



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA

**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE LA ORINA HUMANA
COMO FERTILIZANTE EN SUELO ÁCIDO Y NEUTRO
EN EL CULTIVO DEL JITOMATE**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL - SUELO

P R E S E N T A:

Q. SIBILA CONCHA SANTOS

TUTOR:

M. en I. JOSÉ LUIS MARTÍNEZ PALACIOS



INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



JURADO ASIGNADO

Presidente	Dra. Frida María León Rodríguez
Secretario	Dra. Georgina Fernández Villagómez
Vocal	M. en I. José Luis Martínez Palacios
1er. suplente	Dr. Víctor Manuel Luna Pabello
2do. suplente	M. en C. Rolando Salvador García Gómez

LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

Laboratorio de Ingeniería Ambiental, edificio 5, Instituto de Ingeniería, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

M. en I. José Luis Martínez Palacios

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A MIS PADRES FLOR Y ANTONIO

Mil gracias por todo su apoyo y por su infinito amor, sin ustedes no hubiera llegado a la cima de este reto.

A MI HERMANA ELIZABETH

Por la paciencia que me has tenido y porque siempre has estado conmigo en las buenas y en las malas.



AGRADECIMIENTOS

A la UNAM por darme la gran oportunidad de pertenecer a sus filas.

Al instituto de ingeniería y al Posgrado de Ingeniería por darme la oportunidad de ser parte de él.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada a lo largo de la maestría.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por apoyar con los recursos del proyecto PAPIIT IN123009 "Tratamiento, recuperación de nutrientes y aplicación de orina en suelo" (2009-2011).

Al Ing. Alejandro Sánchez Lomelí por ayudar a localizar el suelo y las sugerencias para controlar la plaga de mosca blanca; y al Dr. Secundino Zúñiga de Anda por permitir el muestreo en su propiedad (Rancho Puente de Tocumbo).

Al Sr. Mario César Pulido y Sr. Juan Pablo Martín por el apoyo en el muestreo del suelo en el municipio Los Reyes, Michoacán.

A la Q. Patricia Girón García y Q. Rufino Lozano del Instituto de Geología por el análisis de DRX y FRX de las muestras de suelo.

A la Universidad Autónoma de Chapingo por los análisis de color y textura de las muestras del suelo.

A la Dra. Georgina Fernández y al Dr. Víctor Manuel Luna por sus sugerencias oportunas durante los tutoriales y por los aportes que realizaron.

A la Dra. Frida María León y al M. en C. Rolando Salvador García por las sugerencias realizadas a este trabajo de tesis.



AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial al Ing. José Luis Martínez Palacios, por su gran apoyo, paciencia, sabiduría y amistad que me ha brindado a lo largo de este ciclo que concluyo.

A la familia que siempre estuvo pendiente de mis avances y apoyándome en todo momento, gracias tía Piedad, tío Carlos, Anahí y Daniel.

A todos los chicos de la generación de la maestría, pero sobre todo a la banda, Karen, Ross, Moni, Estefanía, Hiram y Alex aprendí mucho de ustedes, gracias por su amistad y por las buenas tertulias.

A mis buenos amigos Xiomara y Jorge por las porras y las buenas vibras.

A todos los chicos del cubo 218 del II, Azucena, Iván, Héctor, Víctor, Edgar y Arturo, gracias por las carcajadas, risas, enojos, berrinches, etc. pero sobre todo por la valiosa ayuda y amistad que me brindaron a lo largo de mi paso por el Instituto.

Mi agradecimiento por su entusiasmo y sugerencias, al Dr. Inocencio Rafael Madrid.

Les agradezco a los doctores del laboratorio de Acuicultura y Nutrición, Dr. Carlos, Dra. Mayra, Dra. Gisela, Dr. Cristian y Dr. Jorge, por el apoyo que me brindaron para terminar este ciclo.

Al amor de mi vida que siempre ha estado conmigo en todo momento, Chinino te amo, vales mil.



ÍNDICE

ABREVIATURAS	iv
RESUMEN	vi
1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación del estudio	3
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos particulares	5
1.4 Hipótesis	5
1.5 Alcances y limitaciones	6
2. ANTECEDENTES	
2.1 Situación del agua	7
2.2 Situación de los fertilizantes	9
2.2.1 Mercado internacional de fertilizantes	9
2.2.2 Mercado nacional de fertilizantes	11
2.3 Orina humana	12
2.3.1 Composición de la orina humana	12
2.3.2 La orina como fuente de nutrimento	14



2.3.3 Aplicación de la orina en la agricultura	16
2.3.4 Sobrevivencia de patógenos en suelo y cultivo	19
2.3.5 Inactivación de los microorganismos en la orina	20
2.3.6 Residuos farmacéuticos en la orina	21
2.4 Sanitarios secos	22
2.5 Suelo	24
2.5.1 Nutrientes del suelo	25
2.5.2 Propiedades químicas del suelo	30
2.6. Cultivo de jitomate	33
2.6.1 Características morfológicas	33
2.6.2 Requerimientos edafoclimáticos	35
2.6.3 Análisis bromatológico y valor nutricional	37

3 METODOLOGÍA

3.1 Orina humana	39
3.1.1 Recolección y almacenamiento	39
3.1.2 Caracterización	40
3.2 Suelo	41
3.2.1 Selección y localización	41
3.2.2 Recolección y almacenamiento	42
3.2.3 Secado, pulverizado y tamizado	43
3.2.4 Caracterización	44
3.3 Planta	44
3.3.1 Selección de la planta	44
3.3.2 Germinación	45
3.3.3 Polinización	46
3.4 Fertilizante mineral	46
3.5 Experimentación	47
3.5.1 Lugar de experimentación	47
3.5.2 Diseño de experimento	49
3.5.3 Descripción experimental	50
3.5.4 Mediciones durante y después del cultivo	53
3.5.5 Caracterización de suelo, planta y fruto después del cultivo	55
3.6 Análisis estadístico	55
3.6.1 Análisis de varianza	55
3.6.2 Comparaciones múltiples (Tukey)	56
3.6.3 Diseño factorial de dos factores	56



4. RESULTADOS Y SU ANÁLISIS	
4.1 Caracterización	58
4.1.1 Orina humana	58
4.1.2 Fertilizante mineral	60
4.1.3 Suelo	61
4.2 Cultivo de jitomate	63
4.2.1 Dosificación de nutrimentos	64
4.2.2 Riego	65
4.2.3 Crecimiento y producción del cultivo de jitomate en suelo neutro	65
4.2.4 Crecimiento del cultivo de jitomate en suelo moderadamente ácido	71
4.2.5 Comparación del cultivo de jitomate en suelo ácido y neutro	73
4.2.6 Condiciones ambientales del cultivo	74
4.3 Resultados y análisis del suelo después del cultivo	75
4.3.1 pH	76
4.3.2 Conductividad	77
4.3.3 Capacidad de intercambio catiónico	78
4.3.4 Bases intercambiables	79
4.3.5 Contenido de Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+ en el lixiviado del suelo	80
4.3.6 Aniones en el lixiviado del suelo	80
4.4 Contenido de N, K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en jitomate	81
4.5 Contenido de Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+ en planta	82
4.6 Análisis estadístico	83
4.6.1 Análisis de varianza	83
4.6.2 Comparaciones múltiples (Tukey)	84
4.6.3 Diseño factorial de dos factores	84
5. CONCLUSIONES	86
6. REFERENCIAS	89



ABREVIATURAS

ac	medio acuoso
BI	Bases intercambiables
Ca ²⁺	Calcio
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
Cmol	Centimol
DE	Desviación estándar
EEA	Espectrofotometría de absorción atómica
ha	hectárea
HR	Humedad relativa
IL	Intensidad luminosa
K ⁺	Potasio
kg	kilogramo
LD	Límite de detección
L	litro
mg	miligramo
Mg ²⁺	Magnesio
MO	Materia orgánica
N	Nitrógeno



Na ⁺	Sodio
NH ₄ ⁺	ión amonio
NO ₂ ⁻	ión nitrito
NO ₃ ⁻	ión nitrato
PO ₄ ³⁻	ión fosfato
SA	Suelo moderadamente ácido
SN	Suelo neutro
T	Temperatura
T0	Suelo sin tratamiento
T1-A	Tratamiento con agua en suelo ácido
T2-A	Tratamiento con dosis uno de orina en suelo ácido
T3-A	Tratamiento con dosis dos de orina en suelo ácido
T4-A	Tratamiento con fertilizante mineral en suelo ácido
T1-N	Tratamiento con agua en suelo neutro
T2-N	Tratamiento con dosis uno de orina en suelo neutro
T3-N	Tratamiento con dosis dos de orina en suelo neutro
T4-N	Tratamiento con fertilizante mineral en suelo neutro



RESUMEN

La problemática de la escasez de agua cada día es más inminente, por lo que hay que crear conciencia del uso y reuso de la misma con la finalidad de reducir los volúmenes de extracción de las diferentes fuentes de abastecimiento para disminuir la sobreexplotación existente.

Una manera de apoyar lo anterior es separar los residuos de la fuente que los genera y darles un uso conforme a las características que los identifican. Tal es el caso de la orina humana, residuo antropogénico que requiere gran consumo de agua con calidad potable para disponerlo. Este residuo contiene nutrimentos como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio que son requeridos en el crecimiento de las plantas. En diversos países, el uso de la orina ya ha sido motivo de investigación en varios cultivos. Este residuo se encuentra en todas las sociedades, no tiene costo y constituye el 1% de las aguas residuales.

En este estudio evaluó el uso de la orina humana en un cultivo de jitomate (*Lycopersicon esculentum*) variedad “saladette” bajo condiciones de invernadero; de esa forma, y con base en los antecedentes de estudio, se decidió llevar a cabo un diseño factorial de dos factores con 2 y 4 niveles, es decir, se experimentó con dos suelos (ácido y neutro) y cuatro dosis, para comparar el crecimiento de una planta al regar el suelo con agua destilada exclusivamente, con dos dosis de orina diluidas y dosificando fertilizante mineral con contenidos semejantes de nitrógeno total a la dosis uno de orina. La concentración de nitrógeno total aplicada fue de 634.5 y 1269 mg de N_{total} , respectivamente.

Con base en toda la experimentación y el respectivo análisis realizado, se sugiere la orina humana como “fertilizante” alternativo, debido a que es rica en nitrógeno y contiene otros nutrimentos requeridos por las plantas como potasio, calcio y magnesio; en cuanto a rendimiento, la dosificación de orina humana es comparable a la de un fertilizante mineral, con respecto a nitrógeno dosificado; además de tener algunas ventajas sobre éste último, debido a que al estar en estado líquido se facilita la manipulación, el costo es mínimo y al separarlo de la fuente que lo genera se ahorra una cantidad considerable de agua potable y se evita la contaminación de cuerpos de agua superficiales. Pero no hay que dejar a un lado que todavía falta mucho por hacer, como concientizar a la gente para la aceptación de este residuo y hacer uso de éste con el debido cuidado, ya que es posible ocasionar una fuente de contaminación por patógenos y otros constituyentes que deben tomarse en cuenta.

ABSTRACT

The problem of water scarcity is becoming increasingly imminent, so you have to create awareness of the use and reuse of the same in order to reduce extraction volumes of the different sources of supply to reduce the existing exploitation.

One way to support this is to separate waste from the source that generates and give them a use according to the characteristics that identify them. Such is the case of human urine, anthropogenic waste that requires high water quality safe for disposal. This waste contains nutrients such as nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium which are required in the growth of plants. In several countries, the use of urine and has been the subject of research in various crops. This residue is found in all societies, no cost and accounts for 1% of the wastewater.

This study evaluated the use of human urine in a culture of tomato (*Lycopersicon esculentum*) variety "saladette" under greenhouse conditions, in that way, and based on the background of study, decided to conduct a factorial design two factors 2 and 4 levels,

in other words, experimented with two soils (acid and neutral) and four doses, to compare the growth of a plant by watering the soil with distilled water only, with two doses of diluted urine and fertilizer dosing mineral content of total nitrogen similar to a dose of urine. The concentration of total nitrogen applied was 634.5 and 1269 mg N, respectively.

Based on all the relevant testing and analysis, human urine is suggested as "fertilizer" alternative because it is rich in nitrogen and contains other nutrients required by plants, in terms of performance, this is comparable with those of mineral fertilizer, as well as having some advantages over the latter due to being in the liquid state for easy handling, no cost and to separate it from the source that generates it saves a considerable amount of drinking water and prevents pollution of receiving bodies. But do not put aside that much remains to be done as raise awareness for the acceptance of this waste and use it with due care because it may cause a source of contamination by pathogens and other constituents to be taken into account.



1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La situación del agua está cobrando especial relevancia dadas las condiciones de escasez en nuestro territorio, inclusive ya es un asunto prioritario en los programas de trabajo de los diferentes órdenes de gobierno en nuestro país, particularmente en lo que concierne al suministro de agua potable a la población y al tratamiento de las aguas residuales. De igual forma, es necesario incrementar el reúso del agua, con el fin de reducir los volúmenes de extracción de las diferentes fuentes de abastecimiento para disminuir su sobreexplotación.

En la agenda actual del gobierno es prioridad el abastecimiento, fomentar el ahorro, el tratamiento y el reúso del preciado líquido; todo lo anterior está planteado en el Programa Nacional Hídrico 2007-2012 en el que se asume como premisa básica la búsqueda del desarrollo humano sustentable, es decir, que todos los mexicanos tengan una vida digna sin comprometer el patrimonio de las generaciones futuras. En este contexto, el adecuado manejo y preservación del agua cobra un papel fundamental, dada su importancia en el bienestar social, el desarrollo económico y la preservación de la riqueza ecológica de nuestro país (SEMARNAT, 2008).



La separación de la orina y el reciclo de los nutrimentos antrópicos como fertilizantes en la agricultura se considera como la tecnología de mayor innovación para mejorar la administración de las aguas residuales urbanas de forma sustentable. La aceptación por los consumidores será la clave para introducir esta tecnología.

En los países desarrollados se invierten recursos desde hace más de quince años para minimizar el consumo de agua mediante el desarrollo tecnológico de los sanitarios ecológicos (sanitarios secos), al tratamiento de corrientes domésticas separadas y al reciclo de nutrimentos en la agricultura (Kirchmann y Petterson, 1995). Con ese enfoque es claro que se avanzará en el aprovechamiento sustentable de los recursos, y que los países en desarrollo deberán seguir el ejemplo para evitar el rezago y la dependencia tecnológica. Es inminente que la demanda de nutrimentos seguirá incrementándose, por lo que se deben aprovechar aquellos recursos naturales como la orina que contiene la mayor parte de los nutrimentos que caracterizan el agua residual y representa menos del 1 % del volumen de ésta. Vinnerås y Jönsson (2002) indica que si todos los desechos de los baños se reciclaran en la agricultura, entre el 75 % y el 85% del nitrógeno, fósforo y potasio generado en los hogares se utilizaría como un recurso, en vez de ser un contaminante potencial para el ambiente.

Al separar la orina de las heces y del agua residual se obtiene un fertilizante conteniendo macronutrientes, de esa forma es aprovechado en la agricultura, protegiendo los cuerpos de agua (ríos, lagos y mares) de una sobre-fertilización por la disposición de las aguas residuales. Es decir, que cuando un cuerpo de agua recibe exceso de nutrimentos, como puede ser la presencia de nitrógeno y fósforo, se generan cambios desastrosos para el ecosistema. Mientras que los nutrimentos de la orina dispuestos en ecosistemas acuáticos pueden ser dañinos, estos mismos nutrimentos están perfectamente balanceados como un fertilizante completo y listo para aplicarse en las plantas y enriquecerlas con elementos esenciales para su crecimiento (Castillo, 2002).

Algunos autores como Pradhan, Heinonen – Tanski, Mnkeni, entre otros reportan que la orina se ha utilizado para fertilizar una variedad de vegetales, como son: pepino, jitomate, col, lechuga, maíz, trigo, betabel, etc; en la mayoría de ellos los resultados fueron por lo menos igual o mejor en comparación con el uso de fertilizante comercial.

Dada la presente crisis ambiental a nivel global, el daño a los ecosistemas acuáticos, la contaminación, la escasez de alimentos, los costos elevados de fertilizantes industriales y



la decreciente fertilidad del suelo, es esencial que los nutrimentos que contienen los residuos domésticos se incorporen al suelo.

Se ha demostrado que los sanitarios ecológicos son factibles económicamente, y ambientalmente sustentables; sin embargo, los factores culturales dificultan su selección porque no se han estudiado con el detalle que el caso requiere (Nawab et al., 2006).

En México ya se comenzó a implementar los baños secos, en el año 2006 se instalaron 500 baños secos en clínicas, hospitales y en oficinas del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). El IMSS ha dado la oportunidad de probar sistemáticamente y se espera no sólo instalar baños secos en sus clínicas del Distrito Federal, sino también en todo el país. Aunque la variante de estos baños es que la orina se vierte directamente al drenaje y no es separada; pero esto es un primer paso hacia una alternativa para el ahorro del agua en nuestro país.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Actualmente el Municipio de Los Reyes, Michoacán se caracteriza porque es el principal exportador de zarzamora a Estados Unidos y parte de Europa, debido a este crecimiento en la exportación de la fruta y a las exigencias de inocuidad por los países consumidores ha surgido el interés de los comercializadores por exportar fruta que cumpla con todos los estándares de calidad establecidos.

La problemática que está presentando el valle de Los Reyes se debe a que en época de la cosecha de la fruta llegan a trabajar a la zona alrededor de 10 mil personas en un área de 3500 hectáreas, por lo que los propietarios y/o arrendadores de las parcelas les disponen en campo servicios sanitarios para sus necesidades fisiológicas, los cuales pueden ser móviles o fijos, y que se incrementan o disminuyen dependiendo de la época del cultivo. Los residuos líquidos y sólidos del servicio de baño son recolectados por varias empresas, transportados en camiones cisterna y dispuestos en sitios inapropiados. Tal procedimiento de disposición puede ocasionar contaminación de suelo y de cuerpos de agua superficial, poniendo en riesgo la calidad del producto (Martínez y Monje, 2009).

Debido a la existencia de problemáticas como la descrita, se plantea el uso de la orina humana como sustituto de los fertilizantes minerales, aunque en este trabajo de tesis se

va a utilizar la planta de jitomate por el rápido crecimiento, de tres a cuatro meses, comparado con el cultivo de zarzamora, superior a un año.

Es por todo esto, que en este trabajo de tesis se propuso investigar el comportamiento de la orina en el crecimiento de una planta de cultivo agrícola (jitomate) y analizar el efecto en las características de dos tipos de suelo (ácido y neutro), particularmente porque el mayor contenido de nitrógeno en la orina se encuentra constituyendo la urea, la cual al hidrolizarse produce CO_2 y NH_3 , los cuales tienden a modificar el pH a condiciones básicas. De ser posible esa aplicación y el uso de los residuos, se reduciría sustancialmente el consumo de agua potable que se utiliza para la dilución y el arrastre de los residuos que es significativo con respecto a los otros usos de dilución que se da al preciado fluido.



1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de dosificar orina humana como fertilizante a suelo neutro y ácido en el cultivo del jitomate bajo condiciones de invernadero, comparando en condiciones semejantes de dosis de nitrógeno con la aplicación de fertilizante mineral y con riego sin fertilizar.

1.3.2 Objetivos particulares

- Valorar el efecto de dos dosis de orina humana en condiciones de invernadero por el crecimiento y producción del cultivo de jitomate en dos tipos de suelo
- Comparar pH, conductividad, capacidad de intercambio catiónico e iones intercambiables del suelo antes y después del cultivo de jitomate por efecto de la orina humana
- Evaluar el comportamiento de iones como NO_2^- , NO_3^- y PO_4^{3-} en el lixiviado del suelo por la aplicación de orina humana
- Valorar si la aplicación de la orina humana sirve como enmienda edáfica al modificar el pH del suelo

1.4 HIPÓTESIS

Es posible utilizar la orina humana como fertilizante, por su contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, en el cultivo de plantas como el jitomate

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

De acuerdo con los antecedentes del estudio, se aplicará en condiciones de invernadero una dosis de orina comparable con fertilizante mineral por el contenido de nitrógeno en un diseño de experimentos, donde se evalúe estadísticamente el efecto de regar sin abonar, abonando con orina y con fertilizante mineral.



1

ANTECEDENTES

En este capítulo se hace referencia a los fundamentos que preceden a este trabajo de tesis. Se describen de manera general los objetivos que el Gobierno Federal plantea en el Programa Nacional Hídrico 2007 – 2012 con la finalidad de fomentar el ahorro y reúso del agua. Se incluye el uso de la orina humana (oro líquido) como fertilizante, la cual se utiliza en diferentes tipos de cultivo y las condiciones de aplicación reportadas. Además, se incluye la revisión bibliográfica del suelo, así como algunas de sus propiedades más importantes. Y, por último, se incluyen las características de la planta de jitomate, así como las condiciones ambientales óptimas para el crecimiento de esta hortaliza.

2.1 SITUACIÓN DEL AGUA

La situación del agua está cobrando especial relevancia dadas las condiciones de escasez en nuestro territorio, inclusive ya es un asunto prioritario en los programas de trabajo de los diferentes órdenes de gobierno en nuestro país, particularmente en lo que concierne al suministro de agua potable a la población y al tratamiento de las aguas residuales. De igual forma, es necesario incrementar el reúso del agua, con la finalidad de reducir los volúmenes de extracción de las diferentes fuentes de abastecimiento para disminuir la sobreexplotación existente.



En la agenda actual del gobierno es prioridad el abastecimiento, fomentar el ahorro, el tratamiento y el reúso del preciado líquido; todo lo anterior está planteado en el Programa Nacional Hídrico 2007-2012 en el que se asume como premisa básica la búsqueda del desarrollo humano sustentable, es decir, que todos los mexicanos tengan una vida digna sin comprometer el patrimonio de las generaciones futuras. En este contexto, el adecuado manejo y preservación del agua cobra un papel fundamental, dada su importancia en el bienestar social, el desarrollo económico y la preservación de la riqueza ecológica de nuestro país. (SEMARNAT, 2008).

Los ocho objetivos que plantea el Programa Nacional Hídrico 2007 – 2011 son los siguientes:

1. Mejorar la productividad del agua en el sector agrícola.
2. Incrementar el acceso y calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
3. Promover el manejo integrado y sustentable del agua en cuencas y acuíferos.
4. Mejorar el desarrollo técnico, administrativo y financiero del Sector Hidráulico.
5. Consolidar la participación de los usuarios y la sociedad organizada en el manejo del agua y promover la cultura de su buen uso.
6. Prevenir los riesgos derivados de fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos y atender sus efectos.
7. Evaluar los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico.
8. Crear una cultura contributiva y de cumplimiento a la Ley de Aguas Nacionales en materia administrativa.

De los ocho objetivos propuestos en el Programa, dos de los mismos enfatizan la importancia de dar una mayor cobertura del servicio, así como de fomentar el ahorro y el reúso del agua, pero en ninguno se plantea investigar otras alternativas para disminuir su consumo y/o desperdicio, aunque en el segundo objetivo plantean que las organizaciones como los institutos de investigación y desarrollo participen para evaluar y proponer tecnologías que contribuyan a hacer más eficiente el uso del agua.

La CNA (2007), reporta que en 1950 se disponía en México de $18,035 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de agua y que para 2006 disminuyó a $4,136 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ año}^{-1}$; tal disminución en la disponibilidad se atribuye, entre otras causas, a mayor cobertura en zonas urbanas y



rurales, a fugas en las redes de distribución y a la sobre explotación y contaminación de las fuentes de abastecimiento.

El uso de las aguas residuales se practica actualmente en varias regiones del mundo. Existen varias razones que lo impulsan. La escasez del agua y el continuo crecimiento de la población, especialmente en áreas urbanas, ha forzado un desarrollo hacia la sobre utilización de los escasos recursos hídricos y los recursos de fertilización para cultivos. Dada la presente crisis ambiental a nivel global, el daño a los ecosistemas acuáticos, la contaminación, la escasez de alimentos, los costos elevados de fertilizantes industriales y decreciente fertilidad del suelo y todo esto aunado a la escasez del agua, es esencial que los nutrimentos que contienen los residuos domésticos se incorporen al suelo. El recuperar y aprovechar la orina en cultivos, por sus características de contenido de nutrimentos, es una alternativa que ayudaría a reducir sustancialmente el consumo de agua potable que actualmente se desperdicia como medio de dilución y transporte de dichos “residuos”.

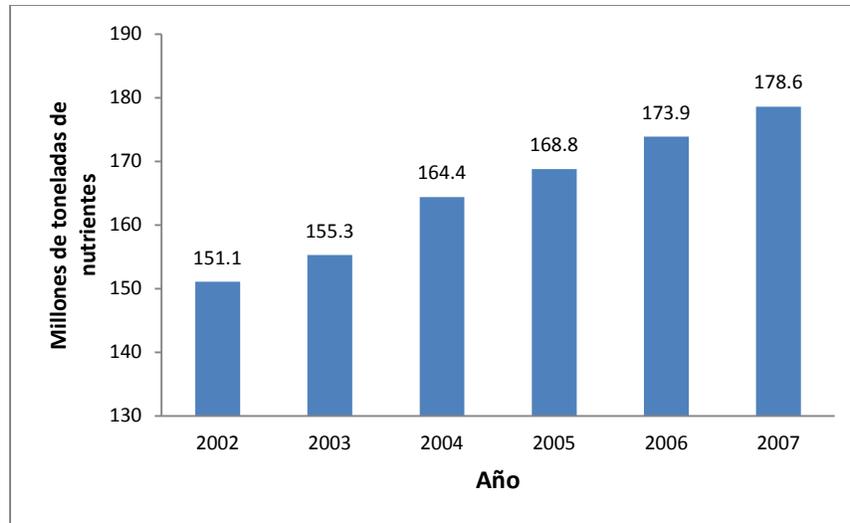
2.2 SITUACIÓN DE LOS FERTILIZANTES

Los fertilizantes contienen nutrimentos esenciales para las plantas, los cuales se incorporan para aumentar su fertilidad natural. Cuando se aplican los fertilizantes adecuados suele presentarse una considerable mejora, tanto en la calidad como en la cantidad de las cosechas (Thompson y Thompson, 1988).

Se ignora en qué época comenzó el hombre a utilizar los fertilizantes. Hace siglos, en Europa se utilizaron los esqueletos de animales, la sangre, las cenizas de madera y el estiércol comúnmente como fertilizantes. Los huesos de los animales se empleaban como fertilizantes de fósforo, y las cenizas de madera como fuente de potasio (Dickson, 1980).

2.2.1 Mercado internacional de fertilizantes

La producción de los fertilizantes mantiene una tendencia creciente. De acuerdo con información de la Asociación Internacional de la industria de los Fertilizantes (IFA), entre 2002 y 2007 la oferta global creció a una tasa media anual del 3.4%. En dicho periodo, la producción fue en promedio de 165.3 millones de toneladas de nutrimentos: nitrógeno, fósforo y potasio (ver figura 2.1).



Fuente: FIRA, 2008

Figura 2.1 Producción mundial de fertilizantes 2002 – 2007

Los principales productores de fertilizantes son: China (22.4%), Estado Unidos (11.9%), India (9.4%), Canadá (8.7%) y Rusia (8.6%). En las estadísticas internacionales, México, aparece en el lugar 36, con 0.4% de la producción mundial.

La urea es el fertilizante de mayor uso a nivel global; su producción en 2007 se incrementó 6.6% para alcanzar 144 millones de toneladas. China contribuyó con dos tercios del incremento mundial (FIRA, 2008).

El 59% de los fertilizantes utilizados a nivel mundial son nitrogenados, el 24% fosfatados y el 17% potásicos. En 2007 el consumo de fertilizantes aumentó considerablemente, impulsado principalmente por los altos precios de los productos agrícolas básicos y por la fuerte política de apoyo al uso de estos insumos en muchos países asiáticos.

El consumo de nitrógeno como fertilizante a nivel mundial continuamente se incrementa. Tan solo de 1960 (10 Mt) a 1990 (90 Mt) aumentó nueve veces el consumo de nitrógeno (Mulder, 2003), lo que indica que la demanda será mayor cada vez, y que se deben aprovechar mejor aquellos recursos que los contienen como la orina, que en la actualidad se desechan con el correspondiente desperdicio de agua potable. Además de importarse la roca fosfórica para la producción de fertilizantes fosfatados, los lodos residuales que se generan son altamente contaminantes, particularmente por las condiciones ácidas de disposición y por los metales pesados que éstos contienen (Jönsson, 2004).

2.2.2 Mercado nacional de fertilizantes

A partir de 1992, después de la privatización de fertilizantes Mexicanos (FERTIMEX), la producción nacional de fertilizantes se concentró en productos nitrogenados, principalmente urea, sulfato de amonio y nitrato de amonio. En 1995, la urea fue el fertilizante de mayor producción, con 35.3% del volumen, en tanto que el sulfato de amonio representó el 22.3%. En general, la producción de fertilizantes en 2001 disminuyó 64.3% con relación a 1994, y entre 2002 y 2007 mantuvo una tendencia más o menos estable, con un promedio de 0.75 millones de toneladas (FIRA, 2008).

A partir de 2003, el consumo aparente se ha mantenido únicamente alrededor de 21% del consumo nacional en promedio de 3.7 millones de toneladas de fertilizantes. De esta forma, con la producción nacional se abastece únicamente alrededor de 21% del consumo nacional aparente. De los 21.4 millones de hectáreas que se cultivan anualmente en México, sólo 10.2 millones se fertilizan, lo que representa el 47.7% de la superficie sembrada. Asimismo, la utilización de fertilizantes sólidos es mucho mayor que el uso de líquidos y gases; estas últimas fuentes se utilizan en zonas altamente tecnificadas como el Bajío – Guanajuato, Valle de Sinaloa y Valle del Yaqui – Sonora.

De acuerdo con la Asociación Nacional de Comercializadores de Fertilizantes (ANACOFER), desde 1992 ocurrió un cambio en el consumo de fertilizantes en México. En la actualidad se utiliza más fósforo y potasio que en 1992 y se ha reducido ligeramente el consumo de nitrógeno. Además, se ha sustituido el uso de productos de baja concentración por los de alta: más urea que sulfato de amonio y más fosfato diamónico que superfosfatos. Actualmente, es mayor la disponibilidad, variedad y calidad de los fertilizantes que se consumen en relación a la situación en 1992 (FIRA, 2008).

Dado que la producción nacional de fertilizantes se redujo considerablemente, el consumo ha tenido que ser abastecido principalmente por medio de las importaciones; este volumen se compone principalmente de urea (41.9%), fosfato diamónico (14.3%) y cloruro de potasio (7.9%).

Cabe mencionar que para el caso del fósforo, el aprovechamiento de las fuentes orgánicas adquiere especial relevancia cuando se considera que las reservas mundiales de rocas fosfóricas, de las cuales hasta el 60% se ubican en Marruecos, el resto en China y algo en Estados Unidos, con el ritmo actual de consumo mundial, el cual es de 85



millones de toneladas y 14 millones de toneladas de fósforo por año, las reservas se agotarán en los próximos 50 o 60 años (Rosemarin, 2003).

2.3 ORINA HUMANA

Las excretas se componen de heces y orina, ambos son productos de desecho del metabolismo del cuerpo. Cada persona produce en promedio 1.5 L de orina por día, al año de 400 a 500 L y unos 50 kg de heces base húmeda y descarga en un año del orden de 15,000 litros de agua potable para tal propósito (Winblad y Simpson 2004).

2.3.1 Composición de la orina humana

La orina es un líquido que es secretado en los riñones, pasa a la vejiga y se desecha por la uretra. Representa la vía principal de eliminación de sustancias solubles no volátiles que resultan del catabolismo nitrogenado. Es de color amarillo, más o menos claro; su componente principal es el agua (95%) que lleva disuelta varias sales (cloruro de sodio, sulfatos, fosfatos, urea, ácido úrico, amoníaco, etc.) y algunas sustancias colorantes como urocromo y urobilina (Sopena, 1980). La composición química de la orina humana depende de varios factores como son: hábitos alimenticios, la cantidad de agua que se ingiere, actividad física, talla, factores del ambiente, etc. (Pradhan et al., 2007).

Como se observa en la tabla 2.1 la composición química de la orina de una persona adulta contiene alta concentración de nutrimentos, los cuales se diluyen casi al 100% cuando son desechados al alcantarillado. Del consumo diario de los alimentos, se observa que los nutrimentos predominantes son el N, P, S, K, Mg, del cual una fracción sustancial está contenida en la orina. Por lo tanto, las aguas residuales domésticas son la fuente dominante de nutrimentos, y el control de las mismas (recolección de orina y heces) daría lugar a una composición de agua residual completamente diferente y, por lo tanto, los requerimientos para el tratamiento de las aguas residuales en las plantas serían otros (Larsen y Gujer, 1996).

Tabla 2.1. Producción típica y composición de la orina humana (persona adulta).

Parámetro	Unidad	Promedio	Parámetro	Unidad	Promedio
Flujo	l día ⁻¹	1.25	Azufre total	g S día ⁻¹	1.3
pH	-	6.2	SO ₄ ²⁻	g S día ⁻¹	1.2
Nitrógeno	g N día ⁻¹	11.5	Ca ²⁺	mg Ca día ⁻¹	210
N-Urea	g N día ⁻¹	9.6	Mg ²⁺	mg Mg día ⁻¹	120
Fósforo total	g P día ⁻¹	1.2	Na ⁺	g Na día ⁻¹	5.2
H ₂ PO ₄ ⁻	g P día ⁻¹	1.1	K ⁺	g K día ⁻¹	2.7
HCO ₃ ⁻	g día ⁻¹	~ 0	Cl ⁻	g Cl día ⁻¹	4.8

Fuente: Larsen y Gujer, 1996

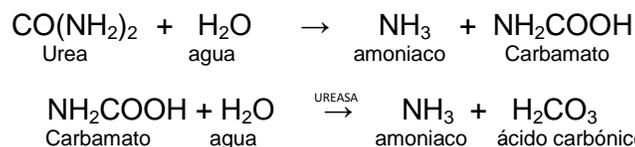
La orina animal, al igual que la orina humana contiene N, P y K y otros nutrimentos. En la tabla 2.2 se incluye la caracterización de la orina de vaca en dos diferentes años:

Tabla 2.2. Caracterización de la orina de vaca

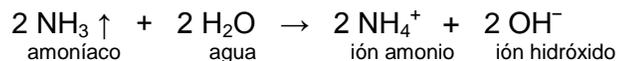
Año	Volumen (l)	N total (mg l ⁻¹)	K (mg l ⁻¹)	S (mg l ⁻¹)	P (mg l ⁻¹)	Ca (mg l ⁻¹)	Mg (mg l ⁻¹)	pH
1996	2.6	7300	2502	110	3	8	13	7.6
1997	1.9	10000	5062	230	3	56	49	8.0

Fuente: Silva et al., 2005

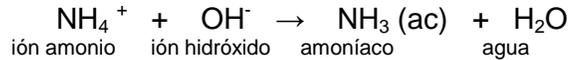
La orina contiene sustancias de bajo peso molecular y al momento de la excreción, el pH de la orina está generalmente alrededor de 6, pero puede variar entre 4.5 y 8.2. En la orina fresca el 75 – 90% del nitrógeno excretado aparece en forma orgánica como urea [CO(NH₂)₂] y el resto como creatinina, aminoácidos y ácido úrico. La urea se hidroliza porque es catalizada por la ureasa, una enzima que poseen muchos microorganismos. Durante la hidrólisis el pH cambia (6.0 a 9.3) y iones como amonio y bicarbonato se producen (Ganrot, 2005; Hellström et al., 1999; Mobley y Hausinger, 1989).



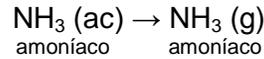
De la reacción se observa que se produce amoníaco, el cual es un gas que está en equilibrio con el sistema acuoso como se muestra en la siguiente reacción, por lo que se confirma que hay pérdidas de nitrógeno.



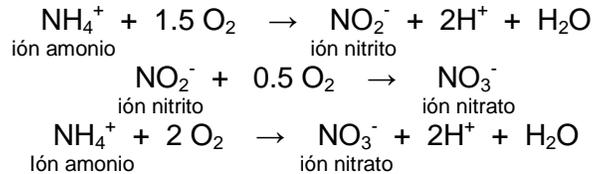
El ión amonio se encuentra en equilibrio con el amoníaco disuelto. El valor de pKa en el equilibrio es de 9.3 a 25 °C.



El amoniaco disuelto está en equilibrio con el amoniaco gaseoso:



El amonio cuando es aplicado al suelo es oxidado (por la actividad microbiana) a nitrato en pocos días, como se indica en las siguientes reacciones (Niwigaba, 2007).



2.3.2 La orina como fuente de nutrimento

Las determinaciones realizadas a la orina y heces indican que una persona produce anualmente entre 2.5 a 4.3 kg de nitrógeno, 0.7 a 1.0 kg de fósforo y 0.9 a 1.0 kg de potasio; mientras que en el caso de las heces se generan de 0.5 a 0.7 kg de nitrógeno, 0.3 a 0.5 kg de fósforo y 0.1 a 0.2 kg de potasio (Kirchmann y Petterson, 1995). En la tabla 2.2 se muestra una estimación de los nutrimentos contenidos en la orina y heces per capita en diferentes países.

Tabla 2.2. Estimado de los nutrimentos de las excretas per cápita de diferentes países

País	Índice de excretas (kg / persona por año)					
	Orina			Heces		
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
China	3.5	0.4	1.3	0.5	0.2	0.5
Haíti	1.9	0.2	0.9	0.3	0.1	0.3
India	2.3	0.3	1.1	0.3	0.1	0.4
Sudáfrica	3.0	0.3	1.2	0.4	0.2	0.4
Uganda	2.2	0.3	1.0	0.3	0.1	0.4

Fuente: WHO, 2006.

Con base en la tabla 2.2, el nitrógeno contenido en la orina es un excelente fertilizante que se encuentra disponible para las plantas, lo cual se ha confirmado en estudios agronómicos. El P, K y S en la orina se excreta en forma de iones, la misma forma en la que se encuentran presentes en los fertilizantes químicos. Los iones quedan directamente disponibles para las plantas y el valor de P, K y S en la orina es el mismo que el proporcionado por los fertilizantes químicos (Kirchmann y Petterson, 1995).



Como se citó, la orina se hidroliza debido a la presencia de la ureasa y el pH de ésta se eleva a 9.0 – 9.3 y a este pH los iones como amonio, calcio, magnesio y fosfato precipitan como estruvita $[(NH_4)Mg(PO_4) \cdot 6H_2O]$ y apatita $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ (Jonsson et al., 2004). Por lo que se ha estudiado la posibilidad de recuperar nutrientes en forma sólida de la orina humana, como es el caso de la estruvita, que se forma por reacción de magnesio con fosfato en presencia de amonio en una relación molar 1:1:1, en este proceso el 88% del precipitado presente es estruvita, pero también existen otros minerales que pueden formarse, tales como, epsomita ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), brucita ($Mg(OH)_2$), y ontgomerita ($Ca_4MgAl_4(PO_4)(OH)_4 \cdot 12H_2O$), que pueden formarse dependiendo de las cantidades de cationes divalentes o trivalentes disponibles en la orina (Karak y Bhattacharyya, 2011). Otros procesos que se han investigado para la recuperación de nutrientes sólidos incluyen la congelación y la adsorción en zeolitas y carbón activo. Lo anterior puede dar lugar a la producción futura de fertilizantes comerciales procesados de la recuperación de nutrientes sólidos de la orina humana (Niwagaba, 2007)

La separación de la orina y el reciclo de los nutrientes antrópicos como fertilizantes en la agricultura se considera como la tecnología de mayor innovación para mejorar la administración de las aguas residuales urbanas de forma sustentable. La aceptación por los consumidores será la clave para introducir esta tecnología. Dicha separación de las excretas se realiza mediante baños secos, de los cuales se habla en el inciso 2.4.

En los países desarrollados se invierten recursos desde hace más de quince años para minimizar el consumo de agua mediante el desarrollo tecnológico de los sanitarios ecológicos (sanitarios secos), en el tratamiento de corrientes domésticas separadas y el reciclado de nutrientes en la agricultura (Kirchmann y Petterson, 1995). Con ese enfoque es claro que se avanzará en el aprovechamiento sustentable de los recursos, y que los países en desarrollo deberán seguir el ejemplo para evitar el rezago y la dependencia tecnológica. Es inminente que la demanda de nutrientes se seguirá incrementando y deben aprovecharse aquellos recursos naturales como la orina que los contienen. La orina contiene la mayor parte de los nutrientes que caracterizan el agua residual, y constituye el 1% del volumen de ésta (Höglund et al., 2002), y corresponde al 80% de nitrógeno contenido en el agua residual (Karak y Bhattacharyya, 2011). Vinnerås y Jönsson (2002) indica que si todos los desechos de los baños se reciclaran en la agricultura, entre el 75% y 85% del nitrógeno, fósforo y potasio generado en los hogares se utilizaría como un recurso, en vez de ser un contaminante potencial para el ambiente.



Los Suecos utilizan la orina humana como abono en sus cultivos debido al contenido de nutrimentos que ésta tiene, y consideran que podría reemplazar al 19, 20 y 29% del N, P y K, respectivamente, de los fertilizantes minerales aplicados. Se estima que si se reciclara mundialmente la orina y las heces humanas, se ahorrarían la tercera parte del nitrógeno y la cuarta parte del fósforo que se usan en la agricultura (Rosemarin, 2003).

Al separar la orina de las heces y del agua residual se obtiene un fertilizante nutritivo y de esa forma se protegen los cuerpos de agua (ríos, lagos y mares) de una sobre-fertilización. Es decir, que cuando un cuerpo de agua recibe exceso de nutrimentos, como puede ser la presencia de nitrógeno y fósforo, se generan cambios desastrosos para el ecosistema. Mientras que los nutrimentos de la orina dispuestos en ecosistemas acuáticos pueden ser dañinos, estos mismos nutrimentos están perfectamente balanceados como un fertilizante y listo para aplicarse en las plantas y enriquecerlas con elementos esenciales para su crecimiento (Castillo, 2002).

Por lo anterior, es importante regresar al suelo parte de los nutrimentos que de él se extrajeron, y de esta manera cerrar el ciclo biológico; además, con esta alternativa se disminuye la contaminación a cuerpos receptores de agua residual, se reduce el consumo de agua potable, así como el consumo de fertilizantes minerales, aunque se debe tener cuidado en el aprovechamiento de la orina porque es posible ocasionar una fuente de contaminación por patógenos y otros constituyentes que deben tomarse en consideración. De esa forma se ayuda a eficientar el sistema por el almacenamiento, transporte e higiene en la manipulación del residuo (Ganrot, 2005).

2.3.3 Aplicación de la orina en la agricultura

La agricultura sustentable implica que se requiere un flujo balanceado de nutrimentos e independencia de los fertilizantes producto de los recursos no renovables. Experimentos hechos en campo y en el laboratorio demuestran que se pueden lograr cosechas semejantes si se aplica orina en lugar de fertilizante mineral. Kirchmann y Petterson, reportaron en 1995 que no existía información disponible acerca del uso de orina humana como fertilizante, solamente la mezcla en agua residual con las heces y Rodhe et al., en el 2004, reportó que habían pocos estudios de la orina humana como fertilizante en la agricultura, además de un conocimiento limitado de cómo la orina humana trabaja y cómo debe ser manejada. Existen, sin embargo, fertilizantes comparables como la orina de animales, que son aplicadas en Suecia para propósitos agrícolas en cantidades

aproximadas de 2.3 millones de toneladas por año. La orina humana contiene más nitrógeno y fósforo, pero menor cantidad de potasio en comparación con la orina de cerdos y bovinos.

En fechas recientes se ha incrementado el interés de utilizar la orina humana como fertilizante, debido principalmente al crecimiento poblacional y al correspondiente incremento en la demanda de alimentos y los requerimientos para ahorrar agua y energía (Pradhan et al., 2007). En la literatura se reporta que la orina se ha utilizado para fertilizar, de manera experimental, una gran variedad de cultivos, entre los que se encuentran: maíz (Guzha et al., 2005), pepino (Heinonen –Taski et al., 2007), col (Pradhan et al., 2007), trigo (Tidåker et al., 2007), jitomate (Pradhan et al., 2009), calabaza (Pradhan et al., 2009a), bamboo (Ndzana y Otterpohl, 2009), betabel (Pradhan et al., 2010), entre otros; en la tabla 2.3 se indican los países en los que se ha experimentado el uso de la orina humana como fertilizante, así como el cultivo en el que fue utilizado, y en la tabla 2.4 se resumen las condiciones experimentales utilizadas en la aplicación de la orina en algunos cultivos.

Aunque se debe tomar en consideración que concentraciones altas de orina reducen el crecimiento de las plantas, supuestamente por la concentración de amonio o de la sal (Kauffmann, 2008).

Tabla 2.3 Países y cultivos en los que es utilizada la orina humana como fertilizante

País	Cultivo	País	Cultivo
Alemania	Avena	Sudáfrica	Calabaza, lechuga, maíz, remolacha, zanahoria, jitomate y espinaca
China	Algodón, maíz, arroz y bambú	Suecia	Cebada, calabaza y trigo
Finlandia	Jitomate, calabaza, betabel	Suiza	Diferentes vegetales
India	Plátano y mostaza India	Tanzania	Espinaca
Japón	Vegetales y frutas	Vietnam	Arroz, papa dulce y maíz
México	Calabaza, pimiento, apio, cilantro, hinojo, perejil, nopal, lechuga	Zimbabwe	Trigo

Fuente: Karak y Bhattacharyya, 2011

Heinonen-Tanski, et al. (2007), experimentaron con orina separada de los sanitarios como fertilizante en el cultivo a la intemperie de pepinos (*Cucumis sativus L.*) en clima muy frío (nórdico). Los pepinos cultivados con orina fueron similares o ligeramente mejores que los cosechados con fertilizante mineral, e incluso a ninguno de los pepinos se le detectaron

microorganismos entéricos como coliformes y clostridia, entre otros. La orina podría sustituir al fertilizante comercial y utilizarse en suelo con alto contenido de fósforo; también puede complementarse con ceniza de madera para incrementar el contenido de fósforo, potasio, magnesio y calcio. Los resultados con la mezcla orina - ceniza muestran en el cultivo del jitomate y betabel que se mantiene la calidad del fruto, el potencial del suelo y el control de las emisiones de nitrógeno (Pradhan et al., 2010 y Pradhan et al., 2009).

Tabla 2.4 Aplicación de orina humana en diferentes cultivos

Cultivo	Dosis	Condiciones de almacenamiento	Observaciones	Ref.
Betabel	1 dosis, 133 kg of N/ha	6 meses, a 7 °C	Días aplicados 1, 18, 28 y 36. La orina aplicada (8.36 g N/L, 0.7 g P/L, 2 K/L) fue de 455 mL por surco. $N_{TOT} = 1297,4 \text{ mg N/m}^2$ con 4 aplicaciones de orina pura	Pradhan et al., 2010
Calabaza	2 dosis, 113 kg of N/ha	6 °C	Baja concentración de orina (0.93 g N/L, 0.063 g P/L, 0.36 K/L), se aplicó un volumen de 7.3 L por planta, los días 5 y 7. Alta concentración de orina (8.17 g N/L, 0.65 g P/L, 2.1g K/L), se aplicó un volumen de 0.83 L, los días 13, 19 y 45. Riego: 2 hrs cada segundo día durante el primer mes, por 3 hrs cada segundo día en el segundo y tercer mes.	Pradhan et al., 2009a
Col	180 kg N/ha	-	Días de aplicados 7, 29, 40, 50, 64 y 71. La orina aplicada (0.93 g N/L, 0.063 g P/L, 0.36 K/L) fue de 1.4, 1.6, 2.0, 2.0 y 1.9 L por planta. Riego: 2 h cada segundo día en el primer mes, 3 h cada segundo día en el segundo mes, y 2 horas en el tercer mes $N_{TOT} = 10230 \text{ mgN/m}^2$	Pradhan et al., 2007
Espinaca	3 dosis 617 kg N/ha 1067 kg N/ha 1600 kg N/ha	26 °C, orina masculina	Tres diferentes aplicaciones, una vez por semana, dos veces y tres veces a la semana, 6.4 y 9.6 g N/ 12 kg suelo por maceta de 10 L. Suelo tamizado en malla de 8 mm Riego: Agua de la llave fue efectuada de acuerdo a la capacidad de campo $N_{TOT} = 308 \text{ mg N/kg}$, 533 mg N/kg y 800 mg N/kg de suelo	Mnkeni et al., 2006
Jitomate	135 kg N/ha	6 meses, a 7 °C	Días aplicados 6, 14, 34, 41 y 48. Se realizaron 5 aplicaciones de orina pura (8.36 g N/L, 0.7 g P/L, 2 K/L) de 16.2 mL Maceta: volumen = 7.5 l, área=491 cm ² $N_{TOT} = 67,2 \text{ mg N/kg suelo}$	Pradhan et al., 2009
Pepino	Orina pura. Tres veces. En total 9.7 L/m ²	-	Días aplicados 10, 30 y 40. Se realizaron 3 aplicaciones de orina pura de 16.2 mL. $N_{TOT} = 23300 \text{ mg N/m}^2$	Heinonen-Tanski et al., 2007

En general, la orina puede ser recomendada para la mayoría de cultivos. Al ser especialmente rica en nitrógeno (N), es aconsejable dar prioridad a los cultivos que tienen un gran valor y responden bien al N, como la espinaca, coliflor, plantas ornamentales y

maíz. No obstante, no existe ninguna razón para no usar la orina como fertilizante en otros cultivos, ya que las experiencias en todo el mundo muestran buenos resultados (Jönsson et al., 2004).

Existen muchos vacíos en el conocimiento actual, concernientes con el uso de la orina y las heces como fertilizante. La carencia de investigaciones documentadas en esta área hace que el desarrollo de lineamientos se dificulte. No obstante, estos productos han sido usados en la agricultura desde la antigüedad, y existe mucho conocimiento que no ha sido documentado y se fundamenta en la práctica. Se necesita contar con investigaciones sobre el uso de la orina y las heces como fertilizante, especialmente en las siguientes áreas (Jönsson et al., 2004):

- Efectos de los nutrimentos de la excreta en los cultivos y en el suelo
- Estrategias de fertilización y técnicas de aplicación cuando se usa excreta
- Eficiencia de almacenamiento de la orina en el suelo
- Técnicas de higienización de las heces simples y de uso eficiente de los recursos

2.3.4 Sobrevivencia de patógenos en suelo y cultivos

Los principales organismos que amenazan la salud humana son bacterias, virus, protozoarios y helmintos, parásitos que pueden encontrar en gran número en excretas de personas infectadas. Por lo general, sólo una pequeña cantidad de estos agentes infecciosos son suficientes para causar una infección. Por lo tanto la descarga de excretas directos e indirectos a los cuerpos de agua, suelo, etc. son un factor importante en el riesgo de infecciones (Huuhtanen y Laukkanen, 2006).

La supervivencia de algunos patógenos son de periodos largos de tiempo en suelos o sobre los cultivos (ver tabla 2.4), los cuales pueden ser transmitidos a humanos o animales. Los patógenos más resistentes en medio ambiente son los huevos de Helminto, que llegan a sobrevivir por varios años en el suelo. La supervivencia de los patógenos depende de ciertos factores, descritos en la tabla 2.5.

Tabla 2.4 Supervivencia de varios microorganismos en diferentes ambientes seleccionados 20 – 30 °C

Microorganismo	Tiempo de supervivencia (días)	
	Cultivo	Suelo
Virus Enterovirus	<60, usualmente < 15	<100, usualmente < 20
Bacterias <i>Coliformes termotolerantes</i> <i>Salmonella spp.</i> <i>Shigella spp.</i> <i>V. cholerae</i>	<30, usualmente < 15 <30, usualmente <15 <10, usualmente <10 <5, usualmente <2	<70, usualmente < 20 <70, usualmente <20 ND <20, usualmente <10
Protozoarios <i>E. histolitica cists.</i> <i>Cryptosporidium oocysts</i>	<10, usualmente <2 <3, usualmente <2	<20, usualmente <10 <150, usualmente <75
Helmintos Ascaris Lombriz	<60, usualmente <30 <60, usuamente <30	Años Varios meses

Fuente: WHO, 2006

Tabla 2.5 Factores del medio ambiente que afectan la sobrevivencia de los patógenos

Factor	Efecto
Humedad	La humedad en el medio ambiente favorece la supervivencia de los patógenos. Los ambientes secos matan a los patógenos.
Contenido de suelo	Suelos arcillosos y con altos contenidos de materia orgánica favorecen la supervivencia de los patógenos.
Temperatura	El factor más importante en la muerte de los patógenos. Altas temperaturas permiten una muerte rápida, y una temperatura baja permite una vida prolongada. Temperaturas de congelación también pueden causar la muerte del patógeno.
pH	Algunos virus sobreviven más tiempo en suelo a pH ácidos, mientras que en suelos alcalinos se asocia con muerte rápida y en suelos neutros y ligeramente alcalinos se favorece la sobrevivencia bacterial.
Luz solar (radiación ultravioleta)	La luz solar directa permite una rápida inactivación a través de la disecación y exposición a la radiación ultravioleta
Follaje y tipo de planta	Ciertas plantas tienen superficies adhesivas o pueden absorber patógenos del medio ambiente, permitiendo prolongar la vida de algunos patógenos; los tubérculos son propensos a la contaminación por patógenos y facilitan la supervivencia de los mismos.
Competencia con la flora y fauna nativa	Los efectos antagónicos de las bacterias pueden provocar la muerte de las mismas. Las bacterias pueden ser presas de los protozoarios.

Fuente: WHO, 2006

2.3.5 Inactivación de los microorganismos en la orina

En un individuo sano la orina se encuentra estéril dentro de la vejiga. Y cuando ésta es transportada fuera del cuerpo, diferentes tipos de bacterias se incorporan en la orina fresca. Normalmente la orina contiene <10 000 bacterias por mL. Los patógenos que pudieran estar presentes en la orina rara vez están presentes para constituir un problema de salud pública (Schönning, 2002).

Vinnerås et al. (2008) propone que la inactivación de los microorganismos está correlacionada con la concentración de amoníaco, debido a que a pH ligeramente alcalino, en el intervalo de 8.7 – 9.1, es posible inactivar los microorganismos. En la tabla 2.6 se indican las recomendaciones de almacenamiento de la orina para ser uso de la misma en la agricultura, con lo cual se espera que los riesgos se minimicen en la transmisión de enfermedades.

Tabla 2.6 Recomendación de almacenamiento para la orina ^a basada en el contenido de patógenos ^b y recomendaciones de cultivo ^c.

Temperatura de almacenamiento o (°C)	Tiempo de almacenamiento (meses)	Posibles patógenos en la orina después del almacenamiento	Cultivos recomendados
4	≥ 1	Virus y protozoarios	Cultivos de alimentos y forrajes que vayan a ser procesados.
4	≥ 6	Virus	Cultivo de alimentos que vayan a ser procesados y cultivos de forraje ^d
20	≥ 1	Virus	Cultivo de alimentos que vayan a ser procesados y cultivos de forraje ^d
20	≥ 6	Probablemente ninguno	Todos los cultivos ^e

Fuente: WHO, 2006; Schönning, 2002.

^a Orina o agua y orina. Cuando es diluida, se asume que la mezcla tiene un pH de al menos de 8.8 y una concentración de nitrógeno de 1 g/L.

^b Bacterias Gram – positivas y esporas no son incluidas en las evaluaciones de riesgos subyacentes, pero normalmente no son reconocidas como causantes de alguna infección grave.

^c Un sistema grande, en este caso, es un sistema donde se utiliza la mezcla de orina para fertilizar cultivos que serán consumidos por personas que no son miembros de la familia de la que se recolectó la orina.

^d No usar pastizales para la producción de forraje.

^e Para cultivos que son consumidos en crudo, se recomienda que la orina se aplique al menos un mes antes de la cosecha y que sea incorporada dentro del suelo si la planta crece por encima de la superficie del suelo.

2.3.6 Residuos farmacéuticos en la orina

Debido a que en la orina puede haber presencia de fármacos, es de gran importancia considerar este riesgo, ya que éstos no son degradados durante el periodo de almacenamiento de la orina.

Los fármacos son un grupo diverso de compuestos químicos. Aunque la mayoría de los antibióticos se utilizan para el tratamiento de las infecciones en humanos y animales, una cantidad significativa de éstos también se utilizan como suplemento alimenticio para promover el crecimiento de animales destinados al consumo humano (Pradhan et al, 2010a).



La gran mayoría de los fármacos se derivan de la naturaleza, incluso muchos de ellos son producidos sintéticamente, siendo encontrados y degradados en los ambientes naturales con una actividad microbiana diversa. Esto ha sido verificado en las plantas de tratamiento de aguas residuales ordinarias, donde la degradación de los fármacos mejora cuando el tiempo de retención se prolongó de un número de horas a un número de días. Muchos antibióticos son fotodegradables y muchos otros son degradados por la actividad microbiana del suelo. Por lo tanto, se puede suponer que los residuos de medicamentos posibles en la orina se degradan después de la aplicación de ésta en el suelo. Los residuos de medicamentos aplicados al suelo en la orina, en teoría podrían ser absorbidos por la vegetación, pero sólo en pocos casos y en bajas concentraciones (Pradhan et al., 2010a). Esto significa que existe suficiente tiempo para que los microbios degraden cualquier fármaco y que los riesgos asociados a ellos disminuyan (Jönsson et al., 2004).

Existen muchos indicios de que el posible riesgo de las sustancias farmacéuticas en el sistema agrícola es pequeño y mucho más pequeño que los riesgos asociados con el sistema actual. Uno de estos indicios es que en muchos países el consumo humano de productos farmacéuticos es menor comparado con el de los animales domésticos, ya que en muchos países la mayoría de alimentos comerciales contienen antibióticos, que han sido añadidos para estimular el crecimiento. Por otro lado, el uso de productos farmacéuticos es pequeño comparado con la cantidad de plaguicidas (insecticidas, fungicidas, bactericidas y herbicidas) usados en la agricultura, que son tan activos biológicamente como las sustancias farmacéuticas (Jönsson et al., 2004).

2.4 SANITARIOS SECOS

Un baño seco es aquel que utiliza un mínimo de agua o no para diluir y/o transportar los residuos de la evacuación (orina y/o heces) a compartimentos separados para el aprovechamiento de los residuos humanos y de esta manera favorecer la economía doméstica, ahorrando dinero, energía y agua. El sistema del baño seco se ha desarrollado mucho durante los últimos años y ha sido utilizado en países como Vietnam, China, Etiopía, Guatemala, El Salvador, México, Zimbabwe, Suiza, entre otros (Mnkeni y Austin, 2009). Los equipos modernos se distinguen de los antiguos porque las heces no van directamente al suelo, lo que producía malos olores y riesgo de contaminación del subsuelo. En Suiza ya se lleva a cabo la separación y recolección de orina por medio de

sanitarios secos y se plantea que si toda la orina recolectada se aplicara al cultivo podría sustituir el 37% de N, 20% de P y 15% de K de los fertilizantes comerciales (Lienert et al., 2003).

Existen variedad de modelos y marcas comerciales, con formas y diseños diferentes (ver figura 2.2). Pueden ser por ejemplo, baños secos para composteo parcial o completo, eléctricos o con separador de orina, pero también pueden ser construidos por uno mismo (GBS, 2006).

Se ha demostrado que los sanitarios ecológicos son factibles económicamente y ambientalmente sustentables; sin embargo, los factores culturales dificultan su selección porque no se han estudiado con el detalle que el caso requiere (Nawab et al., 2006).



Fuente: Germer, 2009



Fuente: Morgan, 2003



Fuente: Borsuk et al., 2008

Figura 2.2 Ejemplos de baños secos

En México ya se comenzó a implementar los baños secos, en el año 2006 se instalaron 500 baños secos en clínicas, hospitales y en oficinas del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), se colocaron retretes de cerámica que no utilizan agua. Dichos retretes abrieron una alternativa de solución para evitar el derroche de agua potable a fin de desalojar la orina por el drenaje, además han sido diseñados por mexicanos. El IMSS ha dado la oportunidad de probar sistemáticamente y se espera no sólo instalar baños secos en sus clínicas del Distrito Federal, sino también en todo el país (CEZM, 2006).

En 2007, ante el desabasto de agua potable que presentó la delegación Iztapalapa, se creó el programa de baños secos y sistemas economizadores en escuelas públicas, lo que ha significado un ahorro importante. El proyecto, que es uno de los pioneros en el Distrito Federal, inició a finales de 2007 originalmente en la sierra de Santa Catarina y en el paraje San Juan, “por ser las zonas geográficamente más altas de la delegación y que carecen de agua potable”. En ese año se sustituyeron sanitarios convencionales por

baños secos en 33 escuelas; en 2008, 94 centros educativos más se beneficiaron y, en el transcurso del presente año, se han colocado estos baños en 41 colegios más. (Canseco, 2009).

2.5 SUELO

El término suelo, que deriva del latín *solum*, y significa piso y/o terreno, puede definirse como la capa superior de la Tierra que se distingue de la roca sólida y donde crecen las plantas. Con este enfoque, los suelos deben considerarse como formaciones geológicas naturales desarrolladas bajo condiciones muy diversas de clima y materiales de origen, lo cual justifica su continuo intemperismo y, en consecuencia, su gran variedad (Navarro y Navarro, 2003).

La descripción anterior es una de las tantas que existen para suelo, ya que la definición puede depender del ángulo y enfoque que se le dé al mismo; por ejemplo, la norma NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 define al suelo como “material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprenden desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad”, mientras que la NOM-021-RECNAT-2000 lo define como “colección de cuerpos naturales formados por sólidos (minerales y orgánicos), líquidos y gases, sobre la superficie de los terrenos. Presenta, ya sea, horizontes o capas, que se diferencian del material origen como resultado de adiciones, pérdidas, migraciones y transformaciones de energía y materia; o por la habilidad de soportar raíces de plantas en un ambiente natural”.

El suelo se considera como un sistema disperso, constituido por tres fases (sólida, líquida y gaseosa) en el que se pueden distinguir cuatro elementos fundamentales: materia mineral, materia orgánica, agua y aire, íntimamente ligados y mezclados entre sí, generando un medio ideal para el crecimiento de las plantas, ver figura 2.3.

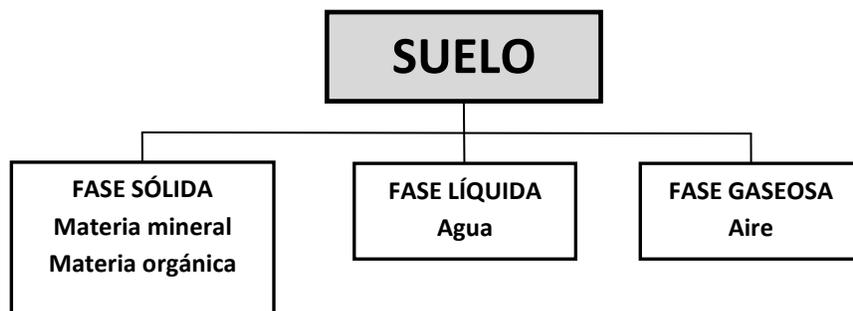


Figura 2.3 Fases y componentes fundamentales del suelo

La composición de los citados componentes pueden variar con el tiempo y de un lugar a otro. Y dentro de ellos, el volumen de agua y el de aire guardan una relación inversamente proporcional entre sí, ya que al eliminarse el agua por el drenaje, evaporación o crecimiento de la planta, el espacio poroso que está ocupado por ella es llenado de nuevo por aire, ver tabla 2.7.

Tabla 2.7. Composición aproximada en volumen y peso de un suelo superficial franco en buenas condiciones para el desarrollo vegetal

Componente del suelo	% Volumen	% Peso
Materia mineral	45	81
Materia orgánica	5	2
Agua	25	17
Aire	25	-

Fuente: Navarro, 2009

La fase sólida mineral es una mezcla de materiales que se diferencian entre sí en su composición y en sus propiedades. Estas características están íntimamente relacionadas con su tamaño.

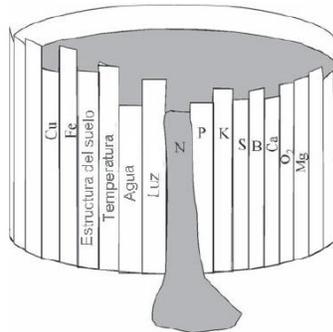
Existen partículas más o menos gruesas que tienen una analogía casi total con el material original de donde proceden; se caracterizan por su escasa actividad fisicoquímica y constituyen las llamadas fracciones gruesas: piedras, gravas y arenas. Otras han sufrido una mayor transformación, e incluso no se puede reconocer su parentesco con el material original, son partículas con una mayor actividad, de menor tamaño y constituyen las fracciones finas, limos y arcillas.

2.5.1 Nutrientes del suelo

Los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas se llaman nutrientes o nutrimentos. Para mantener un crecimiento sano de la planta, es necesario que el suelo posea un amplio espectro de nutrientes. Las plantas absorben los elementos nutritivos en ciertas proporciones. Es importante que los nutrientes se mantengan balanceados en el suelo, para satisfacer las necesidades individuales de los cultivos (Manuales para educación agropecuaria, 2008).

Los requisitos para el crecimiento de las plantas incluyen luz, agua, nutrientes y una estructura para el crecimiento de las raíces. Los factores limitantes que regulan el crecimiento de las plantas se ilustran en la figura 2.4. Cuando el suministro del factor más limitante para el crecimiento se ha incrementado, entonces otros factores de crecimiento

se convierten en factores limitantes, es decir, si el factor limitante es mejorado, por ejemplo añadiendo nitrógeno, entonces otro factor será el que limite la producción a un nivel mayor (Jönsson et al., 2004).



Fuente: Jönsson, 2004

Figura 2.4 Factores limitantes que regulan el crecimiento de las plantas

Existen más de 100 elementos químicos, sin embargo, los científicos han encontrado que sólo 17 de ellos son esenciales para el crecimiento de la planta, ver tabla 2.8. Para ser clasificados como esencial, el elemento necesita cumplir con los siguientes criterios (Jones y Jacobseb, 2001):

- 1) La planta no puede completar su ciclo de vida sin él
- 2) La función del elemento no puede ser reemplazada por otro elemento
- 3) El elemento está directamente involucrado en el crecimiento de la planta y su reproducción
- 4) Muchas plantas necesitan ese elemento para sobrevivir

El carbono (C), hidrógeno (H) y el oxígeno (O) son considerados como nutrientes no minerales porque son derivados del aire y agua, y no son obtenidos de los minerales del suelo. Estos elementos representan aproximadamente el 95% de la biomasa de la planta, y a los cuales les dan poca atención en la nutrición de la misma debido a que se encuentran en grandes cantidades por la fuente de la que se obtienen. Estos tres elementos participan en la fotosíntesis y son los principales constituyentes del cuerpo vegetal.

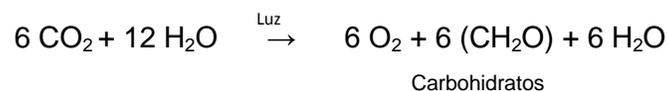


Tabla 2.8 Elementos esenciales, papel en la planta y fuente

Elemento	Papel en la planta	Fuente
Carbono (C)	Constituyente de carbohidratos, necesario para la fotosíntesis	Aire
Hidrógeno (H)	Mantiene el balance osmótico; importante en numerosas reacciones bioquímicas; constituyente de carbohidratos	Agua
Oxígeno (O)	Constituyentes de carbohidratos, necesario para la respiración	Aire / agua
Nitrógeno (N)	Constituyente de proteínas, clorofila y ácidos nucleicos	Aire / suelo
Fósforo (P)	Constituyente de muchas proteínas, coenzimas, ácidos nucleicos y sustratos metabólicos; importante en la transferencia de energía	Suelo
Potasio (K)	Involucrado en la fotosíntesis; translocación de carbohidratos, síntesis de proteínas, etc	Suelo
Calcio (Ca)	Componente de pared celular; juega un papel en la estructura y permeabilidad de membranas	Suelo
Magnesio (Mg)	Activador enzimático, componente de la clorofila	Suelo
Azufre (S)	Componente importante de las proteínas de la planta	Suelo
Boro (B)	Se cree que es importante en la translocación en los azúcares y metabolizar los carbohidratos	Suelo
Cloro (Cl)	Involucrado con la producción de oxígeno en la fotosíntesis	Suelo
Cobre (Cu)	Es un catalizador para la respiración; un componente de varias enzimas	Suelo
Hierro (Fe)	Involucrado con la síntesis de clorofila y enzimas por transferencia de electrones	Suelo
Manganeso (Mn)	Controla varios sistemas de óxido – reducción y de la fotosíntesis	Suelo
Molibdeno (Mo)	Involucrado con la fijación de nitrógeno y la transformación de nitrato a amonio	Suelo
Níquel (Ni)	Necesario para el funcionamiento de la enzima ureasa, y necesario para la germinación de las semillas	Suelo
Zinc (Zn)	Involucrado con el sistema enzimático que regula varias actividades metabólicas	Suelo

Fuente: Jones, 2001

Los 14 elementos restantes necesarios en el crecimiento de las plantas están clasificados como macronutrientes, elementos secundarios y micronutrientes; clasificación que está basada en la cantidad de nutrientes que las plantas requieren para su desarrollo, ver tabla 2.9.

Tabla 2.9. Clasificación de nutrientes

Macronutrientes	Nutrientes secundarios	Micronutrientes
Nitrógeno (N) Fósforo (P) Potasio (K)	Calcio (Ca) Magnesio (Mg) Azufre (S)	Boro (B) Cloro (Cl) Cobre (Cu) Hierro (Fe) Manganeso (Mn) Molibdeno (Mo) Níquel (Ni) Zinc (Zn)

Fuente: Jones y Jacobseb, 2001

La mayoría de los macronutrientes representan del 0.1 – 5% del tejido seco de la planta, mientras que los micronutrientes generalmente abarcan menos del 0.025%. A estos 14 elementos se le pueden añadir algunos otros, tales como Sodio (Na), Silicio (Si), Cobalto

(Co) y Selenio (Se), que sólo parecen ser esenciales para algunas especies. En la tabla 2.10 se encuentran las concentraciones de los nutrientes absorbidos en el tejido seco de la planta, así como la forma en que se encuentra el nutriente.

Tabla 2.10 Concentraciones de nutrientes en el tejido seco

Elemento	Forma absorbida	Intervalo de concentración en el tejido seco	Elemento	Forma absorbida	Intervalo de concentración en el tejido seco
Nitrógeno (N)	NO ₃ ⁻ (nitrato) NH ₄ ⁺ (amonio)	1 – 5%	Cloro (Cl)	Cl ⁻ (cloruro)	0.1 – 1.0%
Fósforo (P)	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻ (fosfato)	0.1 – 0.5%	Cobre (Cu)	Cu ²⁺	5 – 20 ppm
Potasio (K)	K ⁺	0.5 – 0.8%	Hierro (Fe)	Fe ²⁺ (férrico) Fe ³⁺ (ferroso)	50 – 250 ppm
Calcio (Ca)	Ca ²⁺	0.2 – 1.0%	Manganeso (Mn)	Mn ²⁺	20 – 200 ppm
Magnesio (Mg)	Mg ²⁺	0.1 – 0.4%	Molibdeno (Mo)	MoO ₄ ²⁻ (molibdato)	0.05 – 0.2 ppm
Azufre (S)	SO ₄ ²⁻ (sulfato)	0.1 -0.4%	Níquel (Ni)	Ni ²⁺	0.1 – 1 ppm
Boro (B)	H ₃ BO ₃ (ácido bórico) H ₂ BO ₃ ⁻ (borato)	6 – 60 ppm	Zinc (Zn)	Zn ²⁺	25 – 150 ppm

Fuente: Jones y Jacobseb, 2001

El nitrógeno es tomado por la planta como iones nitrato (NO₃⁻) y amonio (NH₄⁺). Las principales fuentes naturales de nitrógeno disponible para las plantas son la degradación de la materia orgánica en el suelo y la fijación de nitrógeno por los microorganismos que viven en simbiosis con las raíces de las leguminosas. En la figura 2.5 se esquematiza la descomposición, transformación y pérdidas de nitrógeno en la excreta animal y amonio en forma de urea aplicado al suelo agrícola.

La alta solubilidad del potasio en el agua a menudo resulta en una buena dotación de éste disponible para las plantas. Sin embargo, muchos cultivos, como las hortalizas, necesitan cantidades grandes de potasio y por lo tanto la fertilización adicional con potasio puede mejorar el crecimiento de las plantas. Algunas especies del azufre son altamente solubles en agua y la mayoría de cultivos lo necesitan en cantidades menores a las del fósforo (Jönsson et al., 2004). El problema del mantenimiento de cantidades adecuadas de azufre para la nutrición mineral de las plantas es cada vez más importante. Inclusive, aunque probablemente las deficiencias de azufre no se generalicen tanto como las de nitrógeno, fósforo, y potasio, la creciente remoción de azufre por los cultivos hace que los productores deban estar atentos para prevenirlas.

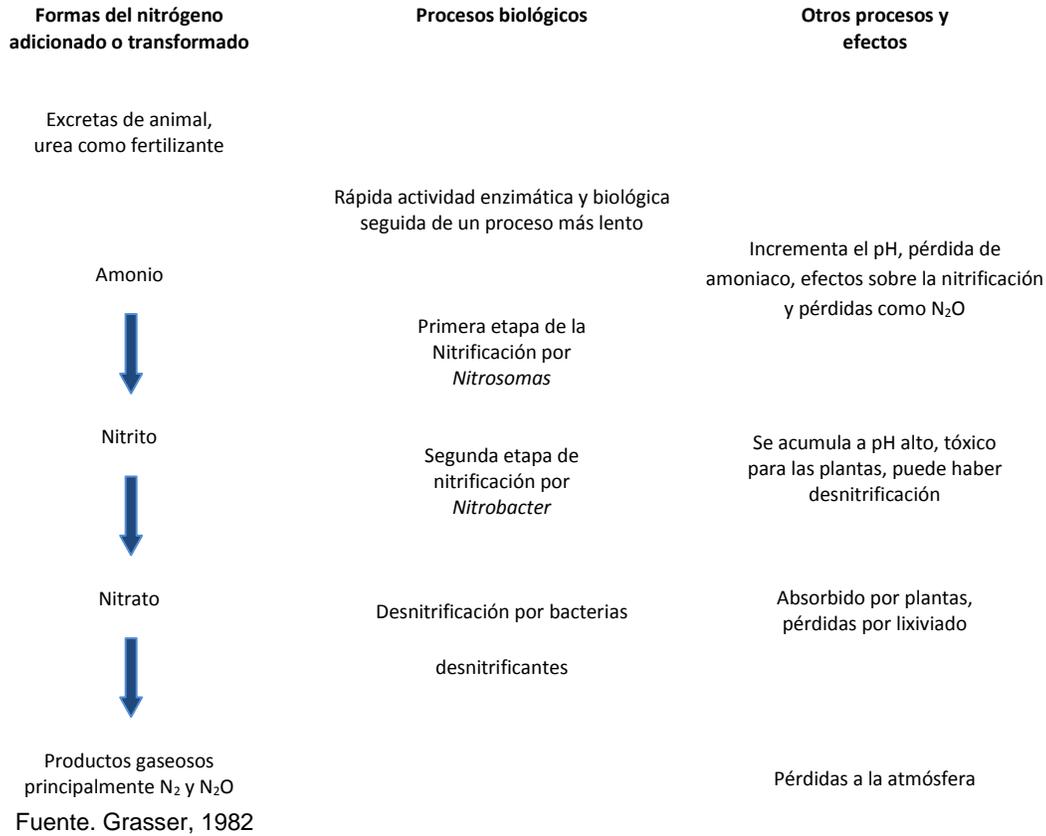


Figura 2.5 Esquema de las transformaciones, movimiento y pérdida del nitrógeno en suelo agrícola

El fósforo es absorbido por las plantas como iones fosfato (HPO_4^{2-} y H_2PO_4^-) y el pH del suelo controla la abundancia relativa de esas dos formas iónicas del fosfato. El ión H_2PO_4^- se favorece por debajo de pH 7 y el ión divalente HPO_4^{2-} por encima de pH 7.

De lo ya citado, se hace evidente que son varios los elementos químicos necesarios para el desarrollo de una planta; en la tabla 2.11 se dan algunas cantidades de tales elementos que algunos cultivos extraen de éstos.

Tabla 2.11 Cantidades de nutrientes extraídos mediante las cosechas (kg/ha)

Cultivo	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	Cu	Mn	Zn
Maíz	220	85	185	25	25	22	0.10	2.30	0.40
Cebada	50	20	40	9	4	6	0.04	0.30	0.01
Arroz	80	30	70	12	9	3	0.01	1.60	0.07
Trigo	70	30	50	7	9	8	0.04	0.30	0.20
Papa	80	30	150	3	6	6	0.04	0.09	0.05
Remolacha	60	20	50	33	24	10	0.03	0.75	0.04
Tomate	120	40	160	7	11	14	0.07	0.13	0.16
Cebolla	45	20	40	11	2	18	0.03	0.08	0.31
Naranja	85	30	140	33	12	9	0.20	0.06	0.24
Tabaco	45	25	120	75	18	14	0.03	0.55	0.07

Fuente: Manuales para la educación agropecuaria, 2008

2.5.2 Propiedades químicas del suelo

Un suelo fértil es aquel que contiene los elementos nutritivos que las plantas necesitan para su desarrollo, por esta razón es importante caracterizar el suelo y evaluar tanto sus propiedades físicas y químicas, que permita entender la respuesta a los diferentes tratamientos propuestos en este trabajo de tesis.

A continuación se enlistan algunos de los parámetros evaluados en este trabajo, los cuales se consideraron de gran importancia (Fernández et al., 2006; NOM-021-RECNAT-2000).

2.5.2.1 pH

El pH es una propiedad química del suelo que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos (incluidos microorganismos y plantas). La lectura de pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos (H^+) que se da en la interfase líquida del suelo, por la interacción principalmente de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. El grado de acidez o basicidad de un suelo es determinado por medio de un electrodo de vidrio en un contenido de humedad específico o relación de suelo-agua, y expresado en términos de la escala de pH.

En el caso de los suelos el pH se mide potenciométricamente en la suspensión del sobrenadante de una mezcla de suelo: agua en relación 1:2. Debido a que el pH del suelo es medido en una matriz acuosa como agua o una solución de sales diluidas, es dependiente del grado de dilución (relación suelo-dilución). Cuando se mide en agua es importante controlar el agua adicionada, ya que un aumento causará un cambio de pH; por ello es necesario mantener una relación constante y tan baja como sea posible.

2.5.2.2 Conductividad

La conductividad eléctrica es la capacidad de una solución acuosa para transportar corriente eléctrica, que generalmente se expresa en mmhos/cm o en mSiemens/m; la NOM-021-RECNAT-2000 establece dSiemens/m a 25°C. Es una propiedad de las soluciones que se encuentra muy relacionada con el tipo y valencia de los iones presentes, sus concentraciones total y relativa, su movilidad, la temperatura del líquido y

su contenido de sólidos disueltos. La determinación de la conductividad eléctrica es por lo tanto una forma indirecta de medir la salinidad del agua o extractos de suelo.

La técnica utilizada para suelo es mediante el extracto de saturación, la cual es obtenida por filtración al vacío de una pasta de suelo saturada hecha con agua destilada. Si el contenido de agua de la pasta saturada es mayor o menor que el correspondiente al punto de saturación las conductividades serán afectadas.

2.5.2.3 Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento indispensable para la vida, forma parte de las principales biomoléculas de todos los seres vivos. Es también uno de los elementos más abundantes de la Tierra, pues en su forma gaseosa molecular (N_2) constituye 78% de la atmósfera.

Sin embargo, la cantidad de nitrógeno presente en muchos suelos es escasa, debido a su propia dinámica y a su ciclo biogeoquímico. La mayor parte del nitrógeno presente en los suelos minerales se encuentra, por tanto, formando parte de la materia orgánica que en el suelo se deposita a la muerte de los citados microorganismos y de las plantas que de ellos se benefician. En esta forma, el nitrógeno no es aprovechable por la planta. Sin embargo, este nitrógeno puede ser transformado y liberado bajo la forma de compuestos más sencillos, mediante un conjunto de procesos fundamentales de tipo bioquímico.

En los microorganismos la carencia de nitrógeno puede afectar el crecimiento, por lo que la población microbiana no tendrá un desarrollo óptimo. En contraste, demasiado nitrógeno permite el crecimiento microbiano rápido y acelera la descomposición. Además, el exceso de nitrógeno puede ser liberado como amoníaco y el nitrógeno aprovechable escapará en forma de gas. Para la mayoría de los materiales una relación C/N cercana a 10:1 mantendrá estos elementos en equilibrio aproximado.

El nitrógeno le da el color verde a las plantas. Favorece un crecimiento rápido y aumenta la producción. Forma la proteína en los cultivos alimenticios y forrajeros. Si se aplica nitrógeno en exceso puede retardarse la maduración de la planta y favorecer su susceptibilidad a enfermedades.

2.5.2.4 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Todas las moléculas, en mayor o menor medida, tienen minúsculas cargas eléctricas, positivas y/o negativas. Por ello, en el suelo actúan como pequeños imanes, formando

entre ellas estructuras que pueden ser muy simples, como la atracción entre una partícula de arcilla cargada negativamente y una partícula de un fertilizante cargada positivamente; o muy complejas, como cuando hay la materia orgánica, con infinidad de cargas eléctricas de ambos signos.

La CIC o capacidad de intercambio catiónico es la capacidad del suelo para retener e intercambiar diferentes elementos minerales. La CIC depende de la textura del suelo y del contenido de materia orgánica. En general, entre más arcilla y materia orgánica haya en el suelo, la capacidad de intercambio es mayor y, por tanto, la fertilidad del mismo. El contenido de arcilla es importante, debido a que estas pequeñas partículas tienen una relación alta de área superficial a volumen. Los diferentes tipos de arcillas presentan diferentes valores de la CIC.

El método para la determinación consiste en la saturación de la superficie de intercambio con un catión índice, el ión amonio; lavado del exceso de saturante con alcohol; desplazamiento del catión índice y determinación del amonio mediante destilación. El amonio se emplea como catión índice debido a su fácil determinación, poca presencia en los suelos y porque no precipita al entrar en contacto con el suelo. La concentración normal que se usa asegura una completa saturación de la superficie de intercambio. El lavado con alcohol pretende desplazar el exceso de saturante y minimizar la pérdida del amonio adsorbido

2.5.2.5 Materia orgánica (MO)

La importancia de agregar materia orgánica para mejorar la producción del suelo fue detectada hace milenios por los agricultores. La fracción orgánica del suelo consiste en organismos vivos, plantas secas y residuos de origen animal. En una unidad de masa, esta porción orgánica es la fracción químicamente más activa del suelo. Dicha porción almacena varios elementos esenciales, estimula la estructura adecuada del suelo, influye sobre las características físicas, es una fuente con capacidad de intercambio de cationes (CIC) y regula los cambios de pH, propicia las relaciones óptimas entre el aire y el agua en los suelos y es un enorme depósito geoquímico de carbono (Bohn et al., 1993; Fassbender y Bornemisza, 1987).



2.6 CULTIVO DE JITOMATE

El jitomate o "tomate rojo" es originario de América del Sur, y cultivado en todo el mundo por su fruto comestible. Con la llegada de los españoles se expandió su cultivo al viejo continente, y de ahí a todo el mundo; con su comercialización y difusión lograda, actualmente forma parte de la dieta alimenticia de varias culturas en el globo terráqueo.

El jitomate es la hortaliza más importante en numerosos países y su popularidad aumenta constantemente. En la actualidad este cultivo ha adquirido importancia económica en todo el mundo (Nuez, 1995).

En México, como en otras partes del mundo, se prefiere consumir el jitomate fresco, pero también es utilizado como producto industrializado para elaborar pastas, salsas, purés, jugos, etc., gracias a los avances tecnológicos para su procesamiento y a las modificaciones en los gustos y costumbres de las nuevas generaciones, lo que exige calidad en cuanto a su distribución y venta en fresco, determinando y condicionando nichos de mercado.

El jitomate o "tomate rojo" es una de las especies hortícolas más importantes de nuestro país debido al valor de su producción y a la demanda de mano de obra que genera. Es el principal producto hortícola de exportación, ya que representa el 37% del valor total de las exportaciones de legumbres y hortalizas y el 16% del valor total de las exportaciones agropecuarias, sólo superada por el ganado vacuno (Monografía del jitomate, 2006).

2.6.1 Características morfológicas

A continuación se enlistan las características físicas más importantes de la planta de jitomate (monografía del jitomate, 2006; Rodríguez et al., 1997; Nuez, 1995). El jitomate pertenece a la familia *Solanaceae* y a la especie *Lycopersicon esculentum*.

2.6.1.1 Planta

El ciclo de la planta de jitomate se debe a las condiciones climáticas, al suelo, a las características genéticas de la variedad, puede ser bianual o polianual y desarrollarse de forma rastrera, semierecta o erecta.

Desde el momento de la siembra hasta la germinación transcurren entre 6 y 12 días. La temperatura óptima del suelo para este proceso es de 20 a 25 °C. Desde la germinación



hasta el momento del trasplante transcurren entre 30 y 70 días, dependiendo de la variedad y de las técnicas de cultivo. En una variedad precoz la primera cosecha se obtiene entre los 50 y 65 días después del trasplante, mientras que una variedad tardía ocurre entre los 85 y 90 días a ésta.

El tomate es una planta de clima cálido que resiste al calor y tolera alguna deficiencia de agua, sin embargo, para obtener altos rendimientos requiere de riego y humedad constante en el suelo sin periodos de sequía.

2.6.1.2 Sistema radicular

Las prácticas de cultivo modifican el sistema de raíces. Así cuando la siembra es directa en el surco, la raíz es pivotante y puede alcanzar rápidamente una profundidad de 60 cm y después crecer de 2 a 3 cm al día, hasta que la raíz principal alcance profundidades superiores a un metro.

En cambio cuando la semilla se deposita en almácigo para luego trasplantar la hortaliza al surco, el sistema de raíces se extiende lateralmente, con muchas raicillas que tienden a ser fibrosas. Las raíces del tomate generalmente ocupan los primeros 60 cm de suelo, concentrándose 70% de ellas en los primeros diez. Seccionando transversalmente la raíz principal y de fuera hacia dentro se encuentra: epidermis, donde se ubican los pelos absorbentes especializados en tomar agua y nutrientes, cortex y cilindro central, donde se sitúa el xilema (conjunto de vasos especializados en el transporte de los nutrientes).

2.6.1.3 Tallo principal

Eje con un grosor que oscila entre 2 - 4 cm en su base, sobre el que se van desarrollando hojas, tallos secundarios e inflorescencias. Su estructura, de fuera hacia dentro, consta de: epidermis, de la que parten hacia el exterior los pelos glandulares, corteza o cortex, cuyas células más externas son fotosintéticas y las más internas son colenquimáticas, cilindro vascular y tejido medular. En la parte distal se encuentra el meristemo apical, donde se inician los nuevos primordios foliares y florales.

2.6.1.4 Hoja

Compuesta e imparipinnada, con foliolos peciolados, lobulados y con borde dentado, en número de 7 a 9 y recubiertos de pelos glandulares. Las hojas se disponen de forma alternada sobre el tallo. El mesófilo o tejido parenquimático está recubierto por una



epidermis superior e inferior, ambas sin cloroplastos. La epidermis inferior presenta un alto número de estomas.

2.6.1.5 Flor

Consta de 5 o más sépalos, de igual número de pétalos de color amarillo y dispuestos de forma helicoidal a intervalos de 135°, de igual número de estambres soldados que se alternan con los pétalos y forman un cono estaminal que envuelve al gineceo, y de un ovario bi o plurilocular. Las flores se agrupan en inflorescencias de tipo racemoso, generalmente en número de 3 a 10. La primera flor se forma en la yema apical y las demás se disponen lateralmente por debajo de la primera, alrededor del eje principal.

2.6.1.6 Fruto

Baya bi o plurilocular que puede alcanzar un peso que oscila entre unos pocos miligramos y 600 gramos. Está constituido por el pericarpo, el tejido placentario y las semillas. El fruto puede recolectarse separándolo por la zona de abscisión del pedicelo, como ocurre en las variedades industriales, en las que es indeseable la presencia de parte del pecíolo, o bien puede separarse por la zona peduncular de unión al fruto.

2.6.2 Requerimientos edafoclimáticos

El manejo racional de los factores climáticos de forma conjunta es fundamental para el funcionamiento adecuado del cultivo, ya que todos se encuentran estrechamente relacionados y la actuación sobre uno de estos incide sobre el resto.

2.6.2.1 Temperatura

La planta de jitomate se adapta bien a una gran variedad de climas, con la sola excepción de aquellos en que se producen heladas, puesto que resulta sensible a este fenómeno (Rodríguez et al., 1997).

La temperatura influye en todas las funciones vitales de la planta, como son la transpiración, fotosíntesis, germinación, etc., teniendo cada especie vegetal y en cada momento de su ciclo biológico una temperatura óptima.

La temperatura óptima de desarrollo oscila entre 20 y 30 °C durante el día y entre 10 y 17 °C durante la noche; temperaturas superiores a los 30-35 °C afectan la fructificación, por mal desarrollo de óvulos y al desarrollo de la planta en general y del sistema radicular



en particular y a los 35 °C detiene su crecimiento. Temperaturas inferiores a 12-15 °C también originan problemas en el desarrollo de la planta, el tomate no resiste heladas en ninguna etapa de su desarrollo y puede morir a temperaturas de -2 °C. A temperaturas superiores a 25 °C e inferiores a 12 °C la fecundación es defectuosa o nula. La temperatura ideal de floración es de 21 °C. La maduración del fruto está muy influida por la temperatura en lo referente tanto a la precocidad como a la coloración, de forma que valores cercanos a los 10 °C así como superiores a los 30 °C originan tonalidades amarillentas. No obstante, los valores de temperatura descritos son meramente indicativos, debiendo tener en cuenta las interacciones de la temperatura con el resto de los parámetros climáticos.

2.6.2.2 Humedad

La humedad relativa óptima oscila entre un 60% y un 80%. Humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades aéreas y el agrietamiento del fruto y dificultan la fecundación, debido a que el polen se compacta, abortando parte de las flores. El rajado del fruto igualmente puede tener su origen en un exceso de humedad edáfica o riego abundante tras un período de estrés hídrico. También una humedad relativa baja dificulta la fijación del polen al estigma de la flor.

2.6.2.3 Luminosidad

El cultivo de jitomate necesita un mínimo de seis horas de luz solar para obtener los mejores rendimientos, es un cultivo que no lo afecta el fotoperiodo a lo largo del día, sus necesidades de luz oscilan entre 8 y 16 horas, aunque requiere de buena iluminación (Everhart et al., 2002). Valores reducidos de luminosidad pueden incidir de forma negativa sobre los procesos de la floración y fecundación, así como el desarrollo vegetativo de la planta. En los momentos críticos durante el período vegetativo resulta crucial la interrelación existente entre la temperatura diurna y nocturna y la luminosidad (Corpeño, 2004).

2.6.2.4 Suelo

Las plantas en su ambiente natural tienen que vivir, sin casi ninguna excepción en asociación con el suelo, una asociación conocida como relación suelo-planta. El suelo provee cuatro necesidades básicas de las plantas: agua, nutrientes, oxígeno y soporte.

Se considera que un suelo ideal debe de tener las siguientes condiciones: 45% de minerales, 5% de materia orgánica, 25% de agua y 25% de aire o espacio poroso. El tipo y la cantidad relativa de minerales, más los constituyentes orgánicos del suelo, determinan las propiedades químicas del suelo.

Los suelos aptos para cultivar tomate son los de media a mucha fertilidad, profundos y bien drenados, pudiendo ser franco - arenosos, arcillo-arenosos y orgánicos. El pH del suelo tiene que estar dentro de un rango de 5.9 - 6.5, para tener el mejor aprovechamiento de los fertilizantes que se apliquen (Corpeño, 2004).

Aunque dentro de las solanáceas el jitomate es el más tolerante a la salinidad, el suelo en que se cultive conviene que sea poco salino, porque las sales elevadas son un factor adverso para su desarrollo.

Sin embargo, para una buena producción de frutos, es necesario favorecer un sistema de raíces ramificado que penetre 60 cm de profundidad, para lo cual requieren suelos con buena estructura, aireación y drenaje. En la tabla 2.12 se resumen las condiciones edafoclimáticas óptimas para el desarrollo del cultivo del jitomate.

2.12 Condiciones óptimas para el crecimiento del jitomate

	Condición óptima
Temperatura	Día: 20 – 30 °C Noche: 10 – 17 °C
Humedad relativa	60 – 80 %
Luminosidad	Luz solar
Suelo	No es exigente, aunque prefiere suelos con buen drenaje y ricos en materia orgánica
pH	Ligeramente ácidos – ligeramente alcalinos

2.6.3 Análisis bromatológico y valor nutricional

En la tabla 2.13 se muestra el análisis bromatológico del jitomate, donde se observa alto contenido de agua, fuente de carbohidratos y bajo contenido de lípidos y proteínas.

2.13 Análisis bromatológico del jitomate

Componente	Gramos por 100 g de porción comestible
Agua	94.2
Proteína	1
Lípidos	0.3
Carbohidratos	3
Fibra	1.5

Fuente: Morevas y Carbajal, 1995



Los principales aportes nutritivos que proporciona el jitomate son vitamínicos, en particular de vitaminas A y C. Tiene propiedades depurativas y ligeramente laxantes. Así mismo, posee virtudes profilácticas frente a trastornos vitamínicos, ayuda al tratamiento de enfermedades de la dentición, anemias y baja resistencia a las infecciones.

2.13 Valor nutricional del jitomate

Componente	Por 100 g de porción comestible
Energía	18 Kcal
Vitamina A	1700 UI
Vitamina C	21 mg
Vitamina B1	0.1 mg
Vitamina B	0.02 mg
Ca ²⁺	11 mg
Mg ²⁺	10 mg
K ⁺	290 mg
Fósforo	27 mg

Fuente: SAGARPA, 2002



3 METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología para llevar a cabo la experimentación con la orina (recolección, almacenamiento y caracterización), el suelo (selección, localización, recolección, almacenamiento, secado, tamizado y caracterización), la planta (selección de la planta, germinación, etc) y el diseño de experimento.

3.1 ORINA HUMANA

3.1.1 Recolección y almacenamiento

La orina humana fue recolectada en el Instituto de Ingeniería, de un mingitorio seco (ver figura 3.1a) ubicado en el edificio cinco, en el descanso del primer piso, previamente adaptado para derivar y coleccionar por medio de una tubería la orina (ver figura 3.1b).

Para la colecta de la orina, primero se procedió a lavar el mingitorio con agua de la red, después se cerraron las llaves y se aplicó una solución ácida de H_2SO_4 0.1 M por 4 horas, con la finalidad de que todas las incrustaciones que se encontraran adheridas a la tubería fueran removidas. Una vez removidas las incrustaciones, se enjuagó con abundante agua de la red antes de comenzar la colecta de la orina.

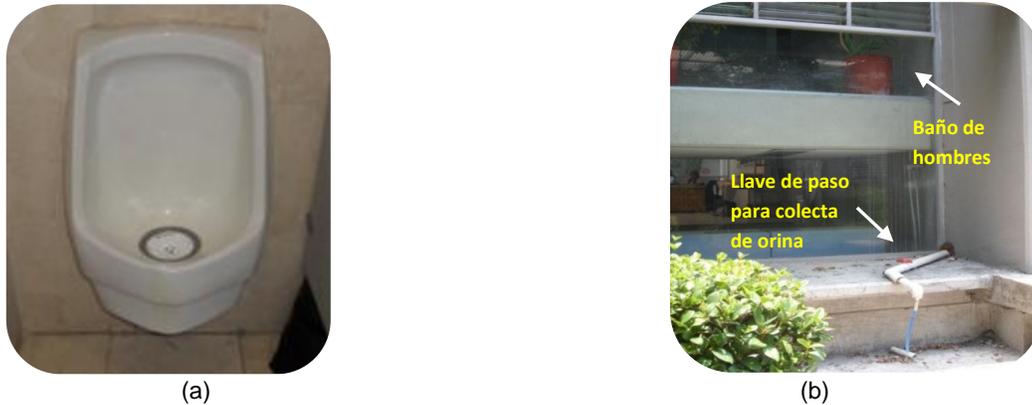


Figura 3.1 (a) Mingitorio seco del Instituto de Ingeniería, (b) Tubería de derivación y colecta de orina

La colecta se realizó durante cuatro días, en el periodo comprendido del 2 al 5 de febrero del 2010. El volumen total de orina colectado fue aproximadamente de 60 L, ésta fue almacenada por seis meses en un recipiente de polietileno con capacidad de 80 L a temperatura ambiente (20.6 ± 2.6), en un cuarto aislado.

3.1.2 Caracterización

La caracterización de la orina se realizó con base en la normas mexicanas específicas para cada parámetro. Las determinaciones se hicieron en el laboratorio de Ingeniería Ambiental, localizado en la planta baja del edificio cinco del Instituto de Ingeniería.

Una vez transcurrido el periodo de seis meses, se extrajo un volumen de orina de 20 L para la experimentación, ésta fue previamente homogenizada y se dejó sedimentar por una hora antes de extraer la alícuota.

Los parámetros medidos son considerados los más importantes y éstos son los más citados en la literatura consultada.

A continuación se muestran los parámetros determinados para la caracterización de la orina y se indica la metodología utilizada, así como la referencia del método aplicado (ver tabla 3.1).

Es importante mencionar que se tomaron las precauciones necesarias en el lavado y enjuague del material utilizado en el laboratorio, ya que éste fue lavado con detergente libre de fosfato para evitar interferencias o contaminación cruzada.

Tabla 3.1 Parámetros determinados en la orina humana

Parámetro	Metodología	Método
pH	Potenciométrico	NMX-AA-008-SCFI-2000
Conductividad		NMX-AA-093-SCFI-2000
Alcalinidad		NMX-AA-036-SCFI-2001
Sólidos totales	Gravimétrico	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos totales volátiles		
Sólidos suspendidos totales		
Sales disueltas		
Sólidos sedimentables		NMX-AA-004-SCFI-2000
DQO	Espectrofotométrico	Análogo al de la EPA 410.4
N-NH ₃	Volumétrico	NMX-AA-026-SCFI-2001
N-total		
Cl ⁻		NMX-AA-073-SCFI-2001
PO ₄ ³⁻	Colorimétrico	Análogo al de la EPA 410.4
N-NO ₃ ⁻		
N-NO ₂ ⁻		Análogo al de la EPA 410.4
DBO	Respirométrico	Sistema Oxitop
Mg ²⁺	Espectrofotometría de absorción atómica, flama	NMX-AA-051-SCFI-2000
K ⁺		
Na ⁺		
Ca ²⁺		
Coliformes fecales	Microbiológica	NMX-AA-102-1987
Coliformes Totales		

3.2 SUELO

El suelo requirió todo un tratamiento, que consistió en la selección, localización, recolección, almacenamiento, secado, pulverizado, tamizado y caracterización; a continuación se describen cada una de estas actividades.

3.2.1 Selección y localización

Como se citó, los resultados derivados de este trabajo de investigación se pretenden tomar como base para hacer uso de la orina humana en el cultivo como el de la zarzamora en la región donde se genera el residuo, por esa razón el suelo utilizado en este proyecto de tesis proviene del municipio de Los Reyes, Michoacán. En el Municipio se localizaron los dos tipos de suelo requeridos, uno de características ligeramente ácidas y otro de características neutras. Se realizaron mediciones de campo de pH con la finalidad de localizarlos. El suelo ácido se localizó en las siguientes coordenadas N 19° 41' 9" y W 102° 30' 30" (ver figura 3.2) a una altitud de 1612 msnm, mientras que el suelo neutro se localizó en las coordenadas N 19° 37' 43" y W 102° 29' 24" a una altitud de

1310 msnm, que corresponde a la zona de cultivo de la zarzamora, la localización de las coordenadas se realizó con un sistema de posicionamiento global (GPS) marca Garmin, modelo Etrex vista H.

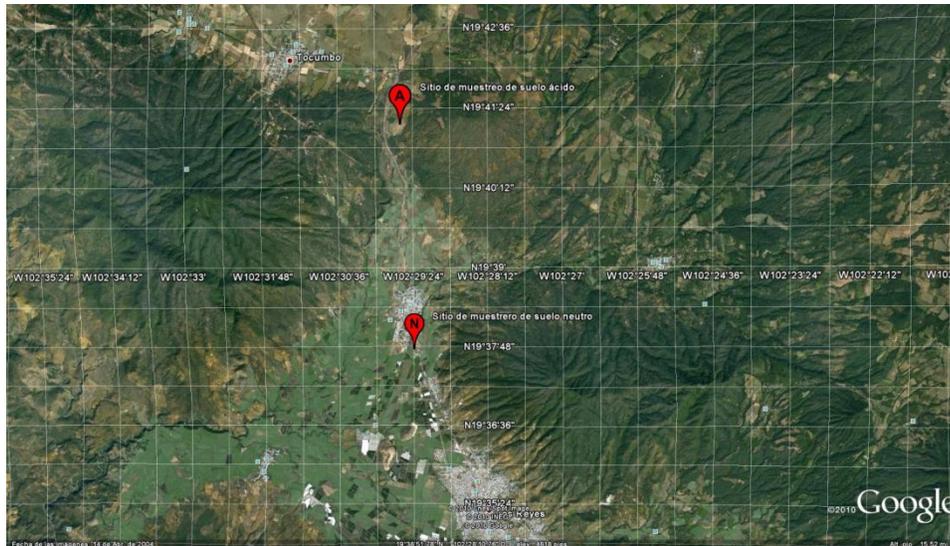


Figura 3.2 Localización del suelo ácido (A) y neutro (N)

3.2.2. Recolección y almacenamiento

El muestreo del suelo ácido y neutro fue puntual y realizado los días 29 y 30 de abril de 2010, respectivamente. Para el muestreo se realizó la limpieza del área, que consistió en remover hojas, basura, hierbas y una capa de 10 cm de la superficie. El suelo colectado se extrajo de la capa de 10 a 30 cm de la superficie (ver figura 3.3).



Fig. 3.3 (a) Suelo ácido, (b) suelo neutro

Las herramientas utilizadas para remover el suelo (de la capa arable) fueron picos, palas y barretas. La cantidad de suelo colectado fue de aproximadamente 400 kg por cada tipo

de suelo. Para el muestreo se buscó que el suelo estuviera lo menos alterado, es decir, que tuviera el menor efecto por tratamiento con fertilizantes y/o plaguicidas.

El suelo se almacenó en costales para su fácil manejo y transporte. Una vez en el Instituto (lugar de trabajo), se mantuvo en un sitio protegido del agua y sol.

3.2.3 Secado, pulverizado y tamizado

El secado del suelo se realizó con el propósito de facilitar el manejo de la muestra, mejorar la homogeneización y disminuir los cambios indeseables (NOM-021-RECNAT-2000).

El secado del suelo consistió en colocar el suelo sobre un piso previamente lavado, la muestra se extendió (ver figura 3.4 a) procurando en lo posible mantener una profundidad menor de 2.5 cm y se colocó a la sombra.

La pulverizado o molienda se realizó con un pizón debido a que el suelo se constituía por terrones de gran tamaño; una vez disgregado se retiró la mayor parte del material orgánico presente (raíces), después todo el suelo se tamizó en una malla con abertura de 1.26 c (ver figura 3.4 b), luego con palas se realizó la homogeneización del mismo, para posteriormente llevar a cabo el cuarteo, del cual se tomó muestra para la caracterización inicial del mismo, y, por último, el suelo fue colocado nuevamente en costales para almacenarlo, todo este proceso se realizó con base en la NOM-021-RECNAT-2000.



(a)



(b)

Fig. 3.4 (a) Extendido del suelo, (b) Malla de tamizado

3.2.4 Caracterización

De la muestra homogénea se recolectó una porción de 2.5 kg de ambos suelos para la caracterización, los cuales fueron nuevamente tamizados con una malla número 10 (2 mm de diámetro) de acero inoxidable como lo indica la norma NOM-021-RECNAT-2000, con la finalidad de realizar la caracterización propuesta en este trabajo. En la tabla 3.2 se resumen los parámetros caracterizados de ambos suelos.

Tabla 3.2. Parámetros determinados en el suelo ácido y neutro

Parámetro	Metodología	Método
pH	Potenciométrico	NOM-021-RECNAT-2000
Conductividad		
Densidad real	Gravimétrico	NOM-021-RECNAT-2000
Humedad		
Capacidad de campo		
N-total	Volumétrico	NOM-021-RECNAT-2000
CIC		
Cl ⁻		
Materia orgánica		
Mg ²⁺	Espectrofotométrico, EAA	NOM-021-RECNAT-2000
K ⁺		
Na ⁺		
Ca ²⁺		
Textura	Hidrómetro de Bouyoucos	NOM-021-RECNAT-2000
Color	Comparación (tabla Munsell)	
N-NO ₂ ⁻	Colorimétrico	Análogo al de la EPA 410.4
N-NO ₃ ⁻		
PO ₄ ³⁻		
Cristalografía	Difracción de rayos X	-
Análisis elemental	Fluorescencia de rayos X	-

3.3 PLANTA

3.3.1 Selección de la planta

La planta seleccionada para cultivar fue jitomate (*Lycopersicon esculentum*), pues la literatura reporta que el tiempo de cultivo es de 88 días (Pradhan et al., 2009); la planta de jitomate es una hortaliza de importancia en nuestro país por la demanda que tiene, además es una hortaliza pequeña, con lo que se facilitó la manipulación tanto del suelo como de la planta.

3.3.2 Germinación

Para la germinación se utilizaron dos variedades de jitomate “guaje” o “saladette” (ver figura 3.5a) y “riñón” (ver figura 3.5b), esta variedad fue elegida con base a su crecimiento, vigorosidad y color al momento de realizar el trasplante.



(a) (b)
Figura 3.5 Jitomate variedad (a) “guaje”, (b) “riñón”

La siembra de las semillas se realizó el día 23 de junio del 2010, colocándolas en un semillero con tierra negra y hojarasca a una profundidad de 5 mm aproximadamente. Germinaron 72 plántulas a los quince días y se mantuvieron 41 días hasta alcanzar la altura promedio de 6.9 cm antes de trasplantarlas en las macetas.

Las plántulas seleccionadas para la experimentación fueron la variedad “guaje” o “saladette” debido a que esta variedad presentó las características citadas; las semillas de esta variedad fueron semillas comerciales marca Floraphil (5 g). En la figura 3.6 se muestra las plántulas de esta variedad a los 41 días de la germinación.



Figura. 3.6 Semillero con plántulas de jitomate “guaje”

3.3.3 Polinización

La polinización es de suma importancia debido a que si no se lleva a cabo la cantidad de fruto será mínima aunque haya una gran producción de flores. Por lo que fue necesario inducir la polinización de una manera manual y mecánica con la finalidad de garantizarla. La polinización se realizó de varias maneras y se llevó a cabo diariamente para obtener una polinización efectiva. A continuación se describen los procedimientos llevados a cabo para tal propósito, conforme se adquirió experiencia del cultivo:

- Se colocó un cepillo de dientes eléctrico en la parte del tallo de la flor por 3 o 4 segundos. Esta operación se realizó cuando la humedad del ambiente era baja (entre las 10:00 y las 12:00 horas). La finalidad de utilizar el cepillo de dientes eléctrico es debido a la vibración de éste, lo cual provoca que la flor se sacuda y se induce la polinización.
- Colocando un ventilador cerca de las plantas, con la finalidad de que éstas tuvieran movimiento y por medio de aireación inducir la polinización.
- Utilizando un pincel de punta fina, el cual se pasaba de flor en flor con la finalidad de transferir el polen, para inducir la polinización.

3.4 FERTILIZANTE MINERAL

El fertilizante mineral utilizado fue de la marca Nutripasto con una composición en peso de 14% de nitrógeno (NH_4^+ , NO_3^-), 2% de fósforo (P_2O_5) y 6.0% de potasio (K_2O).

Debido al estado físico en el que se encontraba el fertilizante fue necesario disolverlo en agua para aplicarlo como disolución al igual que la orina. Para la preparación de la disolución de fertilizante mineral se pesaron 600.3 g de éste y se disolvieron en cuatro litros de agua destilada, se agitó vigorosamente para solubilizar y, por último, se filtró. Esta disolución se mantuvo en refrigeración y en la oscuridad para evitar el crecimiento de hongos y bacterias.

3.5 EXPERIMENTACIÓN

3.5.1 Lugar de experimentación

El lugar utilizado para la experimentación fue una bodega acondicionada como invernadero, espacio ubicado dentro de las instalaciones del Instituto de Ingeniería, detrás del edificio cinco; las dimensiones del invernadero fueron de 8.6 m de largo, 3.2 m de ancho y 2.3 m de altura (ver figura 3.7a).

El techo del invernadero fue modificado, se cambió una parte por una placa de policarbonato translúcido con la finalidad de que la intensidad de luz incidente sobre el invernadero fuera la adecuada para el crecimiento de las plantas (ver figura 3.7b).



(a)



(b)

Figura 3.7 (a) Invernadero, (b) Techo modificado

Como se describió en los antecedentes, el cultivo de jitomate requiere de condiciones específicas ambientales para su óptimo crecimiento, por lo cual fue necesario medir diariamente tres parámetros meteorológicos importantes; éstos fueron: temperatura máxima y mínima, intensidad luminosa y humedad relativa.

La intensidad luminosa (IL) fue medida con un luxómetro marca Sper Scientific LTD modelo 840020, la medición se realizó diariamente alrededor del medio día debido a que a esta hora la incidencia del sol es máxima. La medición de la humedad relativa (HR) se realizó con un higrómetro marca AEMC, modelo CA 846, esta medición se realizaba varias veces al día, debido a que la humedad relativa requerida por la planta de jitomate es del 60% aproximadamente.

La temperatura se midió con un termómetro de máximas y mínimas marca Brannan, medición efectuada diariamente, ya que la temperatura mínima que soporta el cultivo es de 10 °C y la máxima de 35 °C.

Al inicio de la experimentación, al monitorear la temperatura, se observó que ésta en días muy calurosos alcanzaba los 36 °C, por lo cual fue necesario instalar dos extractores (ver figura 3.8a) con la finalidad de que expulsaran el aire caliente, pero fue mínima la disminución de la temperatura, por lo que se tuvo que colocar sobre el techo una malla sombra (ver figura 3.8b) con la finalidad de disminuir la intensidad luminosa. Después de haber colocado la malla la temperatura máxima registrada fue de 31 °C con los extractores encendidos.

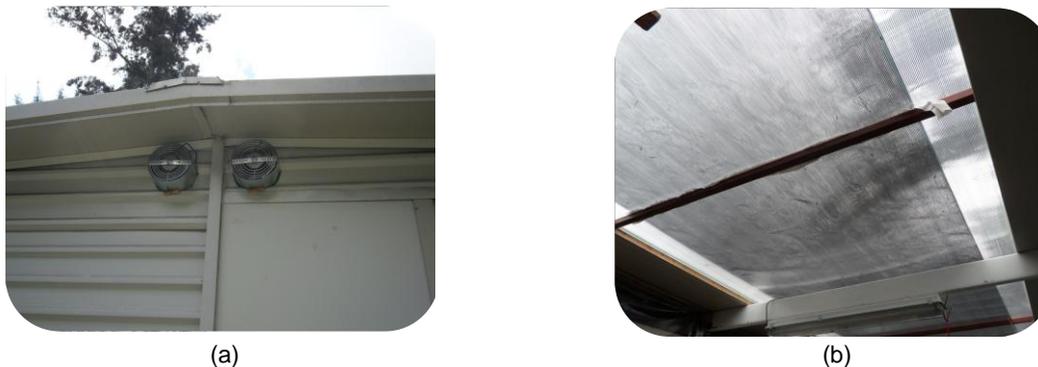


Fig. 3.8 (a) Extractores, (b) Malla sombra adaptada al techo del invernadero

En el mes de octubre, debido a que se registró una temperatura mínima de 9 °C, se ubicaron dos calentadores eléctricos (3.9a), los cuales fueron conectados a un relevador y a una fotocelda (ver figura 3.9b) con la finalidad de que se automatizara el encendido y apagado de los mismos.

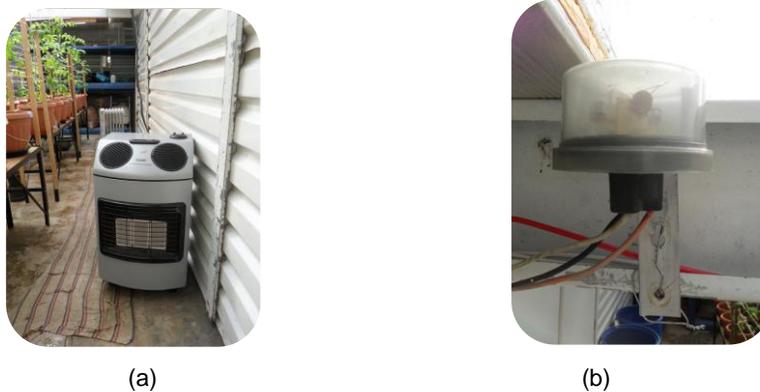


Fig. 3.9 (a) Calentadores, (b) Fotocelda

La humedad relativa también tuvo que controlarse cuando ésta era menor a 60%, la manera de aumentarla fue colocando varias jergas a lo largo del invernadero y humedecerlas, además de que el piso se saturaba para mantener la humedad, esto se hacía frecuentemente debido a que después del medio día la humedad disminuía.

3.5.2 Diseño de experimento

Debido a que existen muchos factores de variabilidad en un experimento como el propuesto, lo más conveniente es plantear un diseño de experimentos con base en las condiciones experimentales seleccionadas y en los factores o variables involucradas. De esa forma, y con base en los antecedentes de estudio, se decidió llevar a cabo un diseño factorial de dos factores con 2 y 4 niveles, es decir, se experimentó con dos suelos (ácido y neutro) y cuatro dosis, para comparar el crecimiento de una planta al regar el suelo con agua destilada exclusivamente, con dos dosis de orina diluidas y dosificando fertilizante mineral con contenidos semejantes de nitrógeno total a la dosis uno de orina. Las pruebas se llevaron a cabo por cuadruplicado para evaluar el error experimental. En la figura 3.10 se muestra el arreglo experimental y en la tabla 3.3 se muestra la asignación de tratamientos.

La variable de respuesta considerada fue la producción de jitomate, la cual se evaluó con un análisis de varianza (ANOVA) y comparaciones múltiples de Tukey, ésta última con la finalidad de detectar diferencias entre las medias de tratamientos (ver inciso 3.6).

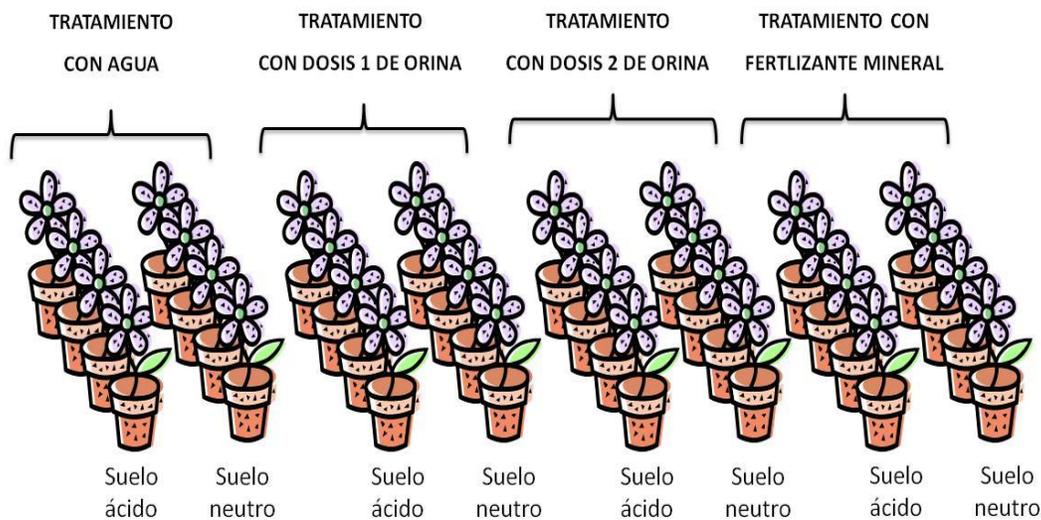


Figura 3.10 Arreglo experimental

Tabla 3.3. Asignación de tratamientos

Tipo de suelo	No. de maceta	Clave	Tratamiento	Tipo de suelo	No. de maceta	Clave	Tratamiento
Suelo ácido	1	T1-A	Agua destilada	Suelo neutro	17	T1-N	Agua destilada
	2				18		
	3				19		
	4				20		
	5	T2-A	Orina dosis 1		21	T2-N	Orina dosis 1
	6				22		
	7				23		
	8				24		
	9	T3-A	Orina dosis 2		25	T3-A	Orina dosis 2
	10				26		
	11				27		
	12				28		
	13	T4-A	Fertilizante mineral		29	T4-N	Fertilizante mineral
	14				30		
	15				31		
	16				32		

3.5.3 Descripción experimental

La experimentación consistió en colocar en cada maceta (31 cm de diámetro superior, 20.2 cm de diámetro inferior y 25 cm de altura) 8 kg de suelo, sea ácido o neutro. Cada tratamiento se llevó a cabo por cuadruplicado, haciendo un total de 32 macetas. Todas las macetas estuvieron sujetas a las mismas condiciones de riego mientras los requerimientos de agua fueron similares. Cabe mencionar que durante el riego se utilizó agua destilada como medio de dilución.

Una vez colocado el suelo, se llevó el trasplante de la plántula de jitomate variedad “guaje” o “saladette”; la altura promedio de las plántulas trasplantadas fue de 6.9 cm. Las macetas fueron ubicadas en mesas o soportes metálicos (bastidor de ángulo de $\frac{3}{4}$ ”) hechas ex profesamente con ese propósito, con dimensiones de 1.2 m x 0.30 m x 0.60 m. Se colocaron cuatro macetas por soporte, los cuales fueron separados en dos hileras a una distancia aproximadamente de 20 cm (ver figura 3.11).



Figura 3.11 Distribución de las macetas y trasplante

La asignación de macetas fue aleatoria (ver figura 3.12), la aleatorización se realizó con la finalidad de evitar que los resultados sean contaminados por los efectos de variables inconvenientes desconocidas, que pueden salir de control durante el experimento; la fecha del trasplante se realizó el tres de agosto del 2010, considerando a este día, como día uno de cultivo.

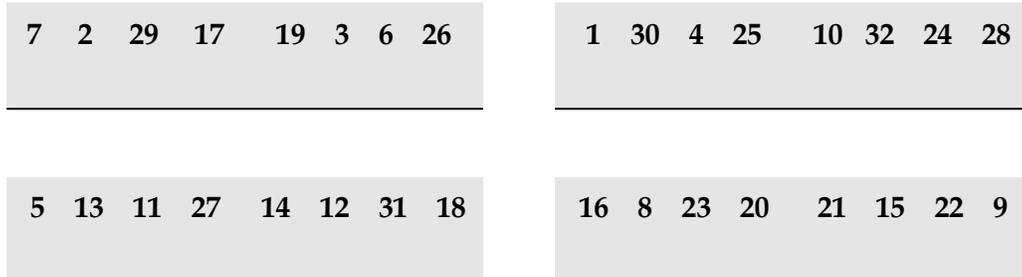


Figura 3.12 Colocación aleatoria de las macetas

Después de trasplantarlas, cada maceta fue regada según el tratamiento asignado, en el día uno del cultivo la primera adición de agua o disolución para cada planta fue de 1733 ml. Ese volumen de agua fue adicionado debido a que el suelo contenido en cada maceta se humectó al 60% de la capacidad de campo con objeto de evitar el escurrimiento o drenado.

Se evitaron los lixiviados con la finalidad de que no hubieran pérdidas, por tal motivo a las macetas se les colocó un plato debajo, con el objetivo de recuperar el lixiviado a la maceta para los casos que lo presentaran. El riego fue realizado alrededor de la planta comenzando por el centro y terminando en las orillas de la maceta, evitando contaminar las hojas.

Como ya se citó, los tratamientos seleccionados fueron 4: el primero consistió en riego con agua destilada, el segundo y tercero riego con orina diluida y el cuarto riego con fertilizante mineral. Con la finalidad de facilitar su identificación y evitar equivocaciones al momento del riego, a cada tratamiento se le asignó un color (ver tabla 3.4).

Tabla 3.4 Asignación de colores por tratamiento

No. de maceta	Tratamiento	Tipo de suelo	No. de maceta	Tratamiento	Tipo de Suelo	Color	
1	Blanco	Ácido	17	Blanco	Neutro	Lila	
2			18				
3			19				
4			20				
5	Orina dosis 1		21	Orina dosis 1		Rosa	
6			22				
7			23				
8			24				
9	Orina dosis 2		25	Orina dosis 2			Azul
10			26				
11			27				
12			28				
13	Fertilizante		29	Fertilizante		Amarillo	
14			30				
15			31				
16			32				

Con base en la revisión bibliográfica se determinó la dosis de orina de aplicación en el cultivo del jitomate. La dosis propuesta de orina y fertilizante a dosificar a la planta durante siete semanas fue de 84.6 mg N/semana. En la tabla 3.5 se indica la dosificación semanal aplicada hasta llegar a una concentración total de 592.2 mg de N.

Tabla 3.5 Concentración de N-total (acumulado) semanal

Semana	N-total acumulado (mg) (T2, T4)	N-total acumulado (mg) (T3)
1	84.6	169.2
2	169.2	338.4
3	253.8	507.6
4	338.4	676.8
5	423.0	846.0
6	507.6	1015.2
7	592.2	1184.4

Conforme las plantas fueron creciendo se hizo necesario adaptar sobre los soportes un tapesco, con la finalidad de que sostuviera la planta cuando ésta tuviera frutos, debido a que éstos son pesados y la planta necesita de una guía para soportarlos, ver figura 3.13.



Figura 3.13 Tapesco adaptado a los soportes

3.5.4 Mediciones durante y después del cultivo

Durante la experimentación fue necesario dar seguimiento periódicamente al riego, crecimiento, floración y producción de frutos de cada planta, pero después del término de éste, se preparó el suelo para las determinaciones de CIC, iones intercambiables y lixiviables y se le dió seguimiento al desarrollo de la raíz.

3.5.4.1 Evaluación de la planta durante el crecimiento

Como forma indirecta de evaluar la dinámica de crecimiento de la biomasa, se decidió hacer periódicamente dos tipos de mediciones de las plantas: la primera consistió en medir con un flexómetro la altura del tallo principal cada siete días como se observa en la figura 3.14; la segunda medición fue el conteo del número de hojas, la cual se consideró durante el desarrollo de las plantas como la producción de biomasa más aproximada. La contabilización de hojas se realizó con la misma frecuencia que la medición de la altura de la planta.



Figura 3.14 Medición de la altura de la planta

3.5.4.2 Manipulación de la planta y suelo después del cultivo

Una vez terminado el periodo de cultivo de la planta de jitomate (175 días), se cosecharon los frutos (sólo para el caso de suelo neutro) y éstos fueron lavados, pesados y medidos. Posteriormente se procedió a cortarlos en gajos, sólo los frutos maduros, y se secaron en estufa a 60 °C aproximadamente por 48 horas en charolas cubiertas de teflón. Una vez secos se procedió a molerlos en un mortero hasta obtener un polvo de textura fina.

La planta se procedió a cortarla en pedazos pequeños con tijeras, para posteriormente secarla en charolas de acero inoxidable a 103 - 105 °C aproximadamente por 48 horas, el corte fue sólo de la planta sin raíz. Después del secado se procedió a moler la planta, este proceso se realizó con un molino para grano de café, debido a que con el mortero no hubo ruptura de tallo.

Después el suelo fue retirado de las macetas y fue pasado a tinas con la finalidad de remover toda la raíz posible (ver figura 3.15), posteriormente se pasó a bolsas de plástico para después secarlo, esto se realizó a la sombra y al aire libre, pero debido a la humedad que contenía el tiempo de secado fue aproximadamente de siete días. Después de este proceso, el suelo se pasó a tinas con la finalidad de homogenizar perfectamente y realizar el cuarteo para la extracción de muestra. La muestra extraída para los análisis fue de aproximadamente 1 kg, la cual fue tamizada en una malla de acero inoxidable del número 10. El suelo restante fue guardado en bolsas de plástico dentro del invernadero.



La raíz se retiró del suelo procurando quitar todo el que estaba adherido a ésta. La raíz se secó a la sombra y después se secó en estufa a 103 - 105 °C aproximadamente por 48 horas. La molienda de la raíz también se realizó con el molino para grano de café.

3.5.5 Caracterización de suelo, planta y fruto después del cultivo

Con la experimentación propuesta se espera conocer el efecto del residuo (orina) en el crecimiento del cultivo del jitomate, las características del suelo y el comportamiento de algunos cationes y aniones expuestos en el suelo durante el periodo de pruebas. Por lo anterior, se evaluó en el suelo la capacidad de intercambio catiónico, bases intercambiables, iones lixiviables (K^+ , Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+}), pH, conductividad, aniones en el lixiviado, tales como fosfatos (PO_4^{3-}), nitratos (NO_3^-) y nitritos (NO_2^-). De la planta y del fruto también se evaluaron los cationes ya citados, además de determinar el porcentaje de nitrógeno en jitomate, con un instrumento marca Leco modelo FP 528. Todos los análisis de los iones (K^+ , Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+}) se realizaron con la técnica espectrofotométrica de absorción atómica (EAA), con un instrumento marca Perkin Elmer, modelo 1100 B; los resultados de K^+ , Na^+ obtenidos mediante la técnica de EAA fueron comparados con la de flamometría con la finalidad de validar resultados. En el capítulo 4 se describe con mayor detalle el procedimiento que se siguió para la evaluación descrita.

3.6 ANALÍISIS ESTADÍSTICO

3.6.1 Análisis de varianza

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) simple o de un solo factor, para la producción del cultivo de jitomate en suelo neutro, ya que ésta fue considerada como la única variable de respuesta.

Sea el modelo:

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}, \quad \varepsilon_{ij} \sim NIID(0, \sigma^2), \quad \tau_i = \mu_i - \mu; \quad \sum_{i=1}^t \tau_i = 0;$$

con $i=1, 2, \dots, t$; $j=1, 2, \dots, n_i$;

n_i es el número de repeticiones del tratamiento i .

$n_{\square} = \sum_{i=1}^t n_i$ es el total de unidades experimentales.

En el análisis de varianza se comparan varianzas para poder probar las siguientes hipótesis equivalentes:

$$\begin{aligned} H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_t = \mu & \quad \text{VS} \\ : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_t = 0 & \\ : \text{El efecto de los tratamientos es nulo.} & \end{aligned}$$

En la tabla 3.6 se muestra el procedimiento de prueba, que se le conoce como análisis de varianza. Donde y_i representa el total de las observaciones bajo el tratamiento i-ésimo. Sea que \bar{y}_i representa el promedio de las observaciones bajo el tratamiento i-ésimo. De manera similar, sea que $y_{..}$ representa el gran total de todas las observaciones y que $\bar{y}_{..}$ corresponde al gran promedio de las observaciones.

Tabla 3.6 Tabla de análisis de varianza para el modelo con un solo factor

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fc
Entre los tratamientos	$SS_{Trat} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2$	$a - 1$	MS_{Trat}	$F_0 = \frac{MS_{Trat}}{MS_E}$
Error (dentro de los tratamientos)	$SS_E = SS_T - SS_{Trat}$	$N - a$	MS_E	
Total	$SS_T = n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$	$N - 1$		

3.6.2 Comparaciones múltiples (Tukey)

La razón de hacer el análisis de comparaciones múltiples de Tukey, es debido a que en el ANOVA fue rechazada la hipótesis nula ($H_0: \mu_i = \mu_j$ para toda $i \neq j$), y la técnica de comparaciones múltiples permite contrastar hipótesis sobre pares de tratamientos.

La técnica consiste en considerar dos promedios de dos tratamientos cualesquiera y se observa si la diferencia entre ellos, en valor absoluto, es lo “suficientemente grande”; de ser así se concluye entonces que la diferencia es importante; esto es, que la diferencia es significativa. Para calcular esta diferencia, se utiliza la estadística denominada diferencia mínima significativa a un nivel de significancia. Esta estadística proporciona el valor a partir del cual las diferencias mayores que ella se considera que son “suficientemente grandes” con un nivel de significancia α (Montgomery, 2011).

3.6.3 Diseño factorial de dos factores

El análisis estadístico propuesto es un diseño factorial de dos factores, para ser el caso general, sea y_{ijk} la respuesta observada cuando el factor A tiene el nivel i-ésimo ($i=1, 2, \dots, a$) y el factor B tiene el nivel j-ésimo ($j=1, 2, \dots, a$) en la réplica k-ésima ($k=1, 2, \dots, a$), en general, el experimento factorial de dos factores se representa como en la tabla 3.7. El orden en que se hacen las observaciones se selecciona al azar, por lo que este diseño es

un diseño completamente aleatorizado. Y el procedimiento de prueba suele resumirse en una tabla de análisis de varianza, como se muestra en la tabla 3.8 (Montgomery, 2011).

Tabla 3.7 Arreglo general de un diseño factorial de dos factores

		Factor B			
		1	2	b
Factor A	1	$Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$	$Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$		$Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$
	2	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$		$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$
				
	a	$Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$	$Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$		$Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$

Las observaciones pueden describirse mediante el modelo estadístico lineal:

$$Y_{ijr} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijr};$$

$$i = 1,2; j = 1, 2; r = 1, 2, 3,4$$

Donde:

μ es la media general, ocasionada por los factores comunes en la población general en estudio

τ_i es el efecto del i-ésimo nivel del factor del renglón B

β_j es el efecto del j-ésimo nivel del factor de columna A

$(\tau\beta)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre τ_i y β_j

ε_{ijr} . Es la fluctuación aleatoria ocasionada por los factores no comunes en la población de la repetición r-ésima.

Tabla 3.8 Tabla de análisis de varianza para el diseño factorial de dos factores, modelo con efectos fijos

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fc
Tratamientos A	SS_A	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
Tratamientos B	SS_B	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interacción	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$ab(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	
Total	SS_T	$abn - 1$		



4

RESULTADOS Y SU ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados y el análisis de los mismos con respecto a la caracterización del suelo, orina y fertilizante, monitoreo de las condiciones ambientales, así como el análisis de las plantas en cuanto a su crecimiento y número de hojas con respecto al tratamiento propuesto y el análisis químico del suelo después del cultivo, del fruto y planta. También se incluye el análisis estadístico correspondiente.

4.1 CARACTERIZACIÓN

4.1.1 Orina humana

Se realizó la caracterización de la orina humana colectada con base en las metodologías descritas en el capítulo 3, que fue caracterizada después de seis meses de almacenamiento con objeto de abatir microorganismos tales como los coliformes que reportan en la bibliografía consultada. En la tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos por triplicado de dicha caracterización.

El pH de la orina es básico con un valor de 9.08, esto es porque la urea se ha hidrolizado, lo cual coincide con lo reportado por la bibliografía en el caso de orina almacenada. La conductividad fue de 38.9 mS/cm, lo cual indica un alto contenido de sales disueltas como es de esperarse, ya que en la dieta diaria hay consumo de cloruro de sodio (NaCl) entre otras formas químicas ionizables. Con respecto a los sólidos totales, éstos están en gran cantidad como consecuencia de las sales que contiene dicho residuo.

Tabla 4.1 Caracterización de la orina humana

Parámetro	Resultado promedio \pm DE
pH	9.08 \pm 0.02
Conductividad, mS/cm	38.9 \pm 0.05
Sólidos totales, mg/L	12755 \pm 119
Sólidos totales volátiles, mg/L	3110 \pm 34
Sólidos suspendidos totales, mg/L	222.5 \pm 12
Sólidos disueltos totales, mg/L	12533 \pm 58
Sólidos sedimentables, mL/L	< 0.5
DQO, mg/L	34925 \pm 32
N-NH ₃ , mg/L	5769 \pm 47
N-total, mg/L	6170 \pm 26
N-NO ₂ ⁻ , mg/L	2.33 \pm 0.005
N-NO ₃ ⁻ , mg/L	88.0 \pm 0.094
DBO, mg/L	2450 \pm 5.2
Mg ²⁺ , mg/L	14.84 \pm 0.29
Ca ²⁺ , mg/L	14.6 \pm 2.44
K ⁺ , mg/L	1674 \pm 2.97
Na ⁺ , mg/L	2424 \pm 0.98
Cl ⁻ , mg/L	5452 \pm 44
PO ₄ ³⁻ , mg/L	242.1 \pm 0.01
Alcalinidad, mg/L	20533 \pm 317
Coliformes fecales, UFC	Ausencia
Coliformes totales, UFC	Ausencia

DE. Desviación estándar

El contenido de nitrógeno amoniacal en la orina fue de 5.77 g N-NH₃/L y el de nitrógeno total 6.17 g N-total/L, del cual el 93.5% está como amoniacal y el resto en forma orgánica, entre las que pueden encontrarse a la creatinina, aminoácidos y/o ácido úrico (Karak y Bhattacharyya, 2011). El valor de 6.17 g N-total/L comparado con los que se reporta en la literatura es menor; esto puede deberse al tipo de dieta y a que la orina se almacenó a temperatura ambiente, lo que posiblemente ocasionó desorción de NH₃ a la atmósfera.

En cuanto a otros nutrimentos importantes de la orina, se encontró que ésta contiene 14.6, 5.48 y 1674 mg/L de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺, respectivamente. Aunque el calcio y el magnesio están en bajas cantidades, K⁺ está en mayor concentración, y este elemento es un macronutriente importante para el desarrollo de la planta.

Es importante recalcar que de los análisis microbiológicos realizados los coliformes totales y fecales están ausentes, lo cual es posible atribuirlo, como lo citan las referencias (Vinnerås et al., 2008; Höglund et al., 2002), al pH alcalino de la orina que inhibe el crecimiento y sobrevivencia en el medio, este resultado es favorable ya que el cultivo no estará por lo menos contaminado con esos microorganismos; aunque la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece “los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales”, permite una descarga vertida a suelo (uso en riego agrícola) entre 1000 y 2000, como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 mL para el promedio mensual y diario, respectivamente.

4.1.2 Fertilizante mineral

En lo que respecta a la caracterización del fertilizante mineral, en la tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización.

Tabla 4.2 Caracterización del fertilizante mineral

Parámetro	Resultado
pH	5.41 ± 0.02
Conductividad, mS/cm	68.3 ± 0.08
Sólidos sedimentables, mL/L	< 0.5
N-NH ₃ , mg/L	9477 ± 147
N-NO ₃ ⁻ , mg/L	3915 ± 0.23
N-total, mg/L	13065 ± 152
N-NO ₂ ⁻ , mg/L	0.02 ± 0.0
Cl ⁻ , mg/L	ND
PO ₄ ³⁻ , mg/L	690.4 ± 0.04
P-total, mg/L	1235.5 ± 72
K ⁺ , mg/L	2526 ± 16
Na ⁺ , mg/L	101.2 ± 16
Ca ²⁺ , mg/L	25.3 ± 5
Mg ²⁺ , mg/L	340 ± 16.8

ND: No detectado

El fertilizante granulado fue disuelto en agua destilada, con la finalidad de agregarlo líquido, tal y como fue dosificada la orina. Es importante observar que del nitrógeno contenido en el fertilizante, el 72.5% es amoniacal y el 27.5% en forma de nitrato, lo cual difiere de la orina, ya que en ésta el 93.5% está en forma amoniacal. Además de nitrógeno, el fertilizante contiene potasio, fósforo en concentraciones altas y calcio y magnesio en concentraciones bajas.

La cantidad de sodio y ion cloruro está por debajo a la contenida en la orina. En cuanto al pH del fertilizante mineral éste es menor que el de la orina en 3.7 unidades, lo que es una diferencia significativa, ya que la orina es básica y el fertilizante tiene características ácidas.

4.1.3 Suelo

En la tabla 4.3 se muestra la caracterización del suelo moderadamente ácido (SA) y del suelo neutro (SN) antes de la experimentación, los cuales en el análisis de resultados se identifican como T0, debido a que no tienen tratamiento.

Tabla 4.3 Caracterización del suelo ácido y neutro

Parámetro	Suelo ácido	Suelo neutro
Textura	Arcilla	Franco arcilloso
Arena, %	21.5	31.5
Limo, %	28.0	30.0
Arcilla, %	50.5	38.5
Color	Rojo oscuro (2.5YR 3/6)	Rojo claro (2.5YR 4/2)
pH (H ₂ O)	6.18 ± 0.04	6.83 ± 0.01
Conductividad, µS/cm	68.8 ± 1.9	57.8 ± 0.5
Densidad real, t/m ³	2.58	2.62
Humedad, %	8.5 ± 0.16	11.0 ± 0.06
Materia orgánica, %	1.24 ± 0.14	1.61 ± 0.001
Capacidad de campo, g H ₂ O/kg suelo	361 ± 3	394 ± 4
N-total, mg/kg	1000 ± 0.1	1400 ± 0.3
Metales (digestión ácida), mg/kg suelo		
Mg ²⁺	1542 ± 85	5498 ± 119
K ⁺	891 ± 80	866 ± 91
Na ⁺	330 ± 10	416 ± 16
Ca ²⁺	ND	ND
Fe _{total} , g /kg suelo	86.0 ± 0.3	72.6 ± 0.7
Al ³⁺ , g /kg suelo	135.0 ± 2.1	125.5 ± 3.4
Capacidad de intercambio catiónico, Cmol(+)/kg	26.6 ± 0.87	34.8 ± 1.44
Bases intercambiables, Cmol/kg		
K ⁺	8.57 ± 0.52	9.13 ± 0.48
Na ⁺	2.87 ± 0.86	3.91 ± 0.09
Ca ²⁺	116.9 ± 38	149.9 ± 31
Mg ²⁺	114.6 ± 27	131.6 ± 28
Lixiviado, mg/kg		
PO ₄ ³⁻	< 0.25	< 0.25
N-NO ₃ ⁻	< 5.0	< 5.0
N-NO ₂ ⁻	0.1	< 0.1

ND. No detectado

La NOM-021-RECNAT-2000, que establece las “especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis” clasifica al suelo de pH 6.83 como

neutro, mientras que al de pH 6.18 lo clasifica como un suelo moderadamente ácido, que para fines prácticos en los resultados éste último se identifica como suelo ácido.

La conductividad del suelo ácido y neutro es de 68.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0.069 dS/m) y 57.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0.058 dS/m), respectivamente, valores que la NOM-021-REC NAT-2000 clasifica como de efecto despreciable de salinidad, debido a que ambos suelos tienen una conductividad menor a 1 dS/m.

La humedad del suelo fue baja en el momento del muestreo, lo cual facilitó todo el proceso de secado, molienda y tamizado. Con respecto a la textura, se confirma que el suelo moderadamente ácido es arcilloso y el neutro es franco arcilloso. Y con respecto a la materia orgánica (MO) el suelo neutro contiene 1.61%, por lo tanto corresponde a una clasificación media, y, en el caso de el suelo ácido a una baja con un 1.24% de MO.

En lo que respecta a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la NOM-021- REC NAT-2000 clasifica a ambos suelos como de alta fertilidad, aunque el suelo moderadamente ácido se encuentra en el límite inferior del intervalo (25 – 40 Cmol(+)/kg) y el neutro cercano al límite superior.

Fue necesario realizar un análisis elemental de los suelos mediante las técnicas de difracción de rayos X (ver tabla 4.4) y fluorescencia de rayos X (ver tabla 4.5), con la finalidad de obtener una caracterización del suelo más completa y poder disponer de mayor cantidad de información para interpretar de manera conjunta las diferencias en el crecimiento del cultivo del jitomate. Los análisis se realizaron en el laboratorio de fluorescencia y difracción de rayos X del Instituto de Geología.

Tabla 4.4 Difracción de rayos X

Especie mineral	Fórmula química	Suelo ácido	Suelo neutro
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	✓	-
Bitownita	$0.23 \text{NaAlSi}_2\text{O}_8 \ 0.77 \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	-	✓
Cuarzo	SiO_2	✓	✓
Goetita	$\text{FeO}(\text{OH})$	✓	✓
Haloisita 7A	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	✓	✓
Hematita	Fe_2O_3	✓	✓
Kaolinita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	✓	✓
Lizardita	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5$	✓	-
Rutilo	TiO_2	✓	-
Tridimita	SiO_2	-	✓

Con la difracción de rayos X se detecta la presencia de hematita para ambos suelos, que es un óxido de hierro que se presenta en suelos altamente intemperizados de color rosado a rojo (Bohn, 1993), el cual le da el color rojizo que tienen los suelos de estudio, también hay kaolinita y haloisita 7A; tales minerales se caracterizan por contener aluminio, que es un elemento que se encuentra de manera importante en dichos suelos, y estos minerales son los que lo aportan, además de la albita para el caso del SA y de la bitownita para el SN.

Tabla 4.5 Fluorescencia de rayos X

Muestra	% p / p										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Na ₂ O	MgO	PxC
SA	38.69	28.52	14.84	0.53	1.99	0.34	0.26	0.15	0.30	0.62	13.79
SN	39.44	28.04	13.05	0.86	1.78	0.18	0.28	0.23	0.36	0.87	15.01

PxC hace referencia a la pérdida por combustión

Con base en la técnica de fluorescencia de rayos X se muestra que en la composición de ambos suelos las especies se encuentran en órdenes de magnitud semejantes, a pesar de que la respuesta del cultivo de jitomate no lo fue; esta similitud es posible atribuirla a que los suelos fueron extraídos de zonas en las que éstos no han sido “alterados”, es decir, que el efecto por adición de fertilizantes y/o plaguicidas ha sido mínima.

Los minerales primarios (SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃) conforman alrededor del 81.3% de ambos suelos, de los que se puede decir que son suelos poco meteorizados o que han resistido a la misma y por lo mismo se han acumulado gradualmente (Fassbender, 1987).

4.2 CULTIVO DE JITOMATE

El período del cultivo de jitomate en ambos suelos comprendió del 03 de agosto del 2010 al 24 de enero del 2011, la duración del cultivo fue de 175 días (6 meses). El tiempo de cultivo estaba programado para 88 días (Pradhan, 2009), pero se extendió el doble del tiempo esperado. A lo largo de este período los registros evaluados durante el cultivo del jitomate fueron: el crecimiento de la planta y la producción de biomasa, considerando a la biomasa como las hojas producidas; ambas mediciones fueron hechas cada ocho días.

4.2.1 Dosificación de nutrimentos

La dosificación de nutrimento trató de realizarse como se propuso en la tabla 3.5, citada en metodología. Las disoluciones de orina y fertilizante fueron preparadas tomando en cuenta el contenido de nitrógeno. En la tabla 4.6 se indica los mg de nitrógeno aplicado por maceta, así como los días en los que se realizó la dosificación. En la tabla no se incluye el tratamiento T1, puesto que este sólo fue regado con agua destilada, por lo que no tiene aporte de nutrimentos.

Tabla 4.6 Nitrógeno aplicado (mg) por maceta durante el periodo de cultivo

Día	mg de N por planta		Día	mg de N por planta	
	T2 y T4	T3		T2 y T4	T3
1	63.45	126.9	31	42.3	84.6
4	21.15	42.3	36	84.6	169.2
6	21.15	42.3	40	42.3	84.6
8	21.15	42.3	44	84.6	169.2
10	21.15	42.3	50	42.3	84.6
13	21.15	42.3	55	42.3	84.6
16	42.3	84.6	84	42.3	84.6
19	42.3	84.6			

En total se realizaron 15 dosificaciones con nutrimento. Desde el primer riego al cultivo se le adicionó nutrimento, y así fueron la mayoría de los riegos hasta el día 55; a excepción de los días 24 y 28 del cultivo, el riego solamente fue con agua, con la finalidad de evitar que las plantas se estresaran por la adición continua de nutrimentos. En el día 55 se completaron las dosis propuestas, pero debido a que el nitrógeno amoniacal es posible que se difunda a la atmósfera, se realizó una adición extra de 42.3 (T2-N y T4-N) y 84.6 (T3-N) mg de N el día 84.

En la figura 4.1 se muestra la dosificación de nitrógeno acumulada (mg) durante el cultivo de jitomate para los cuatro tratamientos, que para los tratamientos 2 y 4 fue la misma.

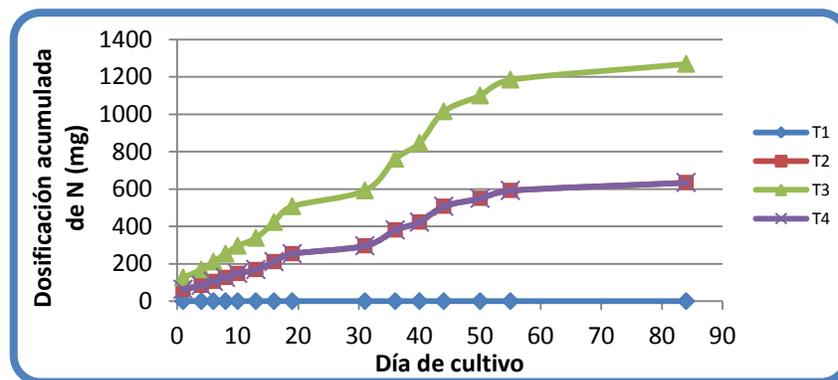


Figura 4.1 Dosificación acumulada de N en el cultivo de jitomate

En la tabla 4.7 se especifican las cantidades adicionadas de los demás nutrientes (P_{total} , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}). Como el nutriente base de experimentación fue nitrógeno, los demás iones no corresponde con la misma concentración en ninguno de los tratamientos; además se indica el volumen total utilizado por maceta orina y fertilizante mineral.

Tabla 4.7 Nutrientes aplicados durante el periodo de cultivo por maceta

Nutrientes	T2	T3	T4
N total (mg)	634.5	1269	634.5
P total (mg)	75.6	151.2	59.2
K^+ (mg)	172.1	344.2	121.0
Na^+ (mg)	249.2	498.4	4.85
Ca^{2+} (mg)	1.5	3.0	1.21
Mg^{2+} (mg)	0.56	1.12	16.3
Volumen total aplicado (mL)	102.8	205.7	47.9

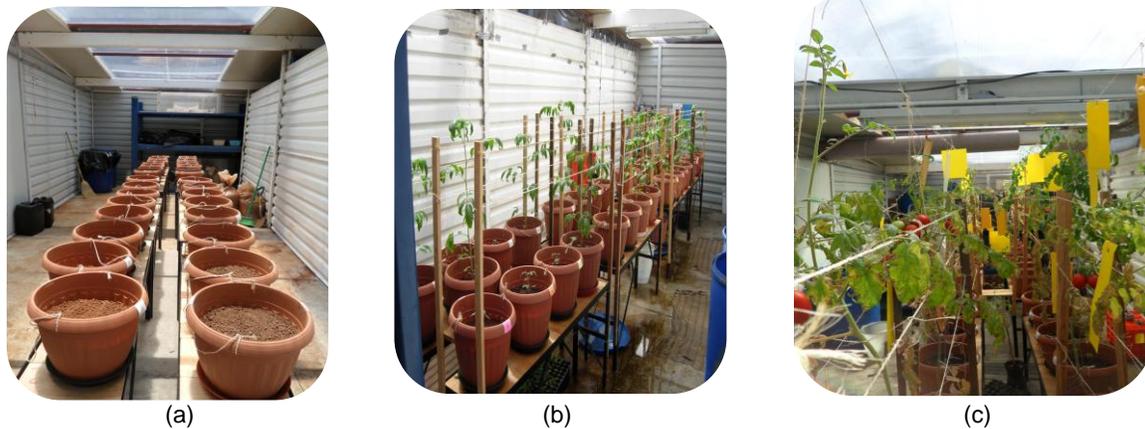
4.2.2 Riego

El propósito de realizar los primeros riegos con la adición de nutriente fue para garantizar que éste se encontrara distribuido en todo el suelo, y que al adicionar agua no se lavara. El total de orina utilizada para el riego del cultivo de jitomate fue de 2.67 litros; al momento de realizar el riego se percibía el olor característico de la orina, el cual sólo perduraba algunos minutos. Una vez cubierta la dosificación de nutriente, las plantas fueron regadas sólo con agua destilada, según la demanda de ésta.

Los primeros ocho riegos se realizaron con base en la demanda de agua de la planta, en la figura 4.1 se observa que fueron frecuentes, lo cual se debió a que el invernadero no tenía la malla sombra por lo que la temperatura era elevada, y, en consecuencia, la demanda de agua y evapotranspiración era mayor. Después de la colocación de la malla sombra los riegos fueron más espaciados.

4.2.3 Crecimiento y producción del cultivo de jitomate en suelo neutro

Es importante mencionar que hubo una notada diferencia del cultivo de jitomate entre los dos clases de suelo, debido a que en el suelo neutro la planta respondió como se esperaba, ya que tuvo crecimiento, producción de biomasa (hojas), floración y frutos, mientras que en el suelo ácido el crecimiento de la planta fue mínimo y no desarrolló floración, ni fruto. En la figura 4.2 se muestran algunas tomas del desarrollo del cultivo de jitomate a lo largo de los 175 días. Es importante recalcar que la colocación de las macetas fue aleatoria.



(a) (b) (c)
Figura 4.2 Crecimiento de la planta de jitomate en suelo neutro y ácido
(a) día 1, (b) día 69, (c) día 161

En la figura 4.3 se representan las alturas promedio (cm) alcanzadas por las plantas en el periodo citado de cultivo en suelo neutro, donde T1-N corresponde al tratamiento con agua, T2-N a dosis uno de orina, T3-N a dosis dos de orina y T4-N a fertilizante mineral para todos los casos en suelo neutro.

La medición de las plantas se realizó a partir del día 22, esto fue debido a que las plantas no tuvieron un crecimiento notable comparado al día uno de trasplante donde la altura promedio de las mismas fue de 6.9 cm. En los tratamientos correspondientes a la orina (T2-N y T3-N) y el fertilizante (T4-N) se observó un crecimiento similar pero menor al del tratamiento T1-N hasta el día 117, y para el día 175 el tratamiento T4-N fue el de mayor crecimiento seguido del T3-N y por último el T2-N, el cual fue menor al T1-N.

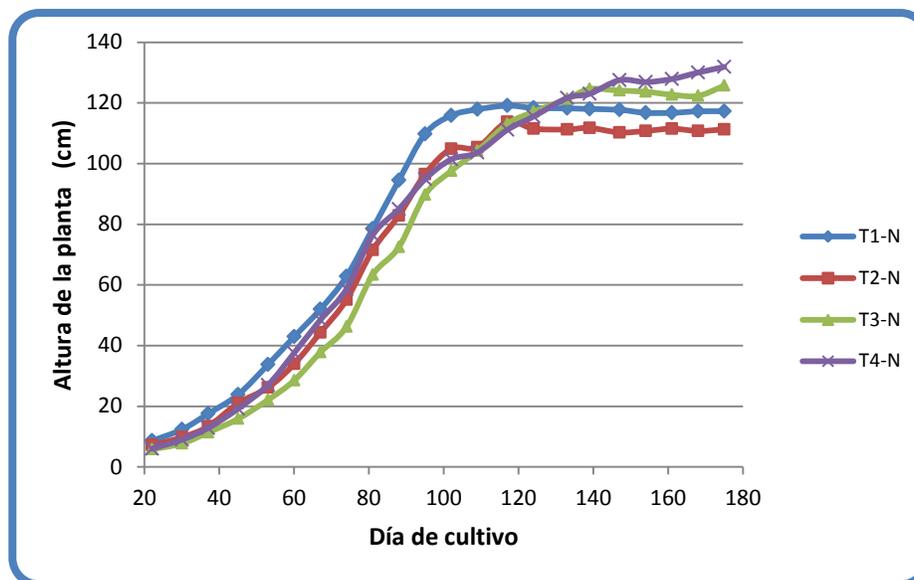


Figura 4.3 Crecimiento del cultivo de jitomate en suelo neutro

Con base en el crecimiento observado en la figura 4.3, se representan en la tabla 4.8 las ecuaciones de las rectas representativas para cada tratamiento con las correlaciones correspondientes, con objeto de calcular la tasa de crecimiento.

Tabla 4.8 Razón de crecimiento del cultivo de jitomate en suelo neutro

Tratamiento	Regresión lineal	R
T1-N	$Y= 1.7163X - 58.514$	0.981
T2-N	$Y= 1.3957X - 43.856$	0.980
T3-N	$Y= 1.1099X - 22.726$	0.972
T4-N	$Y= 1.2918X - 43.437$	0.950

Todos los tratamientos tuvieron un desarrollo esperado de la planta de jitomate en suelo neutro, el cual consistió en el crecimiento, floración y fruto, con excepción de la maceta 25 (T3-N) que no tuvo floración y como consecuencia no hubo producción de jitomate. Del cultivo se observó que después del día 40 hubo un crecimiento notable de las plantas de jitomate en suelo neutro. También se aprecia para los cuatro tratamientos, que a partir del día 133 del cultivo el crecimiento de las plantas llega a su límite máximo de crecimiento a excepción del tratamiento T4-N que mostró un ligero incremento hasta el día 175, día en que se dio por terminado el cultivo de jitomate para todos los tratamientos, ya que la mayoría de los frutos de todas las plantas se encontraban maduros.

En la figura 4.4 se muestran fotos del crecimiento del cultivo de jitomate en suelo neutro para la maceta 19, la cual corresponde al tratamiento con agua destilada.

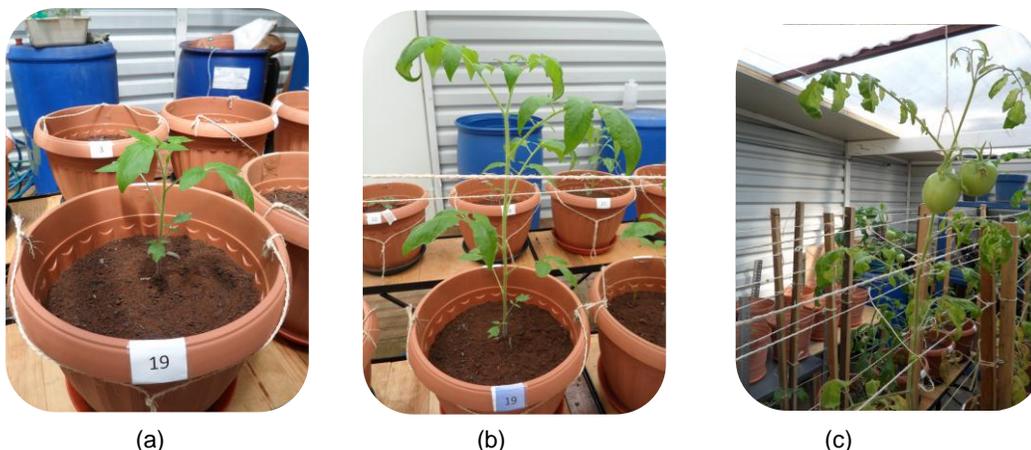


Figura 4.4 Crecimiento de la planta de jitomate en suelo neutro de la maceta 19 con tratamiento de agua destilada, (a) día 34, (b) día 57, (c) día 137

Con objeto de tener un marco de comparación cualitativo del crecimiento de las plantas, además de la talla se consideró como producción de biomasa el número de hojas por plantas de cada tratamiento, los cuales se representan en la figura 4.5.

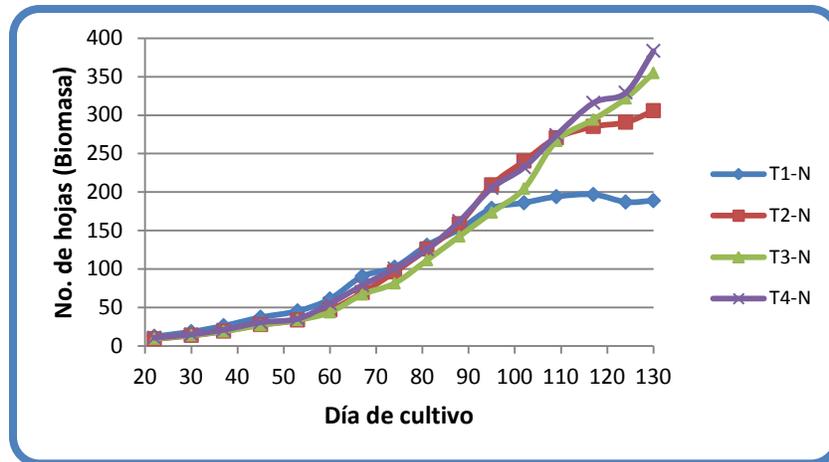


Figura 4.5 Producción de hojas del cultivo de jitomate en suelo neutro

La producción de hojas del cultivo de jitomate en el suelo neutro en los primeros 88 días, para los cuatro tratamientos es similar y a partir del día 95 comienzan a presentarse diferencias por tratamiento, en donde la mayor producción de biomasa al día 130 lo tuvo el tratamiento T4-N, seguido del T3-N, ambos con un intervalo de 350 – 400 hojas, mientras que la producción de hojas para el tratamiento T2-N es menor al T4-N y muy por debajo de los tres tratamientos está el tratamiento T1-N.

El cultivo fue afectado por la plaga de la mosca blanca (*Bemesia Tabaci*) y el hongo llamado “*negrilla*” o “*mangla*” (ver figura 4.6).

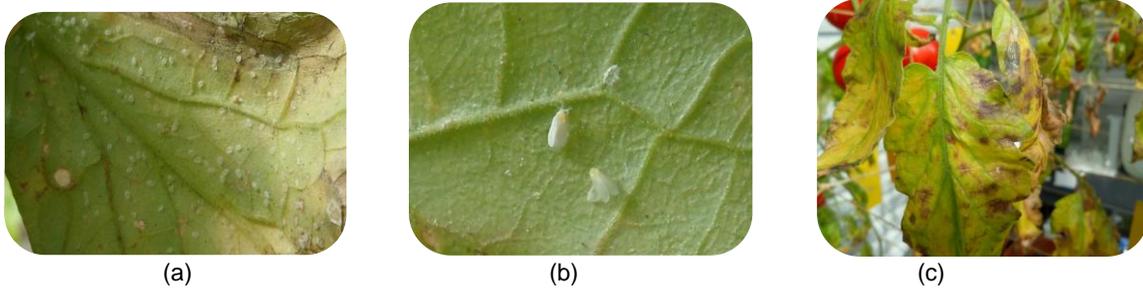


Figura 4.6 (a) Huevecillos de mosca blanca en el envés de una hoja, (b) Mosca blanca y (c) Hongo “negrilla”

La plaga de la mosca blanca provocó, en la etapa final del cultivo, desprendimiento de hojas, ya que la mosca proliferó demasiado rápido, debido a que ésta coloca sus huevecillos en el envés de las hojas provocando amarillamiento de las mismas, decoloración y en consecuencia la hoja se seca y, por último, se desprende de la planta. Se utilizaron varios métodos para tratar de combatir la plaga, se optó por colocar por todo el invernadero placas de fomi color amarillo barnizadas con aceite de linaza con la

finalidad de que la mosca fuera atraída por el color y quedaran pegadas en las placas, este procedimiento fue el que mejor funcionó ya que disminuyó la población de la mosca, pero no fue abatida (Infojardin).

Conforme los días de cultivo progresaron se comenzaron a observar diferencias entre tratamientos. Algunas diferencias fueron que el tratamiento T1-N presentó un color de hoja verde claro, las hojas inferiores comenzaron a mostrar un color amarillo y algunas ramas terminaron desprendiéndose del tallo, el tamaño de hoja fue mucho menor al de los demás tratamientos al igual que el diámetro del tallo. Los tratamientos T2-N, T3-N y T4-N mostraron las mismas características, como fueron color de hojas (verde oscuro), mismo tamaño de hoja, las plantas se observaron frondosas, el tallo fue del mismo grosor y en general una buena apariencia; todas estas características se observaron antes de que el cultivo fuera invadido por la plaga y presentara los daños ya citados.

Como ya se comentó, el cultivo floreó y dio frutos (ver figura 4.7). Con respecto a la floración, las primera plantas que lo hicieron fueron la 18 (T1-N), 32 y 31 (T4-N) el día 86 y días después las demás a excepción de la maceta 25 (T3-N) que no floreó y por consecuencia no produjo fruto. A lo largo de la floración se realizó la polinización manual utilizando varias técnicas, como fueron por vibración utilizando un cepillo eléctrico, ventilación con ventilador y utilizando un pincel fino; de las tres técnicas usadas la más efectiva fue la realizada con el pincel, debido a que se observó que todas las flores que fueron polinizadas con esta técnica todas dieron fruto, mientras que las demás técnicas no tuvieron la misma respuesta.

Y en cuanto al fruto, éstos comenzaron a observarse a partir del día 103. En la figura 4.7 se muestra la flor y fruto de la planta de jitomate.



Figura 4.7 (a) Floración, (b) Frutos

En cuanto a la producción de frutos del cultivo de jitomate en suelo neutro se muestra la tabla 4.9, en la que se indica el promedio de frutos obtenidos por tratamiento, así como la producción de los mismos (g).

Tabla 4.9 Datos de la producción de frutos en suelo neutro

Medición	Tratamiento			
	T1-N	T2-N	T3-N	T4-N
No. de frutos	2.0 ± 0.0	4.3 ± 0.96	7.7 ± 0.58	5.3 ± 0.96
Producción, g	115.7 ± 5.4	277.9 ± 62	387.5 ± 78	273.2 ± 14

En la figura 4.9 se graficaron los valores obtenidos de la producción de jitomate (g), para el tratamiento T3-N la maceta número 25 no fue considerada para los cálculos.

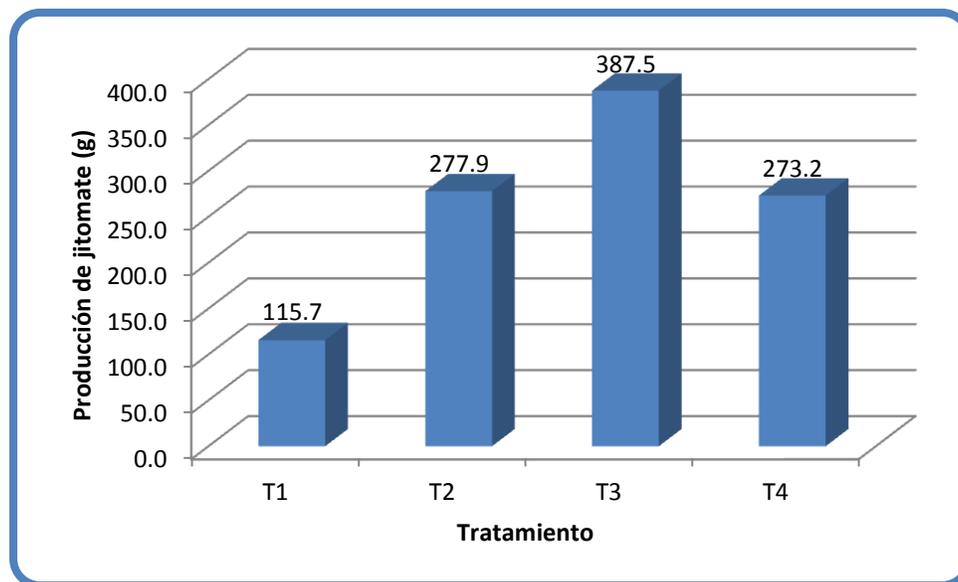


Figura 4.9 Producción promedio de jitomate (g) por tratamiento

De la figura 4.9 se aprecia que al aumentar la concentración de nutrimentos la producción aumenta, lo cual, queda confirmado con el tratamiento T3-N. De los resultados en cuanto a rendimiento, se obtiene que, el tratamiento T3-N (dosis doble de orina) produjo 1.4 veces más que los tratamientos T2-N y T4-N y 3.3 veces más que el tratamiento T1-N que es el tratamiento sin fertilización. Por otro lado, los tratamientos T2-N y T4-N tuvieron prácticamente el mismo rendimiento, siendo que el T2-N corresponde al tratamiento con la dosis uno de orina y el T4-N a la dosificación con fertilizante mineral, con una producción de 2.4 veces más que el tratamiento T1-N.

Con estos resultados se hace evidente que el fertilizar con orina se obtienen rendimientos muy semejantes que con fertilizante mineral, y que la orina humana puede ser usada como fertilizante y representa una alternativa viable, siempre y cuando se tomen las precauciones necesarias para la aplicación. Además, la orina tiene una ventaja sobre los fertilizantes minerales porque al estar en fase líquida se facilita la aplicación, es un residuo con características fertilizantes y se encuentra disponible en todas las sociedades a mínimo costo.

4.2.4 Crecimiento del cultivo de jitomate en suelo moderadamente ácido

El cultivo en suelo ácido respondió de diferente manera al de suelo neutro, la diferencia estriba en que en este caso el crecimiento de la planta fue demasiado lento y poco; el comportamiento se observa en la figura 4.10, en la que se representa el desarrollo de la planta de jitomate en los cuatro tratamientos y los correspondientes a orina (T2-A y T3-A) que son los de mayor crecimiento y no rebasaron los 50 cm, mientras que en suelo neutro y con el mismo tiempo de cultivo, tuvieron un crecimiento promedio de 111.3 y 125.8 cm, respectivamente.

A pesar de que el cultivo de jitomate en suelo ácido no se desarrolló satisfactoriamente, existen diferencias entre tratamientos, que responden a la cantidad de nutrimentos que se les adicionó. De la figura 4.10 se aprecia que al día 175 del cultivo los tratamientos que tiene un mayor crecimiento son T2-A y T3-A, seguido del tratamiento con fertilizante (T4-A) y muy por debajo de éstos el tratamiento con agua (T1-A).

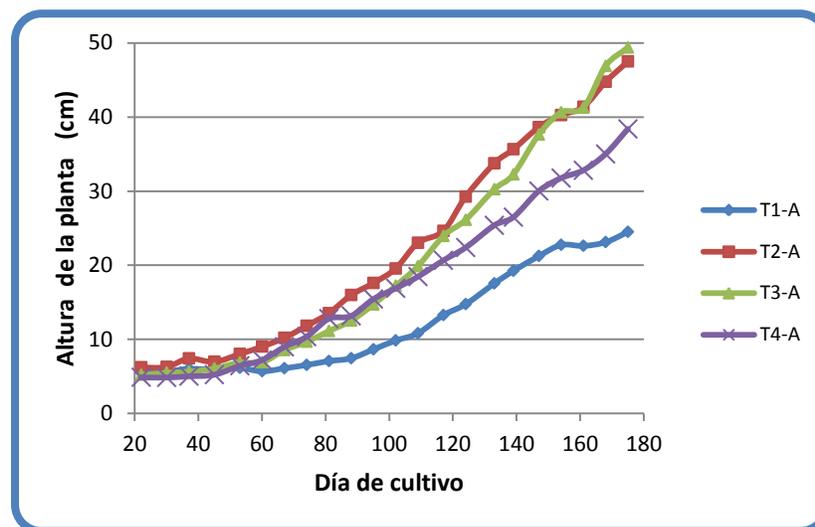


Figura 4.10 Crecimiento del cultivo de jitomate en suelo ácido

En la figura 4.11 se muestran fotografías del crecimiento de la planta de jitomate en suelo ácido para la maceta 7 (T2-A), la cual estuvo bajo tratamiento con dosis uno de orina.

La secuencia de fotos de la figura 4.11 muestra que el crecimiento del jitomate en suelo moderadamente ácido fue mínimo comparado con el cultivo en suelo neutro, la diferencia es considerable, desde el hecho que en suelo ácido no hubo floración y que también fue afectada por la plaga de la mosca blanca en menor proporción.

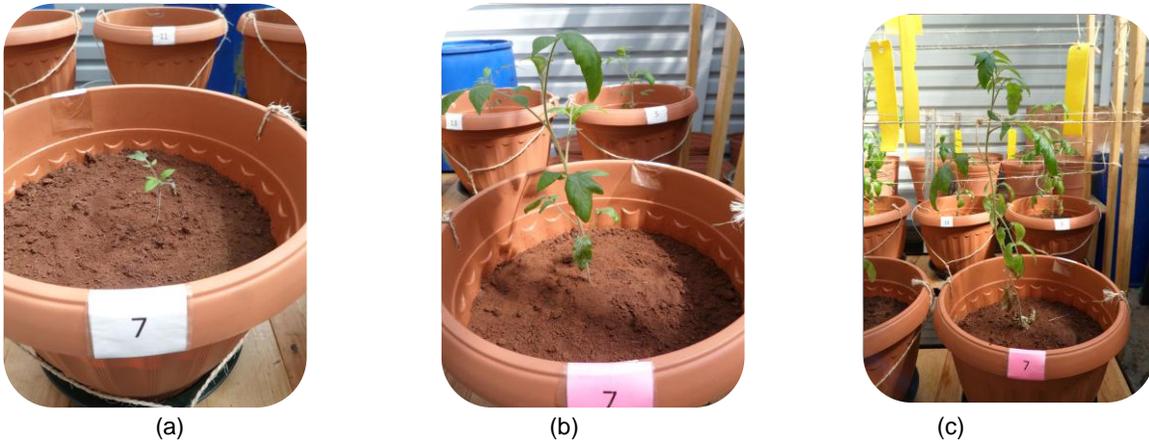


Figura 4.11 Crecimiento de la planta de jitomate en suelo ácido de la maceta 7 con tratamiento de orina (T-2), (a) día 43, (b) día 105, (c) día 155

Y en la figura 4.10 se muestran los datos obtenidos de manera gráfica del número de hojas.

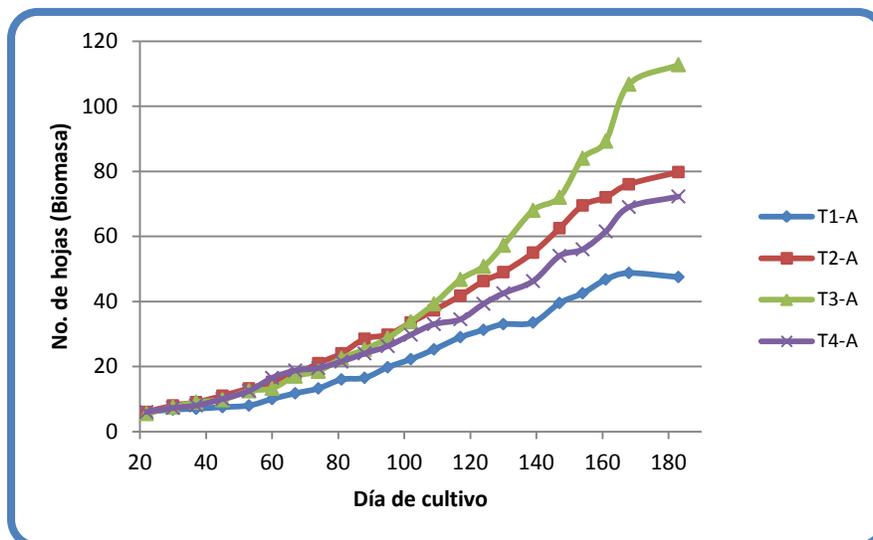


Figura 4.12 Producción de hojas del cultivo de jitomate en suelo ácido

4.2.5 Comparación del cultivo de jitomate en suelo ácido y neutro

Como ya se comentó, el desarrollo del cultivo en ambos suelos no fue comparable, tuvieron respuestas diferentes a los mismos tratamientos. En la figura 4.13 se esquematiza el crecimiento del jitomate para ambos suelos, y es evidente la diferencia del desarrollo.

Con base en la revisión bibliográfica realizada, el desarrollo que tuvo la planta de jitomate en suelo ácido se atribuye a la textura arcillosa del suelo que dificultó que las raíces penetraran en la matriz del mismo y en consecuencia tuviera un mal drenado (lo cual se observó al momento de los riegos), además de un contenido bajo de materia orgánica (MO) y una disminución de pH, la cual se explica en el inciso 4.3.1.

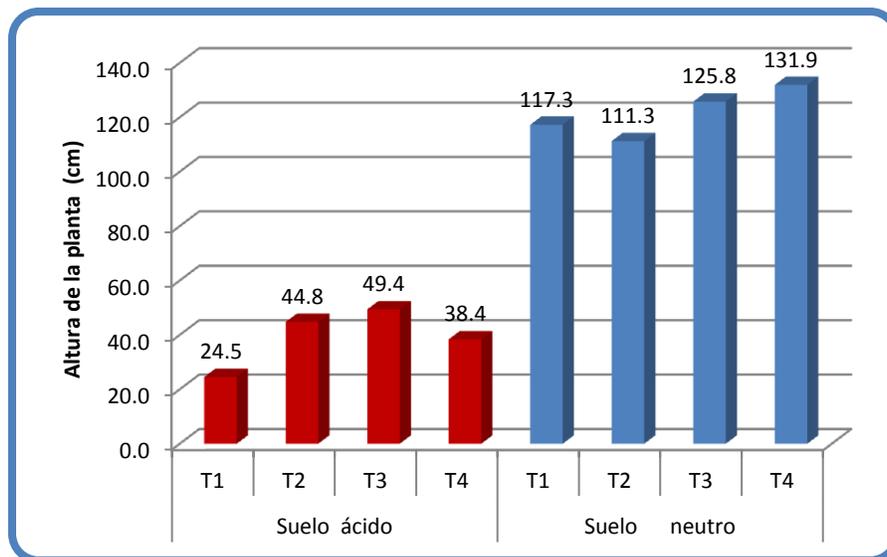


Figura 4.13 Comparación de crecimiento de planta en ambos suelos al término del tratamiento

En la literatura se reporta que los problemas de crecimiento de cultivos en relación con la penetración deficiente de las raíces en los subsuelos ácidos, con frecuencia se asocian con las altas concentraciones de aluminio o manganeso solubles. Estos iones son tóxicos para la mayoría de los cultivos. El aluminio restringe o limita el crecimiento de las raíces cuando hay concentraciones en solución tan bajas como 1 mg/L (Bohn et al., 1993), por lo que es posible que ese elemento en el suelo ácido sea un factor más que haya interferido en el desarrollo del cultivo de jitomate. En la figura 4.14 se muestran fotografías del crecimiento de las raíces tanto en suelo ácido como en neutro, ambas al término del tratamiento T2.



Figura 4.14 Crecimiento de raíz de tomate con tratamiento T2 (a) suelo neutro, (b) suelo ácido

En la tabla 4.10 se muestran los pesos secos tanto de la raíz como de planta (tallo y hojas), para ambos suelos. Los datos de esta tabla muestran amplia diferencia que se tuvo en el cultivo de jitomate, sobre todo para la raíz

4.10 Tabla de pesos secos de planta y raíz, base seca

	Tratamiento	Planta	Raíz
		Peso seco, g	Peso seco, g
S A	T1-A	0.38 ± 0.03	0.04 ± 0.01
	T2-A	1.65 ± 0.33	0.20 ± 0.04
	T3-A	2.67 ± 1.55	0.29 ± 0.16
	T4-A	0.99 ± 0.32	0.15 ± 0.04
S N	T1-N	8.2 ± 0.79	0.78 ± 0.10
	T2-N	19.9 ± 2.2	2.16 ± 0.35
	T3-N	39.4 ± 8.8	4.69 ± 3.70
	T4-N	27.3 ± 3.2	2.47 ± 0.12

4.2.6 Condiciones ambientales del cultivo

Los parámetros ambientales que se midieron durante la experimentación, con objeto de conocer las condiciones dentro y fuera del invernadero a que estuvieron expuestas las plantas, fueron la temperatura, humedad relativa e intensidad luminosa. En la tabla 4.11 se muestran los valores máximos, mínimos y promedios de cada uno de éstos.

Los parámetros citados trataron de controlarse dentro del invernadero, ya que el cultivo de jitomate requiere de condiciones ambientales específicas citadas en el inciso 2.6.2. Los problemas que se presentaron se fueron corrigiendo desde el inicio de la experimentación, mismos que surgieron debido a variación del clima.

Con respecto a la temperatura (T), que fue uno de los parámetros más complicados de “controlar”, se registraron temperaturas de 36 °C debido a la deficiente ventilación y estructura propia del invernadero; por tanto, fue necesario colocar malla sombra y extractores con la finalidad de disminuir la temperatura. Con la malla la intensidad

luminosa en promedio fue del 16 % comparada con la exterior y la temperatura máxima registrada fue de 32°C.

A partir del día 30 de septiembre las noches fueron frías (9 °C), por lo cual fue necesario utilizar calentadores eléctricos para mantener la temperatura mínima entre 17 y 19 °C.

La humedad relativa (HR) también se trató de controlar, como ya se mencionó, colocando jergas saturadas de agua en el piso la mayor parte del tiempo, particularmente al medio día. La humedad relativa promedio registrada en el invernadero corresponde a 60.9 %.

Tabla 4.11 Parámetros ambientales

	Invernadero ^a			Exterior		
	T (°C)	HR (%)	IL (lx)	T ^b (°C)	HR (%)	IL (lx)
Promedio	28.5 ± 2.4	60.9 ± 9.1	12908 ± 9496	21.1 ± 1.5	37.4 ± 12.2	73875 ± 22395
Máximo	32	83.3	83100	30.7	70.9	110900
Mínimo	9	32.1	631	8.0	15.5	4830

^a Datos con malla sombra, ^b datos obtenidos del Centro de Investigación de Energía, UNAM

Al analizar los parámetros ambientales dentro del invernadero y en el exterior se encuentra lo siguiente: la intensidad luminosa dentro del invernadero es 17% de la máxima promedio del exterior de 73,875 lux. La intensidad luminosa aparentemente no causó problemas de crecimiento de las plantas, ya que, en suelo neutro, las plantas completaron su ciclo. Con respecto a la humedad relativa, ésta se mantuvo en 61% como valor promedio, la cual es una humedad óptima para el cultivo del jitomate; en cambio, la temperatura promedio fue de 28.5 °C, que se encuentra próximo al máximo del intervalo de temperatura (20 – 30 °C) para el crecimiento del cultivo. En resumen, la temperatura, la intensidad luminosa y la humedad relativa se mantuvieron dentro de los requerimientos climáticos para el crecimiento del cultivo del jitomate.

4.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE SUELO DESPUÉS DEL CULTIVO

En esta sección se presentan los resultados correspondientes al análisis de ambos suelos después del cultivo, los que representan los promedios de las cuatro réplicas con su respectiva desviación estándar.

4.3.1 pH

El pH juega un papel muy importante en el crecimiento de una planta debido a que modifica el grado de solubilidad de los minerales, pero en general un pH entre 6 y 7 es el ideal para una fácil asimilación de los nutrimentos. En la figura 4.15 se graficaron estos valores, donde T0 corresponde al suelo sin tratamiento.

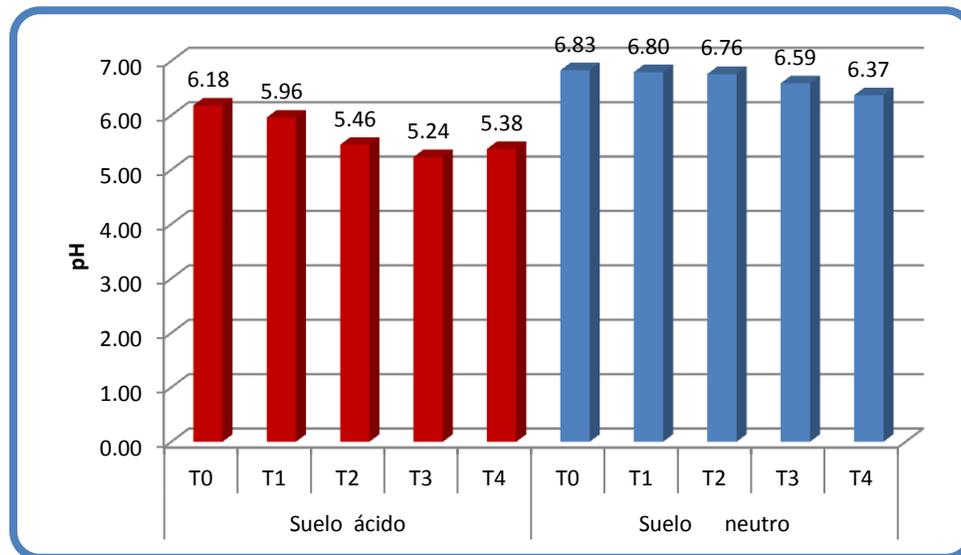


Figura 4.15 pH antes y después del cultivo de jitomate

De ambos suelos se aprecia que el pH disminuye en comparación al pH inicial, pero tal decremento es mayor en suelo ácido. A pesar de que los valores de pH en suelo neutro disminuyeron estos siguen manteniendo la clasificación de pH neutro a excepción del tratamiento T4-N que cae en la clasificación de pH moderadamente ácido, pero aún con esta disminución todas las plantas terminaron su ciclo de crecimiento. En cambio para el suelo ácido se observa la disminución en el pH de los tratamientos T2-A, T3-A y T4-A que está cercana a la unidad, pero a pesar de esto, los suelos de todos los tratamientos siguen clasificados como ligeramente ácidos, aunque los tres últimos están cercanos al límite inferior de clasificación.

Antes de la experimentación se planteó la posibilidad de que la orina podía aumentar el pH del suelo debido a que es alcalina, sobre todo del moderadamente ácido, y que presentaría enmienda edáfica al modificar favorablemente el pH, pero es evidente que sucedió lo contrario, lo cual se atribuye al proceso de nitrificación del amonio por la acción de los microorganismos del suelo, debido a la producción de iones hidronio, lo que

incrementa la acidez del suelo (Kass, 2007). Esta disminución de pH se propone como otra razón, por lo cual no prosperó el cultivo de jitomate en suelo ácido.

4.3.2 Conductividad

Con respecto a la conductividad (ver figura 4.16) en suelo ácido, con el tratamiento T1-A la conductividad aumenta en un 16%, el T2-A y T4-A aumenta en un 300% y 317%, respectivamente, y el T3-A en un 500% toda esta comparación se realizó tomando como base al suelo ácido sin tratamiento. Los resultados indican que la conductividad después de la aplicación de orina y fertilizante mostraron un incremento que no se observa en el cultivo con suelo neutro; tal diferencia se debe a que en suelo ácido el crecimiento de la planta fue mínimo por lo que las sales se acumularon y la planta absorbió sólo pequeñas cantidades. Los resultados son congruentes, ya que el T1-A casi se mantiene en la misma conductividad, el T2-A y T4-A tienen casi el mismo valor y el T3-A tuvo una conductividad menor del doble que T2-A, lo que es congruente porque este tratamiento tiene el doble de la dosis T2-A. Los resultados de conductividad coinciden con los aportados por los cationes lixiviables (tabla 4.13), donde la mayor concentración de éstos se presentan en el suelo ácido, debido a que los iones se acumularon en éste y sólo una porción pasó a la planta.

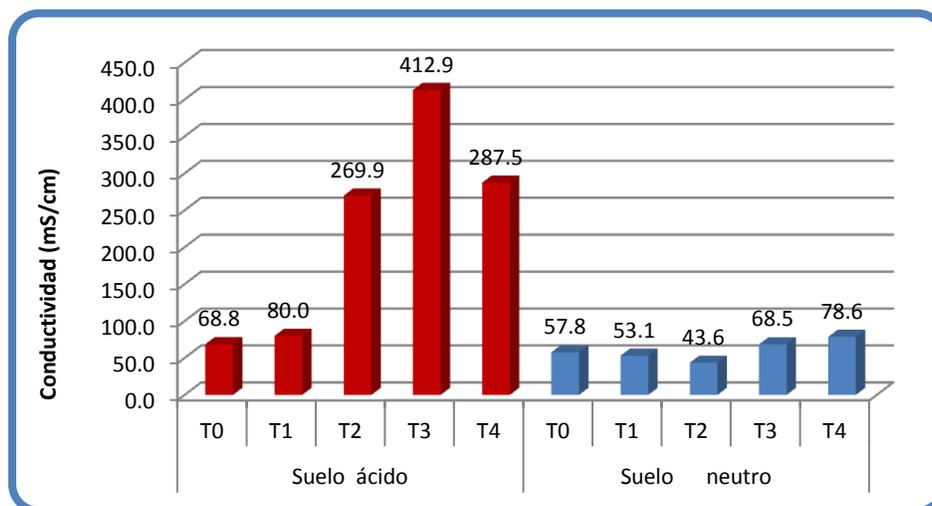


Figura 4.16 Conductividad antes y después del cultivo de jitomate

Para el suelo neutro es diferente el comportamiento de la conductividad, la cual es un reflejo de las sales contenidas en la orina y fertilizante mineral, ya que la acumulación fue menor en el suelo neutro y por los análisis realizados se observa que éstas se absorbieron y pasaron a fruto y planta (ver tabla 4.16 y 4.17).

4.3.3 Capacidad de intercambio catiónico

El proceso de intercambio catiónico es de suma importancia, debido a que pone a disposición de la planta los elementos nutrientes mediante su paso a la disolución del suelo. En la figura 4.17 se resumen los resultados obtenidos de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), antes y después del cultivo, para suelo ácido y neutro.

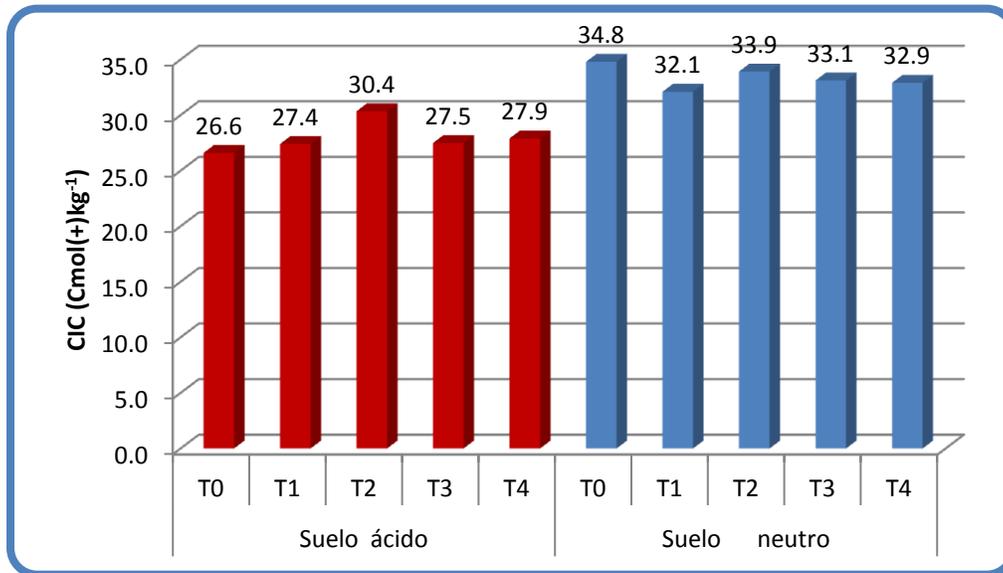


Figura 4.17 CIC antes y después del cultivo de jitomate

En términos generales se observa que el suelo neutro tiene mayor CIC y que las características no cambian significativamente con los tratamientos en ambos suelos, simplemente existen variaciones atribuibles a la experimentación por la heterogeneidad del suelo y procedimiento de evaluación; aunque a pesar de eso los resultados se consideran satisfactorios y representativos. El hecho de que la CIC del suelo neutro sea mayor a la del suelo ácido puede atribuirse a que el contenido de la materia orgánica es ligeramente superior en suelo neutro.

De acuerdo con la dosificación de iones en la orina y fertilizante, antes de que la planta absorba los iones intercambiables del suelo, dispone de los que quedan solubles durante el tratamiento, planteamiento que se confirma con los resultados de los cationes lixiviables en suelo ácido (tabla 4.13), ya que se observa que éstos se acumularon en el suelo, debido a que el crecimiento de la planta fue poco y no tuvo producción de fruto.

4.3.4 Bases intercambiables

Las bases intercambiables (BI) se muestran en la tabla 4.12 y son el resultado de sustituirlas por el ión índice (acetato de amonio, 1 N).

Tabla 4.12 Bases intercambiables antes y después del cultivo en suelo ácido y neutro

	Tratamiento	Ca ²⁺ Cmolkg ⁻¹	K ⁺ Cmolkg ⁻¹	Mg ²⁺ Cmolkg ⁻¹	Na ⁺ Cmolkg ⁻¹
S A	T0	116.9 ± 38.3	8.57 ± 0.52	114.6 ± 26.9	2.87 ± 0.86
	T1	106.4 ± 5.0	5.76 ± 0.06	96.1 ± 2.4	2.34 ± 0.35
	T2	109.7 ± 6.5	5.95 ± 0.07	95.4 ± 4.6	2.88 ± 0.47
	T3	106.8 ± 5.4	5.95 ± 0.23	91.6 ± 6.6	4.92 ± 0.24
	T4	108.4 ± 1.8	5.93 ± 0.05	92.8 ± 1.7	2.81 ± 0.27
S N	T0	144.8 ± 10.5	9.13 ± 0.48	131.6 ± 27.7	3.91 ± 0.09
	T1	150.9 ± 2.0	6.15 ± 0.07	125.3 ± 1.7	3.22 ± 0.15
	T2	147.0 ± 8.8	4.53 ± 0.30	124.3 ± 2.6	4.53 ± 0.25
	T3	143.7 ± 14.7	4.44 ± 0.57	116.6 ± 2.8	5.73 ± 0.19
	T4	148.0 ± 31.2	3.85 ± 0.26	117.4 ± 2.5	3.97 ± 0.33

De los resultados de la tabla 4.12 se observa que para ambos suelos la concentración de iones intercambiables de Ca²⁺ y Mg²⁺ es mayor a la de Na⁺ y K⁺, lo cual se debe a que la distribución de los cationes intercambiables principales en suelos agrícolas productivos es Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ ≈ NH₄⁺ ≈ Na⁺, porque el factor más importante que determina la magnitud relativa de adsorción o desorción de un ión dado es su valencia; estos resultados experimentales lo que muestran es que los iones divalentes (Ca²⁺ y Mg²⁺) son retenidos más fuertemente que los monovalentes (Na⁺ y K⁺). En cuanto a los cationes Ca²⁺ y Mg²⁺ son semejantes en orden de magnitud, mientras que Na⁺ es el catión que tiene la menor concentración y concuerda con lo que se reporta en la literatura, ya que éste es uno de los cationes intercambiables presente en las más pequeñas cantidades en la mayoría de los suelos del mundo (Bohn et al., 1993), aunque en los resultados se observa un incremento para los tratamientos T2 Y T3 de ambos suelos, que se atribuye al contenido de sodio que la orina aportó.

En general, el suelo neutro tiene una mayor concentración de bases intercambiables que el suelo ácido, esta diferencia de concentraciones de cationes en ambos suelos se atribuye al efecto de la materia orgánica que caracteriza al suelo (ver tabla 4.3) y posiblemente iones como Al³⁺, a pH ácido, sea más fuertemente adsorbido y en consecuencia las bases intercambiables (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺) tengan una menor participación en el proceso de intercambio (Rodríguez et al., 2002).

4.3.5 Contenido de Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+ en el lixiviado del suelo

En este inciso se muestran, para ambos suelos, las concentraciones de los iones calcio, potasio, magnesio y sodio del lavado del suelo (lixiviado) después del cultivo (ver tabla 4.13).

La tabla 4.13 muestra que los cationes Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+ están en mayor concentración en suelo ácido y que es el resultado de que la planta no desarrolló como lo hizo en suelo neutro, por lo que los cationes se acumularon en él y sólo una pequeña porción pasó a la planta. En cambio, en suelo neutro los cationes están presentes en suelo, fruto y planta como muestran los resultados correspondientes, por lo que la concentración de éstos es menor en el lixiviado después del cultivo.

Tabla 4.13 Iones lixiviables del suelo antes y después del cultivo

	Tratamiento	Ca^{2+} Cmolkg^{-1}	K^+ Cmolkg^{-1}	Mg^{2+} Cmolkg^{-1}	Na^+ Cmolkg^{-1}
S A	T0-A	0.022 ± 0.000	0.033 ± 0.000	0.015 ± 0.001	0.016 ± 0.001
	T1-A	0.034 ± 0.011	0.033 ± 0.002	0.091 ± 0.006	0.056 ± 0.025
	T2-A	0.098 ± 0.005	0.065 ± 0.000	0.091 ± 0.006	0.098 ± 0.005
	T3-A	0.149 ± 0.009	0.088 ± 0.004	0.161 ± 0.013	0.220 ± 0.003
	T4-A	0.119 ± 0.005	0.070 ± 0.002	0.120 ± 0.010	0.057 ± 0.005
S N	T0-N	0.034 ± 0.000	0.033 ± 0.000	0.021 ± 0.001	0.043 ± 0.002
	T1-N	0.042 ± 0.005	0.020 ± 0.002	0.023 ± 0.003	0.047 ± 0.009
	T2-N	0.038 ± 0.006	0.012 ± 0.002	0.017 ± 0.002	0.065 ± 0.014
	T3-N	0.040 ± 0.003	0.014 ± 0.004	0.015 ± 0.002	0.088 ± 0.028
	T4-N	0.043 ± 0.002	0.012 ± 0.002	0.024 ± 0.001	0.053 ± 0.002

En lo que respecta al sodio lixiviable del tratamiento T4, para ambos suelos se observa que es baja la concentración que el fertilizante aporta al suelo en comparación al que aporta la orina, esto puede considerarse como una ventaja para el fertilizante mineral sobre la orina, debido a que este catión se acumula, es soluble y en consecuencia lixivía pudiendo llegar a mantos acuíferos.

4.3.6 Aniones en el lixiviado del suelo

También fueron determinados algunos iones lixiviables del suelo después del cultivo de jitomate. En la tabla 4.14 se resumen los resultados de NO_3^- , NO_2^- y PO_4^{3-} del lixiviado para ambos suelos.

Todos los suelos contienen nitrógeno en forma de compuestos relativamente simples, como aminoácidos, sales amónicas y nitratos, y especialmente estas dos últimas es de

donde las plantas obtienen su nitrógeno, de ahí la importancia de analizar el ión nitrato (NO_3^-). Para el suelo ácido los resultados de NO_3^- muestran la formación de éste, los tratamientos T2-A y T4-A corresponden por las condiciones del tratamiento y la mayor concentración la tiene el tratamiento T3-A, que se debe a que en este tratamiento la cantidad de nitrógeno adicionada fue mayor, además de que el cultivo no tuvo un desarrollo completo. En cambio, para suelo neutro las concentraciones de NO_3^- son diferentes, ya que se observa una disminución en la concentración de éste conforme la adición de nitrógeno aumentó, que se debe al crecimiento de la planta y producción de frutos. Con estos resultados puede presentarse la posibilidad de que este ión lixivie a mantos acuíferos si no se regula la adición del mismo.

Tabla 4.14 Aniones lixiviabiles antes y después del cultivo

	Tratamiento	NO_3^- mgkg^{-1}	NO_2^- mgkg^{-1}	PO_4^{3-} mgkg^{-1}
S A	T0-A	< 5.00	0.10 ± 0.00	< 0.25
	T1-A	15.06 ± 2.2	0.22 ± 0.02	< 0.25
	T2-A	62.58 ± 2.5	0.16 ± 0.01	< 0.25
	T3-A	97.60 ± 6.9	0.11 ± 0.03	< 0.25
	T4-A	73.50 ± 4.9	0.10 ± 0.00	< 0.25
S N	T0-N	< 5.00	0.30 ± 0.00	< 0.25
	T1-N	12.46 ± 0.9	4.22 ± 0.10	< 0.25
	T2-N	11.33 ± 3.1	3.45 ± 0.15	< 0.25
	T3-N	8.42 ± 1.8	3.94 ± 0.44	< 0.25
	T4-N	9.06 ± 1.5	2.25 ± 0.32	< 0.25

LD de NO_2^- 0.1 mg kg^{-1}

Para el caso de los nitritos (NO_2^-), en suelo ácido los valores se mantienen casi en el mismo orden y no es una concentración alta, sin embargo, para el caso del suelo neutro las concentraciones de este ión son mayores a las del suelo ácido, lo cual se atribuye a que el lixiviado del suelo neutro presentó partículas suspendidas lo que provocó interferencias positivas a la medición. En el caso del ión fosfato lixiviable, la concentración en ambos suelos fue menor a $< 0.25 \text{ mg kg}^{-1}$ de suelo, posiblemente a su poca solubilidad con los cationes presentes en el suelo.

4.4 CONTENIDO DE N, K^+ , Na^+ , Ca^{2+} Y Mg^{2+} EN JITOMATE

Se determinó el contenido de nitrógeno (N) en el jitomate en base seca y los resultados de dicha evaluación se muestran en la tabla 4.15.

El jitomate fija nitrógeno, el cual aumenta al incrementar la dosis de orina, pero los resultados obtenidos muestran que hay una capacidad de acumulación, lo que se observa al comparar el contenido de nitrógeno entre los tratamientos.

Tabla 4.15 Contenido de nitrógeno en jitomate, base seca

Tratamiento	% N
T1-N	1.66 ± 0.17
T2-N	2.39 ± 0.20
T3-N	2.57 ± 0.19
T4-N	2.12 ± 0.44

También se evaluó la concentración de los iones Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+ en el jitomate cultivado en suelo neutro, los resultados se encuentran en la tabla 4.16; evaluación que se realizó con la finalidad de conocer si el contenido de los iones varía por tratamiento en el fruto.

Tabla 4.16 Contenido de Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+ en jitomate, base seca

Tratamiento	Ca^{2+} Cmolkg^{-1}	K^+ Cmolkg^{-1}	Mg^{2+} Cmolkg^{-1}	Na^+ Cmolkg^{-1}
T1-N	1.42 ± 0.14	92.0 ± 0.05	7.97 ± 0.61	1.79 ± 0.20
T2-N	1.67 ± 0.25	92.2 ± 4.2	7.28 ± 0.99	1.92 ± 0.44
T3-N	1.73 ± 0.91	89.8 ± 7.9	7.11 ± 0.61	2.20 ± 0.33
T4-N	1.49 ± 0.75	87.8 ± 11.9	7.11 ± 0.96	1.33 ± 0.22

Los iones Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+ se encuentran presentes en el jitomate, iones que son aportados por el suelo y la orina, pero el que está en mayor concentración en el fruto es el K^+ , lo que corresponde a lo citado en la literatura (ver tabla 2.13); además de que se observa que para este catión no hay efecto por tratamiento, es decir, que son similares las concentraciones para todos los tratamientos. Lo que muestra en general que la planta de jitomate regula la concentración de los iones analizados en el fruto, con excepción del sodio y calcio que incrementa al aumentar la dosis de orina.

4.5 CONTENIDO DE K^+ , Na^+ , Ca^{2+} Y Mg^{2+} EN PLANTA

En este inciso se presenta el análisis de los iones Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+ realizado a la planta (hojas y tallo) de jitomate después del cultivo (ver tabla 4.17).

De los resultados reportados en la tabla 4.17 se observa que el ión sodio está en baja concentración, aunque sí hay una tendencia a aumentar en los tratamientos T-1 al T-3 para ambos suelos por el aumento en la adición del ión. Para el resto de los iones, se

puede considerar que las concentraciones son del orden, y que difiere con la tendencia que presentó el jitomate, ya que para éste, el ión potasio fue el de mayor concentración, por lo que para la planta los requerimientos son diferentes.

Tabla 4.17 Contenido de Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+ en planta, base seca

	Tratamiento	Ca^{2+} Cmolkg^{-1}	K^+ Cmolkg^{-1}	Mg^{2+} Cmolkg^{-1}	Na^+ Cmolkg^{-1}
S A	T1-A	63.4 ± 15.1	12.5 ± 3.1	106.2 ± 25.3	3.0 ± 0.3
	T2-A	72.1 ± 6.4	58.8 ± 6.2	91.5 ± 10.7	4.7 ± 0.4
	T3-A	61.9 ± 11.8	58.0 ± 33.0	79.8 ± 20.3	8.4 ± 4.8
	T4-A	73.1 ± 3.9	62.9 ± 10.1	96.2 ± 9.2	1.9 ± 0.2
S N	T1-N	61.6 ± 3.9	76.4 ± 5.3	45.9 ± 2.9	3.7 ± 0.4
	T2-N	76.4 ± 8.0	65.0 ± 5.9	54.5 ± 2.7	4.2 ± 0.4
	T3-N	70.0 ± 4.2	61.0 ± 9.9	53.5 ± 8.0	5.3 ± 0.9
	T4-N	62.7 ± 11.4	69.8 ± 10.0	47.4 ± 5.7	3.0 ± 0.3

4.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

4.6.1 Análisis de varianza

Se hizo el análisis estadístico de los resultados obtenidos del cultivo de jitomate en suelo neutro, considerando como variable de respuesta a la producción de jitomate (g), debido a que aporta la mayor información de esta experimentación. Para este cálculo se utilizó el programa SPSS, versión 15.0, que es un paquete de computadora “software” con la capacidad de analizar datos de experimentos diseñados, el cual se fundamenta en el análisis de varianza de la tabla 3.6 para diseño con un solo factor.

En la tabla 4.18 se resume el análisis de varianza (ANOVA) para la producción del cultivo de jitomate en suelo neutro para los cuatro tratamientos, del cual se observa que el cuadrado medio entre los tratamientos es varias veces mayor que el cuadrado medio de los tratamientos. Esto indica que no es posible que las medias de los tratamientos sean iguales. El valor del coeficiente $F_0 = 44553 / 2209 = 20.2$, y al comparar este valor con un punto porcentual de la cola superior de la distribución $F_{0.05, 3, 11} = 3.59$. Puesto que $F_0 = 20.166 > 3.59$, se rechaza $H_0 (\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4)$ y se concluye que las medias de los tratamientos difieren; es decir, que los diferentes tratamientos afectan de manera significativa a la producción del cultivo (Montgomery, 2011).

Tabla 4.18 Análisis de varianza simple de la producción del jitomate

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀
Tratamientos	133692	3	44564	20.2
Error	24308	11	2210	
Total	158000	14		

4.6.2 Comparaciones múltiples (Tukey)

También se utilizó la técnica estadística de comparaciones múltiples (prueba de Tukey), con la finalidad de contrastar hipótesis sobre pares de tratamientos. Para este cálculo también se utilizó el programa SPSS, versión 15.0.

De los datos obtenidos en cuanto a producción y número de frutos de jitomate en el suelo neutro para ambos casos la respuesta óptima es “mayor es mejor”, y al aplicar la prueba de Tukey, el software proporcionó la tabla 4.19 para la producción de jitomate en suelo neutro.

Según los datos proporcionados por la tabla 4.19, al aplicar la prueba de Tukey la menor producción de jitomate lo tiene el tratamiento T1-N, sin embargo esta prueba afirma que los tratamientos T2-N y T4-N son estadísticamente iguales, es decir, que tienen el mismo efecto y que las medias de estos tratamientos son menores a T3-N y el mejor tratamiento es el T3-N, debido a que la respuesta esperada es “mayor es mejor”.

Tabla 4.19 Prueba de Tukey para la producción de jitomate

Trat	N	1	2	3
T1-N	4	115.7000		
T4-N	4		273.1500	
T2-N	4		277.8500	
T3-N	3			387.5000
Sig.		1.000	.999	1.000

4.6.3 Diseño factorial de dos factores

Se realizó el análisis estadístico para dos factores (tratamientos y suelo), con 4 y 2 niveles, respectivamente. Las variables de respuestas utilizadas para dicho análisis fue el crecimiento y la producción de jitomate, ver tabla 4.20 y 4.21. Donde el tratamiento A corresponde a las dosis aplicadas y el tratamiento B al tipo de suelo.

Tabla 4.20 Análisis de varianza del crecimiento de la planta de jitomate, en un arreglo factorial 4x2

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀
Tratamiento A	1319.6	3	439.9	1.5
Tratamiento B	53260.3	1	53260.3	177.6
Interacción AB	1223.7	3	407.9	1.4
Error	7197.8	24	299.9	
Total	63001.5	31		

Del análisis de varianza de la tabla 4.21 se observa que hay efecto significativo por tipo de suelo para un nivel de confianza del 95%, debido a que $F_0 > F_{0.05, 1, 24} = 4.26$, mientras que para las dosificaciones realizadas no hay efecto significativo, ya que, $F_0 < F_{0.05, 3, 24} = 3.01$ y este efecto es el mismo para las interacciones de los factores A y B.

Tabla 4.21 Análisis de varianza de la producción de jitomate, en un arreglo factorial 4x2

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀
Tratamiento A	41086.3	3	13695.4	2.4
Tratamiento B	458235.6	1	458235.6	80.3
Interacción AB	41086	3	13695.4	2.4
Error	136926	24	5705.2	
Total	677333.8	31		

La respuesta del análisis de varianza realizado para la producción de jitomate, tiene el mismo comportamiento que el del crecimiento de la planta de jitomate, ya que presenta una diferencia significativa para el tipo de suelo, mientras que para la dosificación y la interacción no la hay.



5

CONCLUSIONES

En este capítulo se describen las conclusiones del estudio tomando como base los objetivos propuestos y los resultados obtenidos de la experimentación del cultivo de jitomate en invernadero con dos tipos de suelo y las condiciones de dosificación de orina y fertilizante establecidas.

Debido a la textura arcillosa del suelo ácido y las propias características expansivas por el contenido de caolinita, el crecimiento fue deficiente en el cultivo de jitomate y no hubo producción; tal comportamiento limitó el drenado y el desarrollo de la raíz. A pesar de la expansión y contracción de ambos suelos, en el caso de suelo neutro los resultados muestran que la orina (diluida) es un residuo que puede ser utilizado como fertilizante, debido a que se obtuvieron rendimientos comparables, e incluso superiores al del fertilizante mineral cuando se incrementó la dosis de orina.

El pH de ambos suelos después del cultivo disminuye conforme se incrementa la dosis de orina y se dosifica el fertilizante como consecuencia del proceso de nitrificación que ocurre durante el cultivo, particularmente se acentúa en el suelo ácido por el deficiente crecimiento de las plantas y la acumulación en los intersticios del suelo de los iones que

caracterizan la orina y el fertilizante. Por tanto, bajo las condiciones experimentales realizadas, no fue posible lograr enmienda edáfica del suelo por efecto del pH.

En términos generales, la CIC de ambos suelos son del orden antes y después de los tratamientos, de 34.8 y 26.6 Cmol/kg para el suelo neutro y ácido, respectivamente. La diferencia puede atribuirse al menor contenido de materia orgánica del suelo ácido. La concentración de bases intercambiables evaluadas en ambos suelos corresponden a la descrita en la bibliografía citada ($[Ca^{2+}] > [Mg^{2+}] > [K^+] \approx [NH_4^+] \approx [Na^+]$), ya que la valencia del ión dado determina la magnitud relativa de adsorción.

En general, la conductividad del suelo ácido y neutro sin tratamiento es baja, de 69 y 58 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Sin embargo, con la variación del tratamiento existe un incremento que es menor en suelo neutro como consecuencia del crecimiento y producción de fruto en éste. Por tanto, los iones que no son absorbidos por el limitado crecimiento y nula producción de las plantas quedan disponibles en las cavidades del suelo ácido.

Los iones lixiviables del suelo se distribuyeron en diferentes porcentajes con respecto a la concentración en Cmolkg^{-1} , ya que en suelo ácido se encontraron en una proporción de 29% de Mg^{2+} , 29% Na^+ , 26% de Ca^{2+} y 16% de K^+ , y en suelo neutro la proporción de los cationes fue de 14% de Mg^{2+} , 46% Na^+ , 29% de Ca^{2+} y 10% de K^+ . Debido al deficiente crecimiento de la planta en suelo ácido los iones están en mayor concentración en éste.

El jitomate fijó nitrógeno, el cual aumentó al incrementar la dosis del mismo, y con respecto al contenido de cationes en fruto se encontraron en la siguiente proporción: potasio 89.4%, magnesio 7.3%, calcio 1.6% y sodio 1.8%; esta distribución de iones muestra que éstos son absorbidos por la planta y que son distribuidos a diferentes partes de la estructura de la misma, ya que estos iones también se encontraron en planta para ambos suelos con una proporción diferente a la del fruto, siendo los iones potasio, calcio y magnesio del orden, aproximadamente del 32.6%, y el ión sodio en menor concentración.

De acuerdo con el análisis de varianza (ANOVA) para un modelo bifactorial hay diferencias significativas del factor suelo para un nivel de confianza de F_0 de 95% para el crecimiento y producción del cultivo de jitomate, mientras que no hay efectos significativos para los tratamientos de dosificación ni de interacción; y con el análisis ANOVA de un solo factor se observó que las diferentes dosificaciones para la producción de jitomate son



altamente significativas, lo que permite concluir que el suelo neutro es mejor soporte que el suelo ácido y que la dosificación de orina en el cultivo favorece el crecimiento y la producción del jitomate.

Con respecto a la prueba de Tukey, se obtiene que el tratamiento con dosis uno de orina y fertilizante mineral son estadísticamente iguales en cuanto a producción de fruto y que el mejor tratamiento fue el de la orina con dosis doble (T3-N).

Con base en toda la experimentación y el respectivo análisis realizado, se sugiere la orina humana como “fertilizante” alternativo, debido a que es rica en nitrógeno y contiene otros nutrimentos requeridos por las plantas como potasio, calcio y magnesio; en cuanto a rendimiento, la dosificación de orina humana es comparable a la de un fertilizante mineral, con respecto a nitrógeno dosificado; además de tener algunas ventajas sobre éste último, debido a que al estar en estado líquido se facilita la manipulación, el costo es mínimo y al separarlo de la fuente que lo genera se ahorra una cantidad considerable de agua potable y se evita la contaminación de cuerpos de agua superficiales. Pero no hay que dejar a un lado que todavía falta mucho por hacer, como concientizar a la gente para la aceptación de este residuo y hacer uso de éste con el debido cuidado, ya que es posible ocasionar una fuente de contaminación por patógenos y otros constituyentes que deben tomarse en cuenta.



6

REFERENCIAS

- Bohn N., McNeal B., O'Connor G. *Química del suelo*. Ed. Limusa. 1ra. Edición, México 1993.
- Borsuk M., Maurer M., Lienert J. Larsen, T. 2008. Charting a Path for innovative toilet technology using multicriteria decision analysis. *Environmental science & technology*. 42(6). 1855 – 1862.
- Canseco F. 2009. Baños secos contra la falta de agua. Periódico milenio, 02 / Oct/ 2009. (En línea) <http://www.milenio.com/node/260173>.
- Castillo L. 2002. Sanitario ecológico seco. Manual de diseño, construcción, uso y mantenimiento. Guadalajara, México. (En línea) <http://www.zoomzap.com/manuals/SES/68-esp.php>.
- CEZM. 2006. Centro de Estudios para la Zona Metropolitana - Metrópoli 2025, 26 de junio de 2006. <http://www.agua.org.mx/content/view/3210/55/>.
- Corpeño B. 2004. Manual del cultivo de tomate. Centro de inversión, desarrollo y exportación de agronegocios. San Salvador, El salvador.
- Dickson R. 1980. Química enfoque ecológico. Ed. Limusa S.A. de C.V. p. 378.
- Everhart E., Jauron R., Haynes C. 2002. Guía de horticultura de Iowa State University. El huerto doméstico. Iowa State University.



- Fassbender, H., Bornemisza, E. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Colección de libros y materiales educativos no. 81. Costa Rica 1987. 5ta. reimpresión
- Fernández, L., Rojas, N., Roldán, T., Ramírez, M., Gustavo, H., et al. 2006. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Instituto Mexicano del Petróleo. México, D.F.
- FIRA. 2008. El mercado de los fertilizantes en México: situación actual y perspectivas 2009. Dirección de análisis económicos y sectorial. Fideicomisos instituidos en relación con la agricultura.
- Ganrot Z. 2005. Urine procesing for efficient nutrient recovery and reuse in agriculture. (PhD thesis). Sweden. Göteborg University. Faculty of Science. 170 p.
- GBS. Guía de los baños secos (GBS). Finlandia. (En línea) http://www.drytoilet.org/pdf/guide_esp.pdf.
- Germer J., Addai S., Sarpong D. 2009. Fertilization with human urine in a nutshell. University of Hohenheim.
- Grasser J. 1982. Agricultural productivity and the nitrogen cycle. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 296, 296 – 314.
- Guadarrama R., Pichardo N., Morales-Oliver E. 2001. Urine and Compost Efficiency Applied to Lettuce under Greenhouse Conditions in Temixco, Morelos, México. In: *Abstract Volume, First International Conference on Ecological Sanitation* 5-8 November 2001, Nanning, China.
- Guzha E., Nhapi I., Rockstrom J. 2005. An assessment of the effect of human faeces and urine on maize production and water productivity. *Phys. Chem. Earth.* 30, 840 – 845.
- Heinonen-Tanski H, Van Wijk – Sijbesma C. 2005. Human excreta for plant production. *Bioresource technology.* 96, 403 – 411.
- Heinonen-Tanski H, Sjöbolm A., Fabritius H., Karinen P. 2007. Pure human urine is a good fertilizer for cucumbers. *Bioresource technology.* 98, 214 – 217.
- Hellström D., Johansson E., Grennberg K. 1999. Storage of human urine: acidification as a method to inhibit decomposition of urea. *Ecological Engineering.* 12, 253 – 269.
- Höglund C., Ashbolt N., Stenström T., Svensson L. 2002. Viral persistence in source-separated human urine. *Advances in Enviromental Research.* 6, 265 – 275.
- Huuhtanen S. Laukkanen A. 2006. A guide to sanitation and hygiene for those working in developing countries. Tampere Polytechnic, University of Applied Sciences.
- Infojardin. http://articulos.infojardin.com/PLAGAS_Y_ENF/PLAGAS/Mosca_blanca.htm



- Johansson M. 2001. Urine separation – closing the nutrient cycle, Stockholm Water Company, Sweden. (En línea) http://www.iees.ch/EcoEng011/downloads/EcoEng011_F2.pdf
- Jönsson H. 2002. Urine separating sewage systems-environmental effects and resource usage. *Water Science and Technology*, 46, 6-7, 333 – 340.
- Jones C., Jacobseb J. 2001. Nutrient management module No. 2. Plant nutrition and soil fertility. Montana State University. (En línea) <http://landresources.montana.edu/nm/modules/mt44492.pdf>
- Jönsson H., Stintzing A., Vinnerås B., Salomon E. 2004. Lineamientos para el uso de la orina y heces en la producción de cultivos. Serie de publicaciones de Ecosan. Stockholm Environment Institute. Reporte 2004 – 2.
- Karak T., Bhattacharyya P. 2011. Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality. *Resources, conservation and Recycling*. 55, 400 – 408.
- Kass D. Fertilidad de suelos. Ed. Euned, 1ra. Edición, 2007.
- Kauffman O. 2008. Atropogenic plant nutrients as fertiliser. (PhD Thesis). Germany. University of Berlin.
- Kirchmann H., Petterson S. 1995. Human urine – chemical composition and fertilizer use efficiency. *Fertilizer Research*. 40, 149 – 154.
- Larsen T., Gujer W. 1996. Separate management of anthropogenic nutrient solutions (human urine). *Water Science and Technology*. 34 (3-4), 87 – 94.
- Lienert J., Haller M, Berner A, Staffaucher M., Larsen T.A. 2003. How farmers in Switzerland perceive fertilizers from recycled antropogenic nutrients (human urine). *Water Science and Technology*. 48 (1), 47 – 56.
- Manuales para la educación agropecuaria. 2008. Suelos y fertilización. Área: suelos y agua 34. Ed. Trillas
- Martínez J. L., Monje I. 2009. Informe final del proyecto situación actual de la problemática ambiental del cultivo de la zarzamora en el municipio de Los Reyes Michoacán.
- Mnkeni P., Austin L. 2009. Fertilizer value of human manure from pilot urine – diversion toilets. *Water SA*. 35 (1), 133 – 138.
- Mnkeni P., Cisneros B, Phasha M, Austin L. 2006. Use of human excreta from urine – diversion toilets in food gardens: agronomic and health aspects. Water Research Commission.
- Mobley H., Hausinger R, 1989. Microbial Ureases: Significance, Regulation, and Molecular Characterization. *Microbiological Reviews*. 53 (1), 85 – 108.



- Monografía del jitomate. Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria. Gobierno del Estado de Veracruz.
- Montgomery D. *Diseño y análisis de experimentos*. 2da. Edición. Ed. Limusa Wiley. 2011
- Morevas O, Carbajal L. 1995. "Tablas de composición de alimentos". Ediciones pirámide. España
- Morgan P., 2003. Experimental using urine and humus derived from ecological toilets as a source of nutrients for growing crops. (En línea) <http://aquamor.tripod.com/KYOTO.htm>
- Mulder A. 2003. The quest for sustainable nitrogen removal technologies. *Water Science and Technology*. 48 (1), 67 - 75.
- Navarro G., Navarro S. 2003. *Química agrícola, el suelo y los elementos esenciales para la vida vegetal*. Grupo Mundi – prensa. Madrid, España 2da. Edición.
- Nawab B., Nyborg I., Esser K., Jenssen P., 2006. Cultural preferences in designing ecological sanitation systems in North West Frontier Province, Pakistan. *Journal of Environmental Psychology*. 26, 236-246
- Ndzana E., Otterpohl R. 2009. Urine Reuse as Fertilizer for Bamboo Plantations. In International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams, Vancouver 2009. 687 - 696
- Niwagaba C., 2007. Human excreta treatment technologies – prerequisites, constraints and performance. (Tesis de licenciatura - Uppsala). (En línea) http://diss-epsilon.slu.se/archive/00001644/01/Niwagaba_Lic.pdf
- NMX-AA-004-SCFI-2000. Análisis de agua – Determinación de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-008-SCFI-2000. Análisis de agua - Determinación del pH
- NMX-AA-026-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas
- NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas
- NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas
- NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas
- NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de cloruros totales en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas

- NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua – Determinación de la conductividad electrolítica
- NMX-AA-102-1987. Calidad de agua – Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* presuntiva – Método de filtración en membrana
- NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales
- NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.
- NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación.
- Nuez F. *El cultivo del tomate*. 1995. Grupo Mundi – prensa. 1ra. Edición.
- Pradhan S., Nerg A., Sjöblom A. et al., 2007. Use of human urine fertilizer in cultivation of cabbage (*Brassica oleracea*) – impacts on chemical, microbial, and flavor quality. *J. Agric. Food Chem.* 55, 8657 – 8663.
- Pradhan S., Holopainem J., Heinonen – Tanski H., 2009. Stored human urine supplemented with wood ash as fertilizer in tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivation and its impacts on fruit yield and quality. *J. Agric. Food Chem.* 57, 7612 – 7617.
- Pradhan S., Pitkänen S., Heinonen – Tanski H., 2009a. Fertilizer value of urine in pumpkin (*Curbita maxima L.*) cultivation. *Agricultural and food science* . 18, 57 – 68.
- Pradhan S., Holopainem J., Weisell J., Heinonen – Tanski H., 2010. Human urine and wood ash as plant nutrients for red beet (*Beta vulgaris*) cultivation: impacts on yield quality. *J. Agric. Food Chem.* 58, 2034 – 2039.
- Pradhan S. 2010a. Yield and Quality of vegetables fertilized with human urine and wood ash. Dissertation in: Forestry and Natural Sciences. Publications of the University of Eastern Finland.
- Rodhe L., Richert A., Steineck S. 2004. Ammonia emissions after application of human urine to a clay soil for barley growth. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 68,191 – 198.
- Rodríguez O., Rodríguez A. 2002. Comparación de la CIC en dos suelos, utilizando acetato de amonio, acetato de sodio y cloruro de amonio. *Rev. Fac. Agron.* 19 (4), 253 – 263.



- Rodríguez R., Tabares J. Medina J. 1997. Cultivo moderno del tomate. Grupo Mundi – prensa. 2da. Edición.
- Rosemarin A. 2003. EcoSanRes – a Swedish international ecosan programme. 2nd. International symposium on ecological sanitation, IWA & GTZ.
- SAGARPA. 2002. Información oportuna de mercados. Publicación electrónica. (En línea) <http://www.siea.sagarpa.gob.mx/InfOMer/analisis/antomate.html>
- Schönning C. 2002. Evaluation of microbial health risks associated with the reuse of source – separated human urine. Swedish Institute for Infectious Disease Control. EcoSanRes.
- Schönning C., Stenström, T. 2004. Guidelines for the safe use of urine and faeces in ecological sanitation systems. EcoSanRes report. 2004-1. (En línea) www.ecosanres.org.
- SEMARNAT. 2008. Programa Nacional Hídrico 2007 – 2012.
- Silva R., Cameron K., Di H., Jorgensen E. 2005. A lysimeter study to investigate the effect of dairy effluent and ures on cattle urine N losses, plant uptake and soil retention. *Water, Air, and Soil pollution*. 164, 57 – 78.
- Sopena., 1980. Enciclopedia universal Sopena. Diccionario ilustrado de la lengua española. Ed. Ramón Sopena S. A. Tomo siete.
- Tidåker P., Mattsson B., Jönsson H., 2007. Environmental impact of wheat production using human urine and mineral fertilizers a scenario study. *J. Cleaner Prod.* 15, 52 – 62.
- Thompson L., Troeh F. 1988. Los suelos y su fertilidad. Ed. Reverté. 4ta. Edición. Barcelona.
- WHO. 2006. WHO-Guidelines for safe use of wastewater, excreta and greywater. *Wastewater use in agriculture*. Vol. 1 y 2.
- Vinnerås B. Jönsson H. 2002. The performance and potential of faecal separation and urine diversion to recycle plant nutrients in household wastewater. *Bioresource Technology*. 84, 275 – 282.
- Vinnerås B., Nordin A., Niwagaba C., Nyberg K. 2008. Inactivation of bacteria and viruses in human urine depending on temperature and dilution rate. *Water Research*. 42, 4067 – 4074.
- Winbland U, Simpson – Hébert M. 2004. Ecological sanitation – revised and enlarge edition. IEA (Instituto Ambiental de Estocolmo), Suecia.