcilla (>50%), se debe a la aplicación en exceso de fertilizantes nitrogenados aunado al volumen de agua que ingresa, altas precipitaciones en el caso del maíz y la aplicación permanente de agua en el riego por goteo del jitomate.
- Los resultados de los análisis de las resinas de intercambio iónico muestran que la lixiviación en suelos arcillosos es significativa principalmente para aquellos que están bajo el cultivo de jitomate (56% lixiviado). Como se mencionó en el punto anterior la mala administración en los fertilizantes nitrogenados junto con el ingreso de agua por la precipitación y riego por goteo favorecen dicha lixiviación.
- Con base a la información obtenida de los sitios susceptibles a la lixiviación en las zonas agrícolas, el 40.2% de los suelos son medianamente susceptibles a presentar este proceso, el 27.4% de los suelos son altamente susceptibles y tan solo el 32.4% de los suelos agrícolas se encuentran en la zona baja de susceptibilidad a la lixiviación. Relacionando la información los suelos de tipo Leptosol, Feozem y Luvisol son los suelos más susceptibles a la lixiviación

por su ubicación con respecto al relieve, las altas precipitaciones que reciben, la aplicación alta de nitrógeno a través de los fertilizantes. Siendo entonces los Chernozem y Vertisol los suelos que por sus características, su posición al relieve, el ingreso de fertilizantes, así como las bajas precipitaciones, los menos susceptibles a la lixiviación.

9. RECOMENDACIONES.

- I. En el estudio del nitrógeno residual del suelo se debe ampliar los sitios de muestreo para incrementar la robustez del trabajo, así como ampliar los periodos de muestreo antes del cultivo, durante el cultivo, al término del cultivo y mientras el suelo está en barbecho, esto permitirá una mayor comprensión del nitrógeno en el suelo.
- II. Delimitar de forma robusta las zonas agrícolas de maíz y jitomate para una mejor interpretación de los resultados.
- III. Adicionar estudios de eficiencia del fertilizante, utilizando el método sistémico racional. Así como ampliar el conocimiento de los fertilizantes que se utilizan en la región para mejorar su uso en los cultivos, evitando el exceso de los nutrientes en el suelo que los hagan susceptibles a lixiviarse.
- IV. Darle un enfoque a la investigación de: Peligro-Riesgo y Vulnerabilidad, de tal forma que se pueda generar un mapa de vulnerabilidad que incluya no sólo los factores que intervienen en la lixiviación, sino que se incluya la fertilización que ingresa a los suelos (por tipo de suelo y cultivo), así como la cantidad de nitrógeno residual en las diferentes unidades del suelo y por cultivo, para poder dar mejores recomendaciones del uso potencial del suelo en la cuenca y poder tener una mejor gestión del recurso suelo.

10. REFERENCIAS.

A

- Aguilera, N., 1989, Tratado de edafología de México: UNAM, México D. F, 182pp.
- Akselsson, C., Westling, O., Örlander, G., 2004, Regional mapping of nitrogen leaching from clearcuts in southern Sweden: Forest Ecology and Management, 202, 235-243.
- Alvarado Velázquez, J., 2015, Evaluación especial de la contaminación potencial puntual y difusa en la Cuenca del Río Grande Comitán, Chiapas: México, Universidad Nacional Autónoma de México, FES Zaragoza, Tesis de licenciatura, 76pp.
- Alcocer, J., Oseguera, L.A., 2016, Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas, Journal of Limnology, 75 (s1), 56-65.
- Armstrong, A., Matthews, A., Portwood, A., Leeds-Harrison, P., Jarvis, N., 2000, CRACK-NP: a pesticide leaching model for cracking clay soils: Agricultural water management, 44, 183-199.
- Assimakopoulos, J., Kalivas, D. Kollias, V., 2003, A GIS-based fuzzy classification for mapping the agricultural soils for N-fertilizers use: the Science of the Total Environment, 309, 19-33.

B

- Babiker, I., Mohamed, A., Terao, H. Kato, K., Ohta, K., 2004, Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system: ENVIRONMENT INTERNATIONAL, 29, 1009-1017.
- Behrendt, H., Lademann, L., 1996, Vulnerable areas of phosphorus leaching-detection by GIS-analysis and measurements of phosphorus sorption capacity: Elsevier Science, 96, 175-181.
- Bertsch, F., 2003. Absorción de nutrientes por los cultivos: San José Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, p.
- Bischoff, W., Development and Applications of the self-integrating Accumulators: A Method to quantify the Leaching Losses of Environmentally Relevant Substances. Tesis Doctoral Facultad VI, Universidad Técnica de Berlín, 184p.
- Bin-Le Lin, Sakoda, A., Shibasaki, R., Suzuki, M., 2001, A MODELLING APPROACH TO GLOBAL NITRATE LEACHING CAUSED BY ANTHROPOGENIC FERTILISATION, PERGAMON, 35, 1961-1968.
- Binkley, D., Fisher, R., 2012, Ecology and management of forest soils: New York, Wiley, 347p.
- Bootink, H., 1995, Field monitoring of nitrate leaching and water flow in a structured clay soil: Agriculture Ecosystems & Environment, 52, 251-261.
- Brady NC, Weil RR, 2008. The nature and properties of soils: New Jersey, Prentice Hall, 975pp.

C

- Campbell, N., Reece, J., 2005, Biología: Madrid, España, Pearson Education, 1209pp.

- Carton, O.T., Jarvis, S.C., 2001, Nitrogen and phosphorus cycles in agriculture In P. De Clercq et al. (eds.): Netherlands, Nutrient management legislation in European countries. Wageningen Press, 3- 13p.
- Cavero, J., Plant, R., Shennan, C., Friedman, D., Williams, J., Kiniry, J., Benson, V., 1999, Modeling nitrogen cycling in tomato-safflower and tomato- wheat rotations: AGRICULTURAL SYSTEM, 60, 123-135.
- CONANP, 2007, Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello: México, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 191p.

D

- De Paz, J., Ramos, C., 2002, Linkage of a geographical information system with the GLEAMS model to assess nitrate leaching in agriculture areas: Environ Pollut, 118, 249-258.
- De Paz, J., Delgado, J., Ramos, C., Shaffer, M., Barbarick, K., 2009, Use of a new GIS nitrogen index assessment tool for evaluation of nitrate leaching across a Mediterranean región: Journal of Hydrology, 365, 183-194.
- De Paz, J., Ramos, C., 2004, Simulation of nitrate leaching for different nitrogen fertilization rates in a region of Valencia (Spain) using a GIS-GLEAMS system: Agriculture Ecosystem & Environment, 103, 59-73.
- De Paz, J., Rubio, J., 2006, Application of a GIS-AF/RF model to assess the risk of herbicide leaching in a citrus-growing area of the Valencia Community, Spain: Science of the Total Environment, 371, 44-54.
- Degiovanni, B., Martínez, C, Motta, F., 2010, Producción eco-eficiente de arroz en América Latina. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Calí, Colombia, I, 1-25.
- Dekker, L., Bauma, J., 1984, Nitrogen leaching during sprinkler irrigation of a Dutch clay soil: Agricultural Water Management, 9, 37-45.
- Delin, S., Stenberg, M., 2014, Effect of nitrogen fertilization on nitrate leaching in relation to grain yield response on loamy sand in Sweden: European Journal of Agronomy, 52, 291-296.
- Díaz, C., 2011, Cuantificación de la lixiviación de nitratos en una parcela regada con agua residual en el Valle del Mezquital: México, FEZ ZARAGOZA, UNAM, Tesis de Licenciatura, 68pp.
- Drury, C., Yang, J., Jong, R., Yang, X., Huffman, E., Kirkwood, V., Reid, K., 2014, Residual soil nitrogen indicator for agricultural land in Canada: Soil Sen, 226, 167-177.
- Drury, C.F., Yang, J., De Jong, R., Huffman, T., Yang, X., Reid, K., and Campbell, C.A., 2010, Residual soil nitrogen. In Environmental Sustainability of Canadian Agriculture, Agri-Environmental Indicator Report Series: Agriculture and Agri-Food Canada, 12, 74-80.
- Durán, J., 2013, Análisis geomorfológico del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas: México, UNAM, Tesis de licenciatura, 91p.

- Durán J, Delgado-Baquerizo, Rodríguez A, 2013, Ionic exchange membranes (IEMs): A good indicator of soil inorganic N production: *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 964-968.

E

- Eaton, A.D., Franson, M.A., 2005, *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater:USA*, American Public Health Association, 1200p.

F

- FAO, 2002, *Los Fertilizantes y su Uso*: ROMA, IF, 42pp.
- Finck, A., 1988, *Fertilizantes y Fertilización*: Barcelona, Editorial Reverté, 436p.
- FitzPatrick, E., 1996, *Introducción a la Ciencia de los Suelos*: México, Trillas, 247p.
- Freibauer, A., 2003, Regionalised inventory of biogenic greenhouse gas emissions from European agricultura: *Europ. J. Agronomy*, 19, 135-160.

G

- Galloway, J., 1998, The global nitrogen cycle: Change and consequences: *Environmental Pollution*, 102, 15-24.
- García Carreón., J-S., 2002, Rendimiento de ejote en frijol variedad strike con fertilización orgánica (vermicompost) y química y su efecto en la lixiviación de nitratos al suelo: México, Universidad Autónoma de Chapingo, Tesis, pp.
- Gardi, C., 2001, Laan use, agronomic management and water quality in a small Northern Italian watershed: *Agriculture Ecosystems & Environment*, 87, 1-12.

I

- IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007, *Base referencial mundial del recurso del suelo, Un marco conceptual para clasificación correlación y comunicación internacional*: ROMA, FAO, 117pp.
- IPCC, 1996, *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*: Inglaterra, OCDE y AIE.

J

- Jordan, C., Mihalyfalvy, E., Garretet, M., Smith, R., 1994, Modelling of Nitrate Leaching on a Regional Scale Using a GIS: *Journal of Environmental Management*, 42, 279-298.
- Juárez-Hernández, Evelyn Lucero, 2014, *Análisis Hidrogeoquímico de la Cuenca del Río Grande Comitán*: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura, 101p.

K

- Keesstra, SD., Geissen, V., van Schaik, L., Mosse, K., Piirainen, S., 2012, Soil as a filter for groundwater quality: *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4, 507-516.
- Kiese, R., Heinzeller, C., Werner, C., Wochele, S., 2011, Quantification of nitrate leaching from German forest ecosystems by use of a process oriented biogeochemical model: *Environmental Pollution*, 159, 3204-3214.

- Kleinman, P.J.A., Sharpley A.N., Buda A.R., McDowell R.W., Allen A.L., 2011. Soil controls of phosphorus in runoff: Management barriers and opportunities. *Canadian Journal of Soil Science*. 91, 329–338pp.
- Kleinman, P., Sharpley, A., McDowell, R., Flaten, D., Buda, A., Tao, L., Bergstrom, L., Zhu, Q., 2011, Managing agricultural phosphorus for water quality protection: principles for progress: *Plant Soil*, 349, 169-182.
- Kolahchi, Z., Jalali, M., 2007, Effect of water quality on the leaching of potassium from Sandy soil: *Journal of Arid Environments*, 68, 624-639.
- Kotz, J.C., Treichel, P.M. y Weaver, G.C., 2005. *Química y reactividad química: México*, 6a ed. Ed. Thomson. 378-405p.

L

- Lenka, S., Singh, A., Lenka, N., 2013, Soil water and nitrogen interaction effect on residual soil nitrate and crop nitrogen recovery under maize-wheat cropping system in the semi-arid región of northern India: *Agricultural, Ecosystems and Environment*, 179, 108-115.
- Lockhart, K. M., King, A. M., Harter, T., 2013, Identifying sources of groundwater nitrate contamination in a large alluvial groundwater basin with highly diversified intensive agricultural production: *J. Contam. Hydrol*, 151, 140–154.

M

- Mancebo-Quintana, E., Ortega-Pérez, E., Valentín-Criado, A.C., Martín-Ramos, B., Martín-Fernández, L., 2008, Libro SIG: aprendiendo a menjar los SIG en la gestión ambiental: Madrid, España, 109p.
- Marschner H. (1986): Mineral nutrition in higher plants. Wd Ltd. The Greystone Press, Antrim, Norther Ireland.
- Martínez, M., 2015, Caracterización de los suelos de la cuenca del Río Grande, como soporte para entender la dinámica de contaminantes que llegan al sistema lagunar de Montebello, Chiapas: México, FEZ ZARAGOZA, UNAM, Tesis de licenciatura, 138p.
- Matthews, A., Armstron, A., Leeds-Harrison, P., Harris, G., Catt, J., 2000, Development and testing of a model for predicting tillage effects on nitrate leaching from cracked clay soil: *Soil & Tillage Research*, 53, 245-254.
- Millar, C., Turk, L., Foth, H., 1981, Fundamentos de la ciencia del suelo: C.E.C.S.A, México, 513p.
- Mora, L., Bonifaz, R., López M., R., 2016, Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México: *Boletín de la Sociedad Mexicana*, 68, 377-394.
- Monteiro, M.I.C., Ferreira, F.N., de Oliveira, N.M.M., Ávila, A.K., 2003, Simplified versión of the sodium salicylate method for analysis of nitrate in drinking waters: *ANALYTICA CHIMICA ACTA*, ELSEVIER, 477, 125-129.

- Mulleried, F.K.G., 1957, La geología de Chiapas. Gobierno Constitucional del Estado de Chiapas. Chiapas, México, INE, 180 pp.

O

- Ongley, ED., 1997, Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. Estudio FAO Riego y Drenaje nº 55: Roma, FAO, 116p.

P

- Pierzynski, G, 2000, Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters. Southern Cooperative Series Bulletin 396. Raleigh, N.C.: North Carolina State University.
- Porta, J., 2003, Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente: Madrid, Mundi-Prensa, 929p.

R

- Rodríguez-Fuentes, H.; Rodríguez Absi, J., 2002, Métodos de Análisis de Suelos y Plantas: México, Trillas, 196p.
- Roger, A., Libohova, Z., Rossier, N., Joost, S., Maltas, A., Frossard, E., Sinak, S., 2014, Spatial variability of soil phosphorus in the Fribourg canton, Switzerland: *Geoderma*, 217-218, 26-36.
- Rubaek, G., Kristensen, K., Olesen, S., Ostergaard, H., Heckrath, G. 2013, Phosphorus accumulation and spatial distribution in agricultural soil in Denmark : *Geoderma*, 209-210, 241-250.
- Russell, G., Miller, J., 1992, The impact of global warming in river runoff: *J. Geophys. Res.*, 97, 2757-2764.

S

- Shaffer, M., Wylie, B., Hall, M., 1995, Identification and mitigation of nitrate leaching hot spots using NLEAP-GIS technology : *Contaminant Hydrology*, 20, 253-263.
- Scheffer, B., Ortseifen, U., , 1997. Zur Abschätzung des Nitrataustrags in die Gewässer am Beispiel der Boden Niedersachsens. Brunswick Groundwater Colloquium 1997. Environmentally friendly management of groundwater and soil. 71-70pp.
- Siebe, Ch., Jahn, R., Stahr, K., 2006, Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo: México, UNAM, 57p.
- Sieling, K., Ubben, K. & Christen, O. 2007. Effects of preceding crop, sowing date, N fertilization and fluquincazole seed treatment on wheat growth, grain yield and take all: *J. Plant Dis. Protect*, 114, 213–220.
- Schröder, J., Scholefield, D., Cabral, F., Hofman, G., 2004, The effect of nutrient losses from agricultura on ground and Surface water quality: the position of science in developing indicators for regulation: *Environmental Science & Policy*, 7, 15-23.
- Skop, E., Sorensen, B., 1998, GIS-based modelling of solute fluxes at the catchment scale: a case study of the agricultural contribution to the riverine nitrogen loading in the Vejle Fjord catchment, Denmark: *ECOLOGICAL MODELLING*, 106, 291-310.

- Soto Barajas, M.C., 2004, Evaluación de las pérdidas de nitrógeno por lixiviación en una pradera sometida al pastoreo: México, Universidad Autónoma de Chapingo, pp.
- Starr, C., Taggart, R., 2008, *Biología la Unidad y Diversidad*: Madrid, THOMSON, 250p

T

- Ten Berge, H., Burges, S., Van der Meer, H., Schöder, J., Van der Schoot, J., Van Dijk, W., 2007, Residual inorganic soil nitrogen in grass and maize on Sandy soil: ENVIRONMENTAL POLLUTION, 145, 22-33.
- Ten Berge, H., Burgers, S., Van der Meer, H., Schöder, Van der Schoot, J., 2007, Residual inorganic soil nitrogen in grass and maize on Sandy soil: ENVIRONMENTAL POLLUTION, 145, 22-30.
- Tisdale, S., Nelson, W., 1987, *Fertilidad de los suelos y fertilizantes*: México, UTEHA, 760p.
- Tunney, H., A., Breeuwsma, P.J.A., Withers and P.A.I. Ehlert, 1997, Phosphorus Fertilizer Strategies: Present and Future. In: Phosphorus Loss from Soil to Water:. CAB International, Wallingford, Oxon, United Kingdom, Tunney, H., O.T. Carton, P.C. Brookes and A.E. Johnston (Eds.), 177-203pp.
- Turtola, E., Paajanen, A., 1995, Influence of improved subsurface drainage on phosphorus losses and nitrogen leaching from a heavy clay soil: Agricultural water management, 28, 295-310.

V

- Van der Laan, M., Stirzaker, R., Annandale, J., du Preez, C., 2010, Monitoring and modelling draining and resident soil wáter nitrate concentrations to estimate leaching losses: Agricultural Water Management, 97, 1779-1786.
- Van Der Zee, S., Van Riemsdijk W., 1986, Transport of phosphate in a heterogeneous field: TRANSPORT IN POROUS MEDIA, 1, 339-359.
- Van Puijenbroek, P.J.T.M., Cleij, P., Visser, H., 2014. Aggregated indices for trends in eutrophication of different types of fresh water in the Netherlands. Ecol. Indic. 36, 456–462.
- Van Reeuwijk, L.P., 1992. Procedures for soil analysis, 3rd Ed. International Soil Reference and Information Center (ISRIC), Wageningen, the Netherlands. 34p.
- Vázquez, M. A., Méndez, E., 1994, Aspectos generales de la región: Lagos de Montebello. Reporte del trabajo para el curso de conservación de naturaleza y recursos naturales: Chiapas, México, ECOSUR Chiapas. San Cristóbal de las Casas, Maestría en Ciencias: Recursos Naturales y Desarrollo Rural, 109 pp.
- Villa-Castorena, M., Catalán, V., E.A., Inzunza, I., M.A., Ulery, AL., 2006. Absorción y traslocación de sodio y cloro en plantas de chile fertilizadas con nitrógeno y crecidas en estrés salino: Fitotecnia Mexicana, 29 (1), 79-88pp

W

- White, R., 1983, SEASONAL VARIATIONS IN NITRATE LEACHING IN STRUCTURED CLAY SOILS UNDER MIXED LAND USE: Agricultural Water Management, 7, 391-410.

- White, R., 1989, PREDICTION OF NITRATE LEACHING FROM A STRUCTURED CLAY SOIL USING TRANSFER FUNCTION DERIVED FROM EXTERNALLY APPLIED OR INDIGENOUS SOLUTE FLUXES: Journal of Hydrology, 107, 31-42.
- White, R., 1985, A MODEL FOR NITRATE LEACHING IN UNDISTURBED STRUCTURED CLAY SOIL DURING UNSTEADY FLOW: Journal of Hydrology, 79, 37-51.

Y

- Yang, J., Drury, C., Jong, R., Huffman, E., Yang, X., Reid, K., 2013, Sensitivity analysis for nitrogen inputs, nitrogen outputs, and changes in biofuel crop acreages for predicting residual soil nitrogen and nitrate leaching in Canadian agricultural soils, 267, 26-38.
- Yang J.Y, Huffman E.C., Jong R, De, Kirkwood V., MacDonald K.B. Drury C.F., 2007, Residual soil nitrogen in soil landscapes of Canada as affected by land use practices and agricultural policy scenarios: Land Use Policy, 24, 89-99.

Páginas electrónicas.

1. <http://datos.bancomundial.org>.
2. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>
3. www.anacofer.com.mx
4. www.fao.org
5. www.e-local.gob.mx/issuu.com/inesachiapas/docs/plan_de_gestion_de_la_cuenca_del_rio
6. www.e-local.gob.mx

11. ANEXOS.

ANEXO 1

Descripción edafocológica de los perfiles de suelo de los sitios Los Riegos (I y II) y La Esperanza (I y II).

Los Riegos I.

Coordenadas: 594112; 1803595 1601msnm

Uso de suelos: agrícola jitomate, vegetación Bosque de Galería (Salix)
cerca del río agüegüetes, vegetación riparia

Paisaje: piedemonte

Evidencia de erosión: laminar y splash

Material parental: material sedimentario (caliza)

Profundidad (cm)	Textura	Piedras [Vol%]	Color en Húmedo	pH (CaCl ₂ 0.01M)	Sales o C.E (µs/cm)	m.o. [%]	CaCO ₃ (%)	Humedad, pF	Estructura	Estabilidad de agregados	Poros	D.A.	Densidad de raíces	Límite	Horizonte
0-25/28	R	5% bloques y piedras	10YR 3/2	7.6	763		25-50	Fresca, 3	Granular fina, subangular en bloques mediana y gruesa de grado moderado → en bloques subangulares finos	Baja-Moderada	ex ped: muchos intersticiales Finos y Muy Finos; in ped: muchos vesiculares, intersticiales Medianos y Finos	0.93	Muy Alta	Claro-uniforme	Ap
25/28-48	R	1% bloques y piedras	2.5Y 3/1	7.6	577		0-0.5	Fresca, 3	Bloques subangulares medianos y gruesos de grado moderado → bloques subangulares finos y muy finos	Alta	ex ped: comunes intersticiales Finos; in ped: comunes intersticiales, vesiculares Muy Finos	0.96	Mediana	Claro-irregular	ABtg
48-74	R	1% bloques y piedras	2.5Y 3/2	7.7	486	-	0-0.5	Fresca, 3	Bloques angulares medianos y gruesos de grado moderado y granular → bloques angulares finos y muy finos	Moderada	ex ped: pocos intersticiales Finos; in ped: comunes vesiculares Finos	0.94	Mediana	Claro irregular	Btg
74-91	R	15% bloques y piedras	2.5Y 3/3	7.7	487	-	25-50	Fresca, 3	Bloques Angulares gruesos de grado moderado → bloques medianos, finos y muy finos	Moderada	pocos intersticiales Finos in y ex ped	1.09	Mediana	Claro-irregular	BC
2B	R	3% bloques y piedras	2.5Y 3/3	7.8	358	-	25-50	Fresca, 3	Bloques angulares gruesos de grado moderado → bloques angulares medianos, finos y muy finos	Baja	ex ped: pocos vesiculares, intersticiales Finos; in ped: pocos vesiculares Muy Finos	1.09	Baja	-	

Los Riegos II.

Coordenadas: 594174; 1803596 1601msnm

Uso de suelos: agrícola jitomate, vegetación Bosque de Galería

Paisaje: piedemonte

Evidencia de erosión: laminar y splash

Material parental: material sedimentario (caliza)

Profundidad (cm)	Textura	Piedras [Vol%]	Color en Húmedo	pH (CaCl ₂ 0.01M)	Sales o C.E (μs/cm)	m.o. [%]	CaCo ₃ (%)	Humedad, pF	Estructura	Estabilidad de agregados	Poros	D.A.	Densidad de raíces	Límite	Horizonte
0-17	R	2% cantos medianos	10YR 3/2	6.7	1260	-	-	Fresca, 3	Bloques subangulares medianos y finos de grado moderado → bloques subangulares finos de grado débil	Mediana		0.94	Extremadamente Alta	Gradual - uniforme	Ap
17-31	R	2% cantos gruesos	10YR 3/1	6.4	320	-	-	Fresca, 3	Bloques subangulares gruesos de grado fuerte → bloques subangulares medianos de grado débil	Alta		0.92	Extremadamente Alta	Gradual - uniforme	AB ₁
31-40	R	-	10YR 3/1	6.4	259	-	-	Fresca, 3	Bloques subangulares gruesos de grado fuerte → bloques subangulares medianos de grado débil	Alta		0.90	Muy Alta	Difuso-uniforme	AB ₂
40-62	R	-	10YR 3/1	6.8	383	-	-	Fresca, 3	Bloques angulares gruesos de grado fuerte → bloques subangulares medianos de grado fuerte	Alta		0.88	Alta	Difuso-uniforme	Btg
62-90	R	-	10YR 3/2	7.0	254	-	-	Fresca, 3	Bloques angulares gruesos de grado fuerte → bloques subangulares medianos de grado fuerte	Alta		0.97	Mediana	Difuso-uniforme	Btg ₂
90->100	R	-	10YR 3/2	7.1	240	-	-	Fresca, 3	Bloques subangulares gruesos de grado moderado → bloques subangulares finos débil	Alta		0.96	Muy Baja	-	Btc

La Esperanza I.

Coordenadas: 623596; 1786379 1478msnm

Uso de suelos: agrícola maíz-jitomate, vegetación riparia

Paisaje: piedemonte circundante de lomerío

Evidencia de erosión: surco, laminar y splash

Material parental: material sedimentario (caliza)

Profundidad (cm)	Textura	Piedras [Vol%]	Color en Húmedo	pH (CaCl ₂ 0.01M)	Sales o C.E (μs/cm)	m.o. [%]	CaCo ₃ (%)	Humedad, pF	Estructura	Estabilidad de agregados	Poros	D.A.	Densidad de raíces	Límite	Horizonte
0-20	R	15% gravas medianas y finas		7.4	456		2-10	Seco, 4	Subangular en bloques gruesos de grado débil → bloques subangulares finos	Moderada	ex ped: pocos tubulares medios; in ped: muchos intersticiales finos y muy finos	1.37	Bajo	Gradual-irregular	Ap
20-34	R	20% gravas medianas y finas		7.4	383		10-25	Fresca, 3	Subangular en bloques gruesos de grado débil → bloques subangulares finos	Baja	Muchos intersticiales finos y muy finos; comunes tubulares medios in y ex ped	1.42	Muy Bajo	Claro-uniforme	BCgk
34-47/60	CR	-		6.9	420	-	2-10	Fresca, 3	Bloques subangulares gruesos de grado moderado → bloques subangulares finos	Mediana-Alta	Muchos intersticiales finos; muchos tubulares muy finos y finos in y ex ped	1.36	Muy Bajo	Difuso-ondulado	2Agk
47/60->80	R	-		6.4	292	-	2-10	Humedo, 2	Masiva → bloques subangulares medianos de grado fuerte	Alta	ex ped: comunes tubulares muy finos; comunes intersticiales finos; in ped: comunes intersticiales finos	1.37	Nula	-	2Agk ₂

La Esperanza II.

Coordenadas: 623652; 1786291 1478msnm

Uso de suelos: agrícola maíz-jitomate, vegetación riparia

Paisaje: piedemonte circundante de lomerío

Evidencia de erosión: surco, laminar y splash

Material parental: material sedimentario (caliza)

Profundidad (cm)	Textura	Piedras [Vol%]	Color en Húmedo	pH (CaCl ₂ 0.01M)	Sales o C.E (μs/cm)	m.o. [%]	CaCo ₃ (%)	Humedad, pF	Estructura	Estabilidad de agregados	Poros	D.A.	Densidad de raíces	Límite	Horizonte
0-23/29	R	1% cantos finos	2.5Y 2.5/1	7.2	722		2-10	Muy seca, 2	Bloquee subangulares medianos, gruesos y muy finos de grado débil → bloques subangulares muy finos	Mediana-Moderada	ex ped: finos y muy finos comunes intersticiales y vesiculares; in ped: pocos vesiculares y tubulares	1.28	Mediana	Gradual-ondulado	Apk
23/29-49	R	-	10YR 3/1	7.3	449		0-0.5	Fresca, 3	Bloques angulares y subangulares medianos y muy finos de grado moderado → bloques angulares muy finos y finos de grado moderado	Alta	ex ped: vesiculares finos pocos; in ped: intersticiales vesiculares finos y comunes	1.38	Baja	Gradual-ondulado	BAtc
49->76	R	-	2.5Y 3/2	7.3	396	-	-	Fresca, 3	Bloques angulares y subangulares medianos y gruesos de grado fuerte → bloques angulares finos y muy finos	Muy Alta	ex ped: pocos vesiculares muy finos y finos; in ped: intersticiales pocos comunes vesiculares finos	1.44	Nula	-	Bt

Nota: → significa rompe en.

ANEXO 2.

Descripción de las hojas técnicas de las resinas catiónicas y aniónicas.

Descripción de las resinas iónicas que se usaron para el primer periodo de lluvias (Mayo-Diciembre, 2013):

RESINAS	DESCRIPCIÓN	
Aniónica	Tipo	<i>Purolite A520E, forma Cl⁻</i>
	Capacidad total	0.9 eq/l (19.7 Kgr/ft3)
	Retención de humedad	50-56%
	Rango de tamaño de partícula	300-1200 mm
Catiónico	Tipo	<i>PUROLITE C-100 E, forma Na⁺</i>
	Capacidad total	1.9 eq/l
	Retención de humedad	46-50%
	Rango de tamaño de partícula	1.2 mm < 5% - 0.3 mm < 1%
	Hinchamiento	+8%
	Rango estabilidad	0-14

Descripción de las resinas iónicas que se usaron para el segundo periodo de lluvias (Mayo-Diciembre, 2014):

RESINAS	DESCRIPCIÓN	
Aniónica	Tipo	<i>Lewatit® MonoPlus M 500 forma Cl⁻</i>
	Capacidad total	1.3 min. eq/l
	Contenido en agua % en peso	48-55
	Rango de tamaño de partícula	0.62 (+/- 0.05) mm
	Rango estabilidad	0-12
Catiónico	Tipo	<i>Lewatit® MonoPlus S 108, forma H⁺</i>
	Capacidad total	2.2 min. eq/l
	Contenido en agua % en peso	41-46
	Rango de tamaño de partícula	0.62 (+/- 0.05) mm
	Rango estabilidad	0-14

ANEXO 3.**Descripción de las Barrenas de las Muestras Compuestas del Cultivo de Maíz.****LEPTOSOLES**

Sitio:	LOS RIEGOS				
Coordenadas:	593413			1802815	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-14	10YR2/1	CRL	K4	6	NA
14-31	10YR2/1	CR	K3-K4	6	NA

Sitio:	SAN MIGUEL TINAYAB				
Coordenadas:	595656			1800017	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-14	10YR2/1	CRL	K4	6.5	NA
14-31	10YR3/1	CRL	K4	6	NA

Sitio:	CHINKULTIC				
Coordenadas:	630349			1783062	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-21	10YR2/1	CR	NA	6	NA
21-31	10YR 2/2	R	NA	6	NA

Sitio:	1RO DE MAYO				
Coordenadas:	603642			1800885	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-16	10YR2/2	CLf	NA	6	NA
16-28	10YR2/3	CLf-CRL	NA	6	PEDREGOSIDAD CANTOS MEDIANOS Y GRUESOS

LUVISOLES

Sitio:	1RO DE MAYO				
Coordenadas:	603623			1801134	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-4	10YR2/2	CRL	NA	5	NA
4-11	10YR3/3	RL	NA	5	
11-36	7.5YR2.5/3	CR	NA	5	
36->58	7.5YR3/4	RL	NA	5	15-40-NÓDULOS DE Mn, SUAVES, ESFÉRICOS Y PEQUEÑOS 1-2mm

Sitio:	ANTELA				
Coordenadas:	637568			1783260	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-8	10YR2/2	CRL	NA	5	NA
8-39	10YR3/3	CR-RL	NA	5	NA
39-65	7.5YR4/6	RL	NA	5	PEDREGOSIDAD <1% CANTOS MUY FINOS; INCIPIENTES NÓDULOS DE Mn MUY SUAVES
65->77		Cw-C			

Sitio:	OJO DE AGUA				
Coordenadas:	633585			1783710	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-10	10YR3/1	CR	NA	6,5	NA
10-23	10YR4/2	R	NA	6,5	NA
23-45	2.5Y5/2	R	NA	6,5	NA
>45	2.5Y6/1	R	NA	6,5	NA

Sitio:	OJO DE AGUA				
Coordenadas:	633344			1784507	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-10	10YR3/1	CRL	NA	6	NA
10-23	10YR4/2	CR	NA	6,5	NA
23->70	2.5Y5/1	CR	NA	6,5	NA

VERTISOLES

Sitio:	LA ESPERANZA				
Coordenadas:	620297			1788447	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-19	7.5YR2.5/1	R	NA	5	NODULOS DE Mn
19-55	10YR3/1	R	NA	6	ABUNDANTES NÓDULOS DE Mn
55-82	2.5Y2.5/1	R	NA	6,5	NA
82-91	10YR/3/1	R	NA	6	MUY POCOS NODULOS DE Mn ESFÉRICOS
91->99	10YR3/1	R	NA	7	FORMACIÓN INCIPIENTE DE NODULOS DE Fe, MUY PEQUEÑOS E IRREGULARES

Sitio:	OJO DE AGUA				
Coordenadas:	633241			1786645	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-10	10YR3/1	CR-R	K1	7	NA
10-17	10YR2/1	R	K1	7	NA
17->38	10YR2/1	CR-R	K2	7	NA

Sitio:	LOS RIEGOS				
Coordenadas:	593844			1802679	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-20	10YR3/2	R	K1	7	NA
20-58	10YR3/2	R	K1	7	NA
58-73	10YR3/2	R	K1	7	NA
73-80	10YR3/1	R	K1	7	NA
>80	7.5YR4/3	R	K2	7	NA

Sitio:	LOS RIEGOS				
Coordenadas:	604920			1790268	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-48	10YR3/2	R	K1	7	NA
48->75	2.5YR3/2	R	K1	7	NA

CHERNOZEM

Sitio:	CHICHIMA				
Coordenadas:	596394			1792286	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-49	10YR3/1	CR	K1	7	NA
49-83	10YR3/1	CR-R	NA	7	NA
83->88	10YR4/1	CRL	NA	7	NA

Sitio:	LA ESPERANZA				
Coordenadas:	621498			1786412	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-19	10YR3/1	CRL	K2	6	GRANOS FINOS DE CALIZA
19-35	7.5YR2.5/1	CRL	K2	6	GRANOS MEDIOS Y FINOS DE CALIZA 3%
35-58	10YR3/2	CRL	K3	6	GRANOS MEDIOS Y FINOS DE CALIZA 3%
58-82	10YR3/1	RL	K4-K5	6	NÓDULOS DE Mn MUY FINOS, ESFÉRICOS Y SON POCOS
82->95	10YR3/2	RL	K4	6,5	NÓDULOS DE Mn MUY FINOS, ESFÉRICOS Y SON POCOS

Sitio:	LA ESPERANZA				
Coordenadas:	624928			1785542	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-18	7.5YR3/1	CRL	K5	7	FRAGMENTOS DE CALIZA DE 1-2mm
18-40	7.5YR3/1	CRL	K4	6,5	FRAGMENTOS DE CALIZA DE 1-2mm
40-67	10YR7/1	CRL	K5	6,5	FRAGMENTOS DE CALIZA DE 1-2mm
67->103	7.5YR8/1	RL	K5	6,5	FRAGMENTOS DE CALIZA DE 1-2mm

Sitio:	LA ESPERANZA				
Coordenadas:	623147			1785969	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-22	10YR3/1	CRL	NA	6	NA
22-60	10YR3/1	CR	NA	6	CARBÓN, POCO MANCHAS ROJAS 2%, LÍMITE DIFUSO DE TAMAÑO 1mm
60-88	10YR3/1	R	NA	6	CARBÓN, POCO MANCHAS ROJAS 1%, LÍMITE DIFUSO DE TAMAÑO 1mm
88->106	10YR4/1	CR-CRL	K0-K1	5	POCAS CONCRECIONES, ESFÉRICAS, ROJO EN EL EXTERIOR Y NEGRO AL INTERIOR

FEOZEM

Sitio:	SAN RAFAEL				
Coordenadas:	623409			1784865	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-21	10YR3/2	CR	K0-K1	5	NA
21-36	2.5Y3/1	RA	NA	5	NA
36-50	2.5Y4/3	RA	NA	5	NA
50-70	2.5Y3/2	RA	NA	5	NA
70-87	2.5Y5/3	CR	K0-K1	6	NODULOS DE Mn, ESCASOS, ESFÉRICOS <1mm, CONCRECIONES DE Fe, ESCASAS <1mm
87->103	2.5Y6/3	CRA-RA	K1	6	NA

Sitio:	PORVENIR AGRARISTA				
Coordenadas:	623440			1786947	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-31	10YR3/2	CR	NA	5,5	MANCHAS ROJIZAS (2.5Y2/8) DE Fe, PEQUEÑAS E IRREGULARES
31-42	10YR5/3	RL	NA	5,5	POCAS MANCHAS ROJIZAS (2.5Y2/8) DE Fe, PEQUEÑAS <1mm
42-85	2.5Y5/3	CR-RL	NA	5,5	POCAS MANCHAS ROJIZAS (2.5Y2/8) DE Fe, PEQUEÑAS E IRREGULARES <1mm
85->103	2.5Y5/4	CR-RL	NA	5,5	MUCHAS MANCHAS ROJIZAS (2.5Y2/8) DE Fe, PEQUEÑAS E IRREGULARES >1mm; INCIPIENTES NÓDULOS DE Mn Y ESFÉRICOS

Sitio:	BUENA VISTA				
Coordenadas:	608694			1795702	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-18	7.5YR2.5/1	Cif	K1	6	NA
18-32	7.5YR2.5/1	Cif-CRL	K1	6	CANTOS MEDIOS DE CALIZA
32-49	7.5YR2.5/1	C	K1	6	CANTOS MEDIOS DE CALIZA
49-59	5YR2.5/1	C	K3	6	CANTOS MEDIOS DE CALIZA
59->76	5YR2.5/1	C	K4	6	CANTOS MEDIOS Y GRUESOS DE CALIZA

Sitio:	LA INDEPENDENCIA				
Coordenadas:	605687			1796740	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-25	10YR3/2	CR	NA	6	NA
25-40	10YR3/3	RL	NA	6	NA
40-65	10YR4/3	CR-RL	K2	6	CANTOS MEDIOS DE CALIZA
65->80	10YR5/2	CR	K2	6	CANTOS MEDIOS DE CALIZA

ANEXO 4.**Descripción de las Barrenas de las Muestras Compuestas del Cultivo de Jitomate.****LUVISOLES**

Sitio:	EL TRIUNFO				
Coordenadas:	619200			1792208	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-16	2.5YR2.5/1	CRL	K0-K1	5	NA
16-33	7.5YR2.5/1	CRL	K1	5	NA
33-50	10YR2/2	CRL	NA	5	NA
50-76	7.5YR2.5/3	CRL	NA	5	NODULOS DE Mn (10YR 2/1) <1mm, ESFÉRICOS Y SUAVES. CONCRECIONES DE Fe DE COLOR 2.5YR5/8 <1mm
76->99	7.5YR4/6	RL	NA	5	NODULOS DE Mn >1mm Y ESFÉRICOS DE COLOR 10YR3/1

Sitio:	LA PATRIA				
Coordenadas:	616055			1795547	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-16	5YR3/3	Cif-CRL	NA	5	NA
16-33	7.5YR3/3	Cif	NA	5	NA
33-58	7.5YR2.5/3	Cif	NA		NA
58-83	7.5YR3/3	CR-RL	NA	5	NODULOS DE Mn DE COLOR NEGRO <1mm, ESFÉRICOS Y SUAVES.
83->91	7.5YR4/6	RL-R	K0-K1	5	NODULOS DE Mn (10YR 2/1) <1mm, FRECUENTES E IRREGULARES; MANCHAS ROJAS COMUNES, LIMITE CLARO Y SON IRREGULARES DE COLOR 2.5YR4/8

Sitio:	EL NARANJO				
Coordenadas:	629669			1790722	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-25	10YR2/1	Clf	K2-K3	6	
25-39	7.5YR2.5/1	Clf	K2-K3	6	
39-70	7.5YR3/2	CRL	K2	6	MANCHAS DE Fe PEQUEÑAS, IRREGULARES Y DE COLOR 2.5YR3/8
70-83	2.5Y3/1	CRL-RL	K1	6	MANCHAS DE Fe PEQUEÑAS ROJAS 7.5YR5/4, IRREGULARES Y POCAS
83-100	2.5Y3/1	CRL-RL	NA	5,5	MANCHAS DE Fe ENTRE AGREGADOS 2YR 5/8, NÓDULOS DE Mn, PEQUEÑOS E IRREGULARES

Sitio:	SANTA RITA				
Coordenadas:	609829			1783311	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-34	10YR3/2	C-CR	NA	5,5	NA
34-63	10YR3/2	RA	K0-K1	5,5	NA
63-82	2.5Y5/6	RL-R	K0-K1	6	POCOS NODULOS DE Mn, <1mm, ESFÉRICOS, DÉBILES-SUAVES
82->97	2.5Y5/6	RL	NA	6	MUY POCAS MANCHAS ROJAS (2.5YR2/8) DE FE, PEQUEÑAS

VERTISOLES

Sitio:	CINTA EL ENCUENTRO				
Coordenadas:	613240			1791913	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-15	2.5YR3/1	RL	K3	6	NA
15-45	2.5YR3/2	RL-R	K3	6	MANCHAS DE COLOR ROJO-NARANJA (Fe), TAMAÑOS <1mm, SON ESCASAS Y LÍMITE DIFUSO
45-70	2.5YR3/2	R	K3	6	NA
70-96	2.5YR2.5/2	R	K3-K4	6	MANCHAS DE COLOR ROJO-NARANJA (Fe), TAMAÑOS <1mm, COMUNES Y LÍMITE CLARO; ALGUNAS MANCHAS NEGRAS <5% NEGRO EN EL INTERIOR Y ROJO CUBIERTO
96->106	2.5YR3/2	R	K3-K4	6	NA

Sitio:	CINTA EL ENCUENTRO				
Coordenadas:	613240			1791913	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-27	10YR3/1	RL	K0-K1	6,5	MANCHAS ROJAS TENUES, LIMITE CLARO, SON FINAS Y COMUNES
27-42	10YR3/1	RL	K0-K1	6,5	MANCHAS ROJAS-PARDAS TENUES, LÍMITES CLARO, SON FINAS Y ESCASAS
42-69	2.5Y4/1	R	K2	6,5	MANCHAS ROJAS TENUES, LIMITE CLARO, SON FINAS Y FRECUENTES
69-102	2.5Y4/1	R	K3	6,5	MANCHAS ROJAS-PARDAS CLARAS, LÍMITES CLAROS, SON FINAS Y FRECUENTES
102->105	10YR3/1	R	K0	6,5	NA

Sitio:	EL TRIUNFO				
Coordenadas:	619968			1789952	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-26	10YR3/1	RL	K0-K1	6	NA
26-48	10YR3/2	RL	K0	6	FORMACIÓN INCIPIENTE DE OXIDO DE Fe
48-62	10YR3/1	R	K0	7	FORMACIÓN INCIPIENTE DE OXIDOS DE Fe, NODULOS DE Mn MUY POCOS Y SUAVES
62-98	10YR3/2	RL	K0	7	NODULOS DE Mn PEQUEÑOS, SUAVES Y ESPEFOIDALES
98->102	2.5Y5/3	RL-R	K0	6	NODULOS DE Mn PEQUEÑOS, ESFEROIDALES, SUAVES Y POCOS.

Sitio:	SANTA RITA				
Coordenadas:	611305			1783836	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-36	GLE2.5/N	RL	K3-K5	6	NA
36-51	GLE2.5/N	RL	K2	6	NA
51-61	GLE2.5/N	R	K0	5,5	NA
61-99	2.5Y4/1	RL	K2	6,5	POCAS CONCRECIONES DE Mn, ESFÉRICAS DE 1-2mm DE COLOR NEGRO AL INTERIOR Y ROJO AL EXTERIOR, SUAVES. PEQUEÑOS FRAGMENTOS DE CALIZA <1mm PEQUEÑAS MANCHAS ROJAS , <1mm LIMITE DIFUSO, POCAS A COMUNES

CHERNOZEM

Sitio:	LA INDEPENDENCIA				
Coordenadas:	606125			1796797	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-23	10YR3/1	CR-RL	K5	7	NA
23-36	10YR3/2	CR	K5	6,5	NA
36-63	7.5YR3/1	RL	K5	6,5	NA
63-82	7-5YR3/1	CR	K3-K4	6,5	NA
82-94	2.5YR3/1	CR-RL	K3-K4	6	CONCRECIONES DE Fe, ESFEROIDALES, <1mm Y SUAVES
94->101	2.5YR3/1	CR-RL	FRAGMENTOS DE CALIZA	6	CONCRECIONES DE Fe, ESFEROIDALES, <1mm Y SUAVES

Sitio:	ANTELA				
Coordenadas:	617855			1791778	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-40	10YR3/1	CRL	K1	6	NA
40-63	10YR3/1	RL	K1	6	NA
63-93	7.5YR4/1	RL-R	K1	6	FRAGMENTOS DE CALIZA DE 1mm
93-107	7.5YR4/1	RL-R	K1	7	POCOS NODULOS DE Mn, ESFÉRICOS, SUAVES ENTRE 2mm-3mm

Sitio:	LA INDEPENDENCIA				
Coordenadas:	605714			1796700	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-50	10YR3/1	R	K2	7	NA
50-69	10YR4/1	R	K2	7	NA
69-88	2.5YR5/1	CR	K2	7	NA
88->100	2.5YR6/3	CR	K3	7	NA

Sitio:	EL PRADO				
Coordenadas:	605714			1796700	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-23	10YR3/1	CR	K3	7	
23-36/38	10YR4/1	CR-CRf	K3	7	CUTANES DE ARCILLA SOBRE AGREGADOS, CARBONATOS EN PIEDRITAS
>36/38	10YR5/1	CR	K3	7	

FEOZEM

Sitio:	DIVISORIA				
Coordenadas:	611496			1792443	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-19	10YR2/2	CRL	NA	6	NA
19-39	10YR3/2	CR	NA	6	NA
39-68	10YR5/2	CRL	NA	6	NA
68-80	10YR6/2	CR-CRL	NA	6	MANCHAS ROJAS EN EL EXTERIOR DE LOS AGREGADOS SON POCAS Y GRANDES <1mm Y EL LÍMITE CLARO

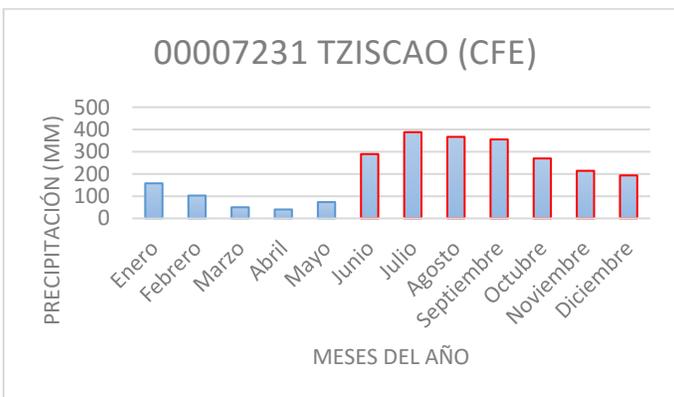
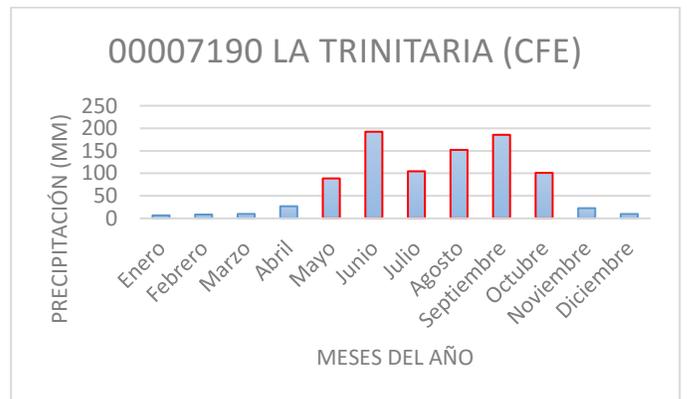
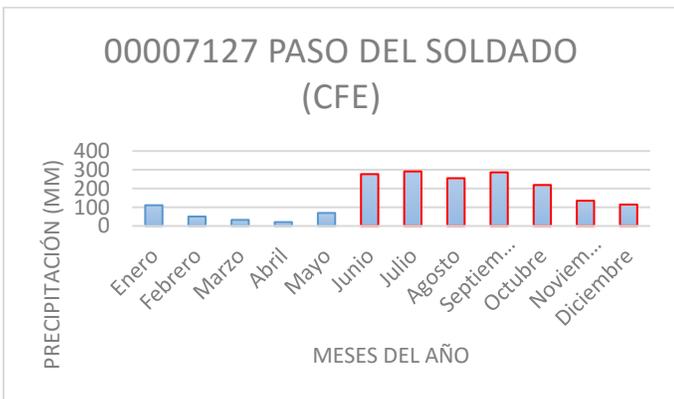
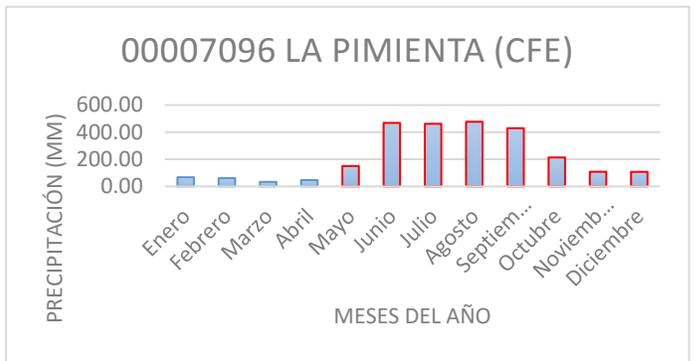
Sitio:	EL TRIUNFO				
Coordenadas:	624295			1793083	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-12	10YR3/2	Cif-CRL	K0-K1	6	NA
12-23	10YR3/2	Cif	NA	6	NA
23-41	2.5Y4/2	CRL-RL	K1	6,5	NA
41-67	2.5Y5/3	CRL-RL	K2	7	CONCRECIONES SUAVES –DURAS, DE COLOR ROJO EN EL EXTERIOR Y NEGRO EN EL INTERIOR, ESFERIDALES DE 1-5mm
67-90	2.5Y4/4	CRL-RL	K2	7	MANCHAS GRISES (GLE1 6/N), LIMITE DIFUSO, POCAS COMUNES, REGULARES E IRREGULARES; MANCHAS ROJAS DE 1-2mm, LIMITE CLARO, COMUNES, FORMA IRREGULAR CONCRECIONES DE 1-2mm, ESFÉRICAS SUAVES DE Fe Y Mn ROJAS Y NEGRAS
90->99	2.5Y4/3	RL	K2-K3	7	MANCHAS GRISES (GLE1 6/N), POCAS E IRREGULARES, 1-2mm MANCHAS ROJAS, LIMITE CLARO, CONCRECIONES DE Mn SUAVES, POCAS COMUNES DE 1-2mm

Sitio:	PORVENIR AGRARISTA				
Coordenadas:	623440			1786947	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-20	10YR3/2	RL	K1	6,5	NA
20-65	10YR5/3	CR-RL	K1	6	POCAS MANCHAS ROJIZAS (2.5Y2/8) DE Fe, PEQUEÑAS <1mm
65-85	2.5Y5/3	CR-RL	K1-K2	6	POCAS MANCHAS ROJIZAS (2.5Y2/8) DE Fe, PEQUEÑAS E IRREGULARES <1mm
85->103	2.5Y5/4	RL	K4-K5	5,5	CEMENTACIÓN DE CARBONATOS, ES DÉBIL

Sitio:	SANTA RITA "EL CAMARÓN"				
Coordenadas:	605687			1796740	
Profundidad	Color	Textura	Carbonatos	pH	Pedregosidad, Cutanes, Concreciones; Manchas y Motas
0-19	10YR4/4	AC-C	NA	6	MANCHAS ROJAS (5YR 5/8) IRREGULARES, SON POCAS Y COMUNES, ESTÁN EN LOS CANALES DE LAS RAÍCES, <1MM, IN Y EX PED, TIENEN UN LÍMITE CLARO Y DIFUSO
19-39	10YR4/4	AC	NA	5	MANCHAS ROJAS (5YR 5/8) IRREGULARES, SON POCAS Y COMUNES, ESTÁN EN LOS CANALES DE LAS RAÍCES, <1MM, IN Y EX PED, TIENEN UN LÍMITE CLARO Y DIFUSO
39-55	10YR4/4	AC	NA	5	MANCHAS ROJAS (5YR 5/8) IRREGULARES, SON POCAS Y COMUNES, EN FORMA DE LOS CANALES DE LAS RAÍCES, <1MM, TIENEN UN LÍMITE CLARO Y DIFUSO, > EX PED Y POCAS IN PED
55-72	10YR4/6	CRA	NA	5	MANCHAS COMUNES, LIMITE DIFUSO IN Y EXPED, <1MM, EN LAS CARAS DE LOS AGREGADOS
72-85	10YR5/4	RA	NA	5	MANCHAS GRISES (2.5Y 6/1) Y ROJAS, COMUNES DE FORMA IRREGULAR DE 1-2MM, IN Y EXPED
85->104	10YR5/4	RA	NA	6	MANCHAS, NEGRAS LÍMITE CLARO COMUNES, ROJAS LÍMITE DIFUSO, GRISES LIMITE DIFUSO Y POCAS, TODAS SON DE FORMA IRREGULAR Y ESTÁN IN Y EXPED DE TAMAÑO 1-2MM

ANEXO 5.

Diagramas de las precipitaciones anuales de las estaciones meteorológicas que se ubican dentro de la Cuenca del Río Grande de Comitán.



En color rojo se marcan los meses con mayor precipitación.

ANEXO 6.

Fertilizantes nitrogenados más utilizados para el cultivo de maíz y el de jitomate.

Paquete tecnológico de fertilizantes del año 2013 y 2014, SAGARPA, DISTRITO DE DESARROLLO RURAL No. 03. COMITÁN CHIAPAS.

PAQUETE TECNOLÓGICO PARA MAÍZ CICLO PRIMAVERA VERNAO (FERTILIZANTES NITROGENADOS) 2013 y 2014

CONCEPTO	UNIDAD	No. UN	PRECIO/UNIT	COSTO/HA (\$)
UREA (46-00-00)	kg	350.00	7.00	2450.00
FOSFATO DIAMONICO (18-46-00)	kg	150.00	9.60	1440.00
NPK	SD	SD	SD	SD
TRIPLE 18	SD	SD	SD	SD

SD: Sin Dato, estos fertilizantes son utilizados por el agricultor pero no están en la lista oficial del paquete tecnológico para Maíz.

PAQUETE TECNOLÓGICO PARA JITOMATE EN MALLA ANTIAFIDOS Y PARA JITOMATE A 2 GUIAS EN INVERNADERO (FERTILIZANTES NITROGENADOS) 2013 y 2014

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO/UNIT (\$)	COSTO/HA (\$)
PHYTO GROW	4lt	5	142.50	712.50
ULTRASOL 15-30-15	BULTO 25kg	10	528.00	5,280.00
ULTRASOL TOMATE	BULTO 25kg	20	504.00	10,080.00
ULTRASOL MAGNIT	BULTO 25kg	7	323.00	2,261.00
NITRATO DE CALCIO	BULTO 25kg	10	228.00	2,280.00
PHYTO GIB	200ml	10	74.00	740.00
SPEEDFOL STARTER	kg	16	57.00	912.00
TRIPLE 16	SD	SD	SD	SD
NITROFOSKA	SD	SD	SD	SD
ULTRASOL 18	SD	SD	SD	SD
FOSFATO DIAMONICO (18-46-00)	SD	SD	SD	SD
ULTRASOL NKS	SD	SD	SD	SD
ULTRASOL MAP	SD	SD	SD	SD

SD: Sin Dato, estos fertilizantes son utilizados por el agricultor pero no están en la lista oficial del paquete tecnológico para Jitomate.