

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“USO DE EXCRETAS HUMANAS PROCESADAS SOBRE LAS
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y EL CRECIMIENTO DEL
MAÍZ HÍBRIDO EN INVERNADERO”**

Presentado por:

JOSÉ JONATHAN VEGA SALAZAR

Tesis para optar el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

LIMA - PERÚ

2016

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA

**“USO DE EXCRETAS HUMANAS PROCESADAS SOBRE LAS
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y EL CRECIMIENTO DEL
MAÍZ HÍBRIDO EN INVERNADERO”**

Presentado por:

JOSÉ JONATHAN VEGA SALAZAR

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRONOMO**

Sustentada y Aprobada ante el siguiente jurado:

Ing. Mg. Sc. Juan Guerrero Barrantes
PRESIDENTE

Dr. Sady García Bendezú
PATROCINADOR

Ing. Mg. Sc. Braulio La Torre Martínez
MIEMBRO

Ing. Mg. Sc. Rosa Miglio Toledo
MIEMBRO

Lima - Perú

2016

INDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 ECODESS (ecología y desarrollo con saneamiento sostenible).....	5
2.2 El baño ecológico seco.....	5
2.2.1 Accesorios básicos para la instalación del baño ecológico seco.....	6
2.3 La ecoestación.....	7
2.4 Nutrientes en la excreta.....	7
2.4.1 Contenido de macronutrientes en la excreta	8
2.4.2 Composición y disponibilidad para las plantas de los nutrientes en las heces	11
2.4.3 Composición y disponibilidad para las plantas de los nutrientes en la orina	12
2.5 Tratamiento higiénico de las heces	13
2.5.1 Tratamiento primario o in situ – heces.....	14
2.5.2 Tratamiento secundario o externo - heces.....	14
2.5.2.1. Incineración	15
2.5.2.2. Compostaje termofílico	15
2.5.2.3. Almacenamiento.....	16
2.5.2.4. Digestión.....	16
2.5.2.5. Higienización química.....	16
2.5.2.6. Vermicompostaje.....	17
2.5.2.7. Solarización	18
2.6 Tratamiento higiénico de la orina	18
2.6.1 Tratamiento primario o in situ – orina	18
2.6.2 Tratamiento secundario o externo - orina	19
2.7 Experiencias con excretas y orina humana para uso agrícola.....	19

III.	MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1	Ubicación	22
3.2	Cultivo indicador	22
3.3	Suelo	22
3.4	Materiales.....	23
3.4.1	Fase de invernadero	23
3.4.2	Fase de laboratorio.....	24
3.5	Descripción de los residuos orgánicos ensayados	24
3.5.1	Excreta procedente de un baño ecológico portátil	24
3.5.2	Excreta procedente del baño ecológico de la UNALM	25
3.5.3	Excreta procedente de un baño ecológico familiar	26
3.6	Metodología y procedimiento	29
3.6.1	Colecta, preparación y muestreo del suelo.....	29
3.6.2	Preparación de las macetas	29
3.6.3	Aplicación del material orgánico	30
3.6.4	Conducción del experimento	30
3.7	Parámetros evaluados.....	31
3.7.1	Altura de planta.....	31
3.7.2	Determinación de área foliar.....	31
3.7.3	Pesos fresco y seco de la parte aérea.....	31
3.7.4	Extracción de nitrógeno por la planta	32
3.7.5	Determinación de la densidad aparente y contenido de humedad en suelo	32
3.7.6	Determinación de conductividad eléctrica y pH.....	33
3.7.7	Carbono orgánico y nitrógeno total en suelo	33
3.8	Análisis estadístico.....	34
IV.	RESULTADOS	36
4.1	Resultados en el cultivo de maíz.....	36
4.2	Resultados en el suelo	41

V.	DISCUSIÓN.....	46
VI.	CONCLUSIONES.....	50
VII.	RECOMENDACIONES.....	51
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	52
IX.	ANEXOS	60

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1: Contenido aproximado en nutrientes de varios fertilizantes naturales.....	4
Cuadro 2: Valores propuestos para la masa y nutrientes excretados en Suecia.....	8
Cuadro 3: Suministro de alimentos (equivalente primario de las cosechas) en diferentes países en el 2000.....	9
Cuadro 4: Excreción de nutrientes estimada por persona en diversos países	10
Cuadro 5: Características físicas y químicas del suelo empleado en las macetas	23
Cuadro 6: Procesos externos, valores de pH y temperatura (°C) luego de la solarización de las excretas procedentes del baño ecológico de la UNALM.	26
Cuadro 7: Características fisicoquímico de los residuos orgánicos ensayados	27
Cuadro 8: Características de la orina utilizada en el proceso de solarización	27
Cuadro 9: Porcentaje de humedad y peso húmedo del material orgánico	30
Cuadro 10: Distribución de grados de libertad, suma de cuadrados y cuadrado medio por fuente de variación.	35
Cuadro 11: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre la altura, área foliar, peso fresco, seco y la extracción de nitrógeno de plantas de maíz	37
Cuadro 12: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre la humedad gravimétrica, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N en el suelo.....	42
Cuadro 13: Aporte total de macronutrientes por las diferentes excretas humanas procesadas.....	49
Cuadro 14: Valores entre paréntesis correspondientes al porcentaje relativo de extracción de N con respecto al testigo en maíz.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Tratamientos ensayados detallando los procesos <i>in situ</i> y externos aplicados a los residuos orgánicos.....	28
Figura 2: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre la altura de plantas de maíz.....	38
Figura 3: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre el área foliar de plantas de maíz.....	38
Figura 4: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre el peso fresco de plantas de maíz.....	39
Figura 5: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre el peso seco de plantas de maíz.....	39
Figura 6: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre la extracción de nitrógeno de plantas de maíz	40
Figura 7: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre la humedad gravimétrica en el suelo.....	43
Figura 8: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre la densidad aparente en el suelo.....	43
Figura 9: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre el pH en el suelo.....	44
Figura 10: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre la conductividad eléctrica en el suelo	44
Figura 11: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre el contenido de carbono orgánico total en el suelo	45
Figura 12: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre el contenido de nitrógeno total en el suelo.....	45

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1: ANVA de altura de la biomasa aérea en maíz	60
ANEXO 2: ANVA de materia fresca de la biomasa aérea en maíz.....	60
ANEXO 3: ANVA de materia seca de la biomasa aérea en maíz	60
ANEXO 4: ANVA de área foliar de la biomasa aérea en maíz.....	60
ANEXO 5: ANVA de extracción de N/maceta en la biomasa aérea en maíz	60
ANEXO 6: ANVA de humedad gravimétrica en el suelo	61
ANEXO 7: ANVA de densidad aparente en el suelo	61
ANEXO 8: ANVA de pH en el suelo	61
ANEXO 9: ANVA de conductividad eléctrica en el suelo.....	61
ANEXO 10: ANVA de carbono total en el suelo	61
ANEXO 11: ANVA de nitrógeno total en el suelo	62

RESUMEN

Un suelo fértil y saludable es la base de todo sistema agrícola sostenible, para ello es imprescindible trabajar en la conservación y manejo de la fertilidad de los suelos, lo que nos conlleva a un aporte constante de materia orgánica, he aquí la importancia del uso de las excretas humanas procedentes de baños ecológicos secos (BES), al utilizar este recurso dándoles el tratamiento apropiado se contribuye a mejorar la productividad de los suelos. El presente trabajo de investigación fue realizado en el Invernadero de Fertilidad de Suelos, de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), con el objetivo de evaluar el efecto del uso de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre las propiedades físicas del suelo y producción de biomasa para el cultivo de maíz, sembrado en un suelo agrícola de La Molina. Los parámetros evaluados en el cultivo fueron: altura, área foliar, biomasa fresca, seca y extracción de N. En el suelo se evaluó: humedad gravimétrica, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico total y nitrógeno total. Las excretas procedentes de BES fueron sometidas a procesos de compostaje, vermicompostaje y solarización con agua y orina. Los materiales orgánicos resultantes fueron mezclados homogéneamente con el suelo agrícola y luego incorporados a las macetas, los resultados encontrados fueron analizados para el cultivo y suelo a través del diseño completo al azar (DCA) simple, los promedios fueron sometidos al análisis de variancia y comparados mediante la prueba de comparación de medias HSD Tukey.

Los resultados encontrados para la altura de planta (cm), área foliar ($\text{cm}^2 \text{ maceta}^{-1}$), biomasa fresca y seca (g maceta^{-1}) y extracción de N (mg maceta^{-1}) en el cultivo de maíz fueron favorables ya que se encontró diferencia estadística, los resultados encontrados en el suelo para la humedad gravimétrica (%), densidad aparente (g cm^{-3}), conductividad eléctrica (dS m^{-1}), carbono orgánico total (%) y nitrógeno total (%) también fueron favorables ya que se encontró diferencia estadística, mientras que para el pH en el suelo no hubo diferencia estadística.

De los resultados encontrados y bajo las condiciones donde se realizó el ensayo se puede concluir que el uso de excretas humanas procesadas provenientes de BES, afectó favorablemente en la producción de biomasa aérea en el cultivo ensayado, así mismo mejoró las propiedades físicas del suelo con la excepción del pH.

Trabajos a futuro con excretas humanas procesadas, deben estar enfocados en determinar el proceso externo adecuado para el incremento de la producción de biomasa aérea en plantas, de la misma manera determinar la cantidad adecuada de excreta procesada para el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo agrícola y también determinar el efecto residual de las excretas procesadas para una segunda campaña usando alguna hortaliza.

Palabras clave: BES, excreta humana, suelo agrícola y biomasa aérea.

I. INTRODUCCIÓN

Un suelo fértil y saludable es la base de todo sistema agrícola sostenible. La sostenibilidad y el incremento de la fertilidad del suelo es aún un reto para la agricultura, por lo que es necesario buscar tecnologías de mejoramiento. El uso de los abonos orgánicos ha sido tradicionalmente una estrategia para restablecer la fertilidad natural de los suelos y mantener las propiedades físicas, químicas y biológicas favorables, sin embargo, los residuos orgánicos derivados de la agricultura y ganadería suelen ser escasos e insuficientes, especialmente en regiones de un desarrollo agrícola intensivo y en permanente expansión como la costa peruana.

La escasez de fuentes orgánicas para la agricultura hace necesario explorar el potencial de fuentes no convencionales como las excretas humanas procesadas. Las excretas procedentes de saneamientos ecológicos pueden constituir una fuente de nutrientes, por lo que el reciclaje de estos materiales y su aplicación al suelo puede resultar beneficiosa para el suelo y a la vez proveer un mecanismo para la disposición final de un residuo potencialmente contaminante.

En América Latina y el Caribe hay más de 120 millones de habitantes que carecen de acceso a sistemas mejorados de saneamiento y menos del 15% de las aguas residuales son tratadas. Este tratamiento es óptimo sólo en 6%, lo que indica que las aguas residuales de millones de personas son directamente evacuadas a los cuerpos de agua (ríos, lagos, mares y acuíferos) sin el tratamiento adecuado.

La forma convencional de saneamiento se caracteriza por un consumo significativo de agua. Una persona puede descargar anualmente 15 000 litros de agua pura, 400 – 500 litros de orina y unos 50 litros de heces por año. Este volumen es pequeño, cuando las heces estas deshidratadas. El problema con este sistema es que las heces se mezclan con la orina, esto significa 550 litros de una sustancia peligrosa.

El baño ecológico seco es un sistema amigable con el ambiente que no utiliza agua, evita la propagación de enfermedades y es de construcción sencilla. Este saneamiento ecológico (ECOSAN) se basa en un enfoque de ecosistema. “Los

nutrientes y materia orgánica contenidos en la excreta humana son considerados como recurso, a ser reciclado en vez de ser un desperdicio para desecharse”. Las excretas son tratadas donde son producidas para después, si es necesario, procesarlas en otros sitios hasta convertirlas en un material seguro, libre de patógenos. Así, los nutrientes contenidos en la excreta se reciclan para usarse en la agricultura.

La mayor parte de los nutrientes de la excreta humana se encuentran en la orina; esta contiene cantidades significativas de los principales macronutrientes requeridos por las plantas. Los nutrientes se encuentran en forma iónica y su disponibilidad para las plantas es comparable con la de fertilizantes químicos (Johansson et al., 2001; Kirchmann y Pettersson, 1995; Simons y Clemens 2004). Las recomendaciones para el uso agrícola de la excreta se fundamentan en el conocimiento del contenido de nutrientes en la excreta, las cantidades excretadas, la composición y disponibilidad de fertilizante para las plantas y el tratamiento de la excreta, que influencia sus propiedades.

Entre los tratamientos se propone el compostaje termofílico que es un proceso biológico, donde se busca mantener una composición adecuada de materiales para alcanzar temperaturas lo suficientemente altas para una inactivación eficaz de los patógenos; el vermicompostaje es un proceso biotecnológico que permite degradar y estabilizar residuos orgánicos bajo condiciones aerobias y mesófilas mediante la acción de ciertas especies de lombrices de tierra; y la solarización donde las heces podrían ser calentadas por el sol por ejemplo en cámaras de recolección o compartimentos fecales al sol, esto ha sido probado en versiones sencillas en sistemas de saneamiento ecológico.

Proponemos la hipótesis de que la aplicación de excretas humanas sometidas a tratamientos como compostaje, vermicompostaje y solarización, proveen una fuente adecuada de nutrientes a los cultivos. Es por ello que se plantea el siguiente trabajo de investigación a nivel de invernadero con los siguientes objetivos:

Objetivo general

- Evaluar la factibilidad técnica del uso de excretas humanas tratadas bajo diferentes métodos como fuente de nutrientes para las plantas y carbono del suelo.

Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la aplicación de excretas humanas procesadas sobre el crecimiento, la producción de biomasa y el área foliar de plantas de maíz.
- Determinar la disponibilidad de nitrógeno de las excretas a partir de la absorción de nitrógeno por parte de las plantas de maíz.
- Evaluar el efecto de la aplicación de las mismas excretas sobre el contenido de carbono orgánico, nitrógeno total y algunas propiedades físicas de un suelo de La Molina.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

El abonamiento de los campos agrícolas con excretas humanas es una práctica antigua que ha contribuido a preservar la fertilidad de los suelos en muchos países de Asia oriental y del Pacífico occidental durante más de 4000 años. Actualmente sigue siendo la única opción abierta a la agricultura en las regiones desprovistas de servicios de alcantarillado. La mayoría de las viviendas de los países en desarrollo seguirán careciendo de alcantarillado en un futuro previsible; por eso hay que dar importancia especial a la aplicación de sistemas sanitarios *in situ* que permitan utilizar fácilmente y sin riesgos las excretas almacenadas, por ejemplo, alternando las letrinas de pozos gemelos o de sifón y las de formación de abono. Por las diferencias de dieta y clima, hay una variación considerable en la cantidad de excretas producidas; una cantidad normal en zonas urbanas de países en desarrollo sería la de 1.8 litros por persona y por día (Feachem et al., 1983). En esta cantidad, hay aproximadamente 350 gramos de sólidos secos que comprenden unos 90 gramos de materia orgánica y cantidades apreciables de nutrientes de las plantas. En el Cuadro 1 tenemos tipos de fertilizantes naturales y su contenido en nutrientes.

Cuadro 1: Contenido aproximado en nutrientes de varios fertilizantes naturales

Tipo de fertilizante	Contenido en nutrientes (% del peso seco)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Heces humanas	5 – 7	3 – 5.4	1 – 2.5
Orina humana	15 – 19	2.5 – 5	3 – 4.5
Excretas humanas sin tratar*	10.4 – 13.1	2.7 – 5.1	2.1 – 3.5
Estiércol fresco de ganado vacuno	0.3 – 1.9	0.1 – 0.7	0.3 – 1.2
Estiércol de ganado porcino	4 – 6	3 – 4	2.5 – 3
Residuos de plantas	1 – 11	0.5 – 2.8	1.1 – 11

*Heces, orina y 0.35 litros de agua para el aseo.

Fuente: Strauss (1985)

El tratamiento de las excretas no solamente destruye los microorganismos patógenos, sino que también transforma los nutrientes en sustancias más fácilmente aprovechables por las plantas y estabiliza la materia orgánica de modo que resulta un mejor acondicionador del suelo. Las excretas y las materias derivadas de ellas se aplican por lo general a la tierra antes de sembrar.

2.1 ECODESS (ecología y desarrollo con saneamiento sostenible)

Es una alternativa de gestión integral del saneamiento, de carácter permanente para los nuevos centros urbanos, periurbanos y rurales en el Perú. Contribuye a generar un cambio de actitud en relación a una nueva cultura del uso del agua potable y del saneamiento. Promueve la separación, tratamiento y reusó de los residuos domésticos (aguas grises y excretas) en diferentes ámbitos de intervención como: la vivienda, barrio o centro poblado. Promueve la participación de los actores locales en ámbitos descentralizados bajo modalidades empresariales comunitarias, públicas o mixtas.

2.2 El baño ecológico seco

El baño ecológico seco (BES) es un módulo higiénico instalado dentro de la vivienda, con tecnología de saneamiento ecológico en sus accesorios. El BES es diseñado para separar los residuos y no usa agua para la evacuación, diferenciándose de los sistemas de saneamiento convencional caracterizado por el uso excesivo de agua para evacuar las excretas.

Ventajas

- Contribuye a la prevención de enfermedades
- No requiere agua para su funcionamiento
- El sanitario debe limpiarse con muy poca agua
- Recupera y facilita el reciclaje de nutrientes
- Ofrece privacidad, seguridad y comodidad
- Puede estar en interiores y se pueden construir con materiales locales
- Al ocuparlo contribuyes a la conservación de tu comunidad y el medio ambiente

Desventajas

- Su instalación requiere asesoría técnica precisa
- Por desconocimiento o mal manejo puede causar resistencia
- Las excretas recolectadas deben manejarse con cuidado ya que pueden contener patógenos
- Su uso requiere mantenimiento frecuente
- Su reparación podría requerir conocimiento especializado de las instalaciones

2.2.1 Accesorios básicos para la instalación del baño ecológico seco

- **El ecoinodoro:** Es un elemento básico en el ECODESS, diseñado anatómicamente para permitir la separación de la excreta y la orina.
- **Las cámaras de almacenamiento:** son cubículos para el almacenamiento de la excreta y del material secante usado; el BES de doble cámara consta de dos cámaras composteras contiguas, de 300 a 500 litros de capacidad cada una de uso alterno; de tal manera que cuando se llena la primera cámara, debe moverse el ecoinodoro para poder usarse la segunda, el tiempo promedio de almacenamiento es de un año para cada cámara. Una vez llenada la segunda cámara, el contenido de la primera ya se habrá desecado y convertido en un residuo inocuo con aspecto de tierra seca y sin olor.
- **Material o mezcla secante:** Luego de cada uso del ecoinodoro, se debe aplicar la mezcla secante en cantidad suficiente para cubrir la deposición. Los materiales más comunes para hacer mezcla secante son la tierra seca, la ceniza, la cal o el aserrín. La tierra seca es fácil de mezclar con otros materiales, generalmente se le agrega cal para aumentar sus propiedades alcalinas, se recomienda una proporción de $\frac{3}{4}$ de tierra fina seca por $\frac{1}{4}$ de cal para la mezcla. La cal es un alcalinizante puro, exceder la cantidad de cal es un riesgo porque puede matar a los organismos encargados del proceso de descomposición, nunca debe usarse sólo cal como material secante. El aserrín es otro elemento utilizado, es mejor usar este material pues tiene capacidad de absorción, es rico en carbono y esto ayuda a balancear la acidez, este material es ideal para procesos de

compostaje adicionando otros materiales orgánicos en porcentajes menores. La ceniza es fácil de conseguir en lugares donde se cocina con leña y contiene concentraciones altas de fosforó y potasio.

- **El urinario:** es un accesorio que se incorpora en el diseño del BES familiar, para contribuir a reducir el consumo del agua potable (no menos de 5 Litros de ahorro diario) en la evacuación, así como a su mantenimiento e higiene.
- **El recolector de orina:** un bidón u otro recipiente cerrado, que nos permite almacenar la orina para poder usarla como fertilizante natural.
- **El contenedor:** es un recipiente móvil, que se usa en un baño ecológico seco con una sola cámara, y está elaborado para recibir la excreta. Se recomienda que el material sea impermeable para que no permita el ingreso de los líquidos.

2.3 La ecoestación

Una vez realizada la limpieza, recolección y muestreo de residuos, éstos son llevados a uno de los componentes importantes de la gestión del ECODESS denominado ecoestación. En ella se realizará el tratamiento y reutilización de los residuos de los BES y otras actividades, como: el almacenamiento de los residuos recolectados, el tratamiento de los residuos (secado y/o reutilización) y la preparación de material secante.

2.4 Nutrientes en la excreta

La mayoría de los nutrientes en los residuos domésticos se encuentran en la orina y las heces (Jönsson et al., 2005). Mientras el cuerpo humano continua creciendo, algunos nutrientes son tomados e integrados en los tejidos. El nitrógeno es acumulado en las proteínas, el fósforo principalmente en los huesos y músculos y el potasio en los nervios y músculos. Sin embargo, sólo una porción pequeña de los nutrientes es retenida en el cuerpo aun cuando los niños y los adolescentes crecen rápidamente. Según cálculos realizados de la dieta promedio y peso ganado por los adolescentes suecos

entre los 2 y 17 años de edad (Becker, 1994) y la composición del cuerpo humano (Garrow, 1993), la retención en el cuerpo en desarrollo durante este período es aproximadamente 2 %, 6 % y 0.6 % de N, P y K respectivamente. Una vez que el esqueleto y los músculos alcanzan su talla completa, no se retienen ni acumulan más nutrientes en el cuerpo. La cantidad de nutrientes excretados puede calcularse a partir de la ingesta de alimentos.

2.4.1 Contenido de macronutrientes en la excreta

Un método para calcular la composición de la excreta es el que usa las estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) sobre el suministro de alimentos disponible en varios países, ha sido desarrollada por Jönsson y Vinnerås (2004). Se utiliza ecuaciones derivadas de las estadísticas de la FAO y una estimación de la excreción media de la población sueca (Cuadro 2).

Cuadro 2: Valores propuestos para la masa y nutrientes excretados en Suecia

Parámetro	Unidad	Orina	Heces	Papel higiénico	Aguas negras (orina + heces)
Masa húmeda	kg persona ⁻¹ año ⁻¹	550	51	8.9	610
Masa seca	kg persona ⁻¹ año ⁻¹	21	11	8.5	40.5
Nitrógeno	g persona ⁻¹ año ⁻¹	4000	550	-	4550
Fósforo	g persona ⁻¹ año ⁻¹	365	183	-	548

Fuente: Vinnerås, 2002

Sobre la base de la estimación de la excreción media, de los alimentos suministrados a la población sueca de acuerdo a las estadísticas de la FAO y en un análisis estadístico de diferentes productos alimenticios, se han desarrollado relaciones (ecuaciones 1 y 2) entre los alimentos suministrados de acuerdo a la FAO y la excreción de N y P.

Ecuación 1

$$N = 0.13 * Pt$$

Ecuación 2

$$P = 0.011 * (Pt + Pv)$$

Donde:

Pt = Proteína total de los alimentos

Pv = Proteína vegetal de los alimentos

En las ecuaciones 1 y 2 las unidades del N y del P son las mismas que las de la proteína de los alimentos. Como se muestra en la ecuación 2, existe una correlación positiva fuerte entre los contenidos de proteína y el fósforo en los productos alimenticios. Además, los alimentos vegetales contienen en promedio dos veces más de fósforo por gramo que las proteínas animales, por lo que la proteína vegetal se considera dos veces en la ecuación 2.

En el Cuadro 3 y Cuadro 4 se dan ejemplos de los resultados para dichas estimaciones para algunos países.

Cuadro 3: Suministro de alimentos (equivalente primario de las cosechas) en diferentes países en el 2000

País	Energía total kcal cap⁻¹día⁻¹	Energía vegetal kcal cap⁻¹día⁻¹	Proteína total g cap⁻¹día⁻¹	Proteína vegetal g cap⁻¹día⁻¹
China, Asia	3029	2446	86	56
Haití, Antillas	2056	1923	45	37
India, Asia	2428	2234	57	47
Sudáfrica, África	2886	2516	74	48
Uganda, África oriental	2359	2218	55	45

Fuente: (FAO, 2003)

Cuadro 4: Excreción de nutrientes estimada por persona en diversos países

País	Nutrientes		
	Nitrógeno Kg cap ⁻¹ año ⁻¹	Fósforo Kg cap ⁻¹ año ⁻¹	Potasio Kg cap ⁻¹ año ⁻¹
China, total	4	0.6	1.8
Orina	3.5	0.4	1.3
Heces	0.5	0.2	0.5
Haití, total	2.1	0.3	1.2
Orina	1.9	0.2	0.9
Heces	0.3	0.1	0.3
India, total	2.7	0.4	1.5
Orina	2.3	0.3	1.1
Heces	0.3	0.1	0.4
Sudáfrica, total	3.4	0.5	1.6
Orina	3	0.3	1.2
Heces	0.4	0.2	0.4
Uganda, total	2.5	0.4	1.4
Orina	2.2	0.3	1
Heces	0.3	0.1	0.4

Fuente: (Jönsson y Vinnerås, 2004)

Estas estimaciones asumen que la pérdida entre los alimentos suministrados y los alimentos consumidos, es decir los residuos de alimentos generados, es relativamente igual en los distintos países. Esta suposición es verificada por la información obtenida en China. La excreción total reportada por Gao et al. (2002) para China fue 4.4 kg de N y 0.5 kg de P. Estos valores corresponden de manera certera con los calculados en el Cuadro 4.

En el Cuadro 4, la excreción total ha sido dividida entre orina y heces, usándose para esto datos suecos. En Suecia, aproximadamente el 88 % del N y 67 % del P excretados se encuentran en la orina y el resto en las heces. La distribución de los nutrientes entre la orina y las heces depende de que tan digerible es la dieta, ya que los nutrientes digeridos entran en el metabolismo y son excretados con la orina, mientras que las fracciones no digeridas son excretadas con las heces. Es así, que para países donde la dieta es menos digerible que en Suecia, la orina contendrá un porcentaje menor

al 88 % de N y 67 % de P excretados. Por ejemplo, la información de China (Gao et al., 2002) indica que la orina contiene aproximadamente el 70 % del N y entre 25-60 % del P excretados.

La digestibilidad también influencia la cantidad de heces excretada. En Suecia esta cantidad es estimada en 51 kg de masa húmeda (Vinnerås, 2002), en China se ha medido como 115 kg persona⁻¹año⁻¹ (Gao et al., 2002). La masa seca fecal en Suecia es alrededor de 11 kg y en China 22 kg persona⁻¹año⁻¹. Las concentraciones de nutrientes son estimadas por la cantidad de nutrientes en la materia fecal y su masa.

2.4.2 Composición y disponibilidad para las plantas de los nutrientes en las heces

Aproximadamente el 50 % del nitrógeno fecal es soluble en agua (Trémolières et al., 1961). De esta cantidad, el 20 % es amoníaco, bioquímicamente degradada a partir de urea, péptidos y aminoácidos. Alrededor del 17 % del contenido total de nitrógeno se encuentra en las bacterias vivas y el resto se encuentra principalmente como nitrógeno orgánico combinado en moléculas tales como el ácido úrico y enzimas (Lentner et al., 1981). La proporción principal de fósforo en las heces se encuentra como fosfatos de calcio mineral no digerida. Por otra parte, el potasio se encuentra principalmente en su forma iónica, en equilibrio con los líquidos fuera del intestino (Berger, 1960; Guyton, 1992; Fraústo da Silva y Williams, 1997).

La disponibilidad de los nutrientes de la materia fecal para las plantas es más baja y más lenta que la de los nutrientes de la orina. Esto se debe a que la cantidad mayor de P y una gran cantidad de N provienen de materia no digerida y esta materia necesita ser degradada en el suelo para estar disponible a las plantas. No obstante, el material orgánico en las heces se degrada y así su contenido de N orgánico y P se vuelven disponibles para las plantas. Los fosfatos de calcio también son disueltos y se vuelven disponibles para las plantas y estos están tan disponibles como los suministrados por los fertilizantes químicos. El K en las heces está en forma iónica, que está disponible directamente para las plantas. Es así que es únicamente para el N que la disponibilidad de los nutrientes fecales es considerablemente menor que la de los fertilizantes químicos o la orina. Las altas concentraciones de P, K y materia orgánica

en la materia fecal pueden ocasionar un incremento sustancial en la producción, especialmente en suelos pobres. La materia orgánica contribuye de varias maneras: mejorando la estructura del suelo, aumentando la capacidad de retención del agua y la capacidad de amortiguamiento y favoreciendo a los microorganismos del suelo sirviéndoles como fuente de energía.

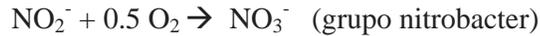
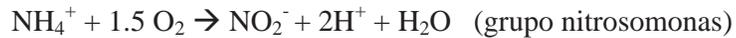
2.4.3 Composición y disponibilidad para las plantas de los nutrientes en la orina

Al momento de la excreción, el pH de la orina está generalmente alrededor de 6, pero puede variar entre 4.5 y 8.2 (Lentner et al., 1981). El nitrógeno se encuentra principalmente como urea (80 %), amoníaco (7 %), y creatina (6 %), mientras que el resto es principalmente libre de aminoácidos o péptidos cortos (Johnston & McMillan, 1952; Lentner et al., 1981; Guyton, 1992; Kirchmann & Pettersson, 1995; Fittschen & Hermann, 1998; Almeida et al., 1999). En la presencia de ureasa, la urea es rápidamente degradada a amonio y dióxido de carbono y los iones de hidróxido producidos, normalmente incrementan el pH a 9–9.3. Normalmente la ureasa se acumula en el sistema de tuberías de la orina y por tanto la transformación antes mencionada es muy rápida, generalmente en cuestión de horas (Vinnerås et al., 1999; Jönsson et al., 2000).



Urea Agua *Ureasa* Amonio Hidróxilo Bicarbonato

La urea es degradada a amonio por la ureasa presente en el suelo, siendo disponible directamente para las plantas. Tanto la urea como el amonio son los fertilizantes de N más usados en el mundo. El amonio aplicado en los suelos es transformado dentro de pocos días a nitrato y este es preferido por muchos cultivos. En suelos con una actividad microbiana muy baja, estas transformaciones pueden tomar más tiempo.



La disponibilidad del N de la orina para las plantas es la misma que la de los fertilizantes químicos de urea o amonio. Esto es de esperar, ya que el 90-100 % del N de la orina se encuentra como urea y amonio y ha sido verificado en experimentos de fertilización (Kirchman y Pettersson, 1995; Richert Stintzing et al., 2001).

El P en la orina es prácticamente (95-100 %) inorgánico y es excretado en forma de iones de fosfato (Lentner et al., 1981). Estos iones están disponibles directamente para las plantas y su disponibilidad para las plantas es tan buena como la del fosfato químico (Kirchmann y Pettersson, 1995).

El K es excretado en la orina como iones, los cuales están disponibles directamente para las plantas. Esta es la misma forma provista por los fertilizantes químicos. El S es excretado principalmente en la forma de iones libres de sulfato (Lentner, 1981; Kirchmann y Pettersson, 1995), los cuales están disponibles directamente para las plantas.

2.5 Tratamiento higiénico de las heces

Desde el punto de vista higiénico, las heces se deben considerar que contienen agentes patógenos por lo tanto deben ser tratadas antes de utilizar su contenido de nutrientes (Schönning y Stenström, 2004; OMS, 2006). El tratamiento fecal más común para lograr esta desinfección es el compostaje (Vinnerås, 2007). Generalmente necesitan tanto un tratamiento primario como secundario antes de ser aplicadas. El tratamiento primario es aquel que ocurre durante la recolección, y en los sistemas secos este normalmente ocurre bajo el inodoro durante el período de recolección. Tiene como objetivos: reducir el riesgo de olores, presencia de moscas y principalmente reducir el riesgo higiénico, es decir disminuir el número de patógenos potenciales en las heces.

El tratamiento secundario ocurre cuando el período de recolección ha finalizado y puede tener lugar en el inodoro (por ejemplo, en un inodoro de doble cámara) o en otro lado. El objetivo principal es entregar las heces higiénicamente seguras y transformar la mezcla de heces a un estado donde sea inodora y visualmente agradable.

2.5.1 Tratamiento primario o in situ – heces

El tratamiento primario más común de las heces es la recolección en una cámara y su deshidratación usando algún aditivo, como cenizas vegetales, cal, tierra seca o aserrín. El aditivo debe ser mucho más seco que las heces, el contenido de materia seca de la tierra seca y cenizas es generalmente entre un 85-100 % mientras que de la excreta al momento de la excreción tienen un contenido de materia seca similar al 20 %. Es así, que el contenido de materia seca de la mezcla es mucho más alto que el de las heces. Este aumento del contenido de materia seca reduce el riesgo de olores y moscas. Reduce algunos patógenos, y el efecto es reforzado si el aditivo tiene un pH alto, como el de la cal o el de las cenizas vegetales.

En el proceso de secado, todos los nutrientes excepto el N y la mayoría de la materia orgánica son conservados. Parte del N se pierde como amoníaco y algo de materia orgánica fácilmente degradable también se degrada y se pierde como dióxido de carbono y agua. Sin embargo, si el secado es rápido las pérdidas son pequeñas ya que la degradación biológica adicional se reduce y cesa cuando el nivel de humedad decrece a niveles bajos. En este caso, solamente una parte de la materia orgánica soluble en agua y del N, inicialmente alrededor del 50 % del N total (Trémolières et al., 1961), corren el riesgo de perderse. Si el secado es lento, ocurrirá una mayor degradación biológica y por consiguiente habrá mayores pérdidas de materia orgánica y N.

2.5.2 Tratamiento secundario o externo - heces

El tratamiento de los nutrientes de las heces tiene efectos en el contenido y disponibilidad para las plantas, este efecto varía según los nutrientes y los tratamientos. El N y el S pueden perderse en forma de gases, N₂, SO₂ y H₂S, durante algunos tratamientos, pero los otros nutrientes permanecen en el producto tratado, mientras no se formen lixiviados.

2.5.2.1. Incineración

Es un proceso aeróbico con una degradación completa de la materia orgánica. Por lo tanto, si las heces son completamente incineradas, básicamente se perderá todo el N y el S en las emanaciones de gas, mientras prácticamente todo el P y el K permanecerán en la ceniza. Al igual que la ceniza vegetal, la ceniza de la incineración exitosa es un concentrado y un fertilizante higiénico con alto contenido de P y K.

2.5.2.2. Compostaje termofílico

Es un proceso aeróbico que depende del calor de la materia orgánica en descomposición para alcanzar la temperatura deseada, mayor de 50 °C, durante un número de días que asegure una reducción segura de patógenos (Vinnerås et al., 2003a; Schönning y Stenström, 2004). Una alta tasa de descomposición es necesaria si la composta debe llegar a esta temperatura elevada. La descomposición requiere de mucho oxígeno y el peso total de aire necesario para el proceso de compostaje es usualmente varias veces el del sustrato (Haug, 1993). En un compostaje exitoso, el pH del sustrato aumenta a 8-9, incluso si el pH inicial es bajo (~5) (Eklind y Kirchmann, 2000; Beck-Friis et al., 2001, 2003). El incremento de pH se debe en gran parte al N orgánico (proteína) que se degrada y forma amoníaco (Haug, 1993; Beck-Friis et al., 2003).

La combinación del amoníaco, una temperatura elevada, un pH alto y una aireación elevada significa que el N en forma de amoníaco se pierde. Estas pérdidas disminuyen de alguna manera si la relación C/N del sustrato aumenta mediante el uso de aditivos altos en carbono, por ejemplo, hojas, paja o papel. Sin embargo, si la relación C/N se vuelve muy alta (>30-35), entonces el proceso de compostaje es más lento, perjudicando el alcance de las temperaturas requeridas. Con relaciones de C/N que dan como resultado un compostaje exitoso, las pérdidas de N generalmente son del rango del 10-50 % (Eklind y Kirchmann, 2000; Jönsson et al., 2003). Si la orina de la letrina y las heces son compostadas conjuntamente en lugar de únicamente las heces, entonces la entrada de N en la composta aumenta de 3-8 veces y la mayoría del N de la orina se pierde, ya que está básicamente en forma de amoníaco, que escapa fácilmente del compostaje aerobio.

La fracción principal (entre 90-95 %) del N en la composta final es N orgánico (Sonesson, 1996; Eklind y Kirchmann, 2000). Este N orgánico se vuelve disponible para las plantas solamente si es degradado adicionalmente en el suelo. El N remanente, 5-10 % del total, es amonio y nitrato, que están disponibles directamente para las plantas.

2.5.2.3. Almacenamiento

El almacenamiento en un estado seco al ambiente o a una temperatura mayor. La reducción de patógenos aumenta con el incremento de la temperatura ambiental (Moe e Izurieta, 2003). Si el nivel de humedad se mantiene bajo, >20 % durante todo el almacenamiento, entonces la degradación es baja y las pérdidas de N y materia orgánica también. Estas sustancias son conservadas y, después de la incorporación en el suelo y el humedecimiento, ellas son degradadas de la misma manera que el material en un compostaje mesofílico. Adicionalmente, puesto que la degradación tiene lugar en pequeños volúmenes en suelo húmedo con una planta sembrada, el riesgo de pérdida de amoníaco o pérdidas por lixiviados es virtualmente nulo.

2.5.2.4. Digestión

Los digestores son cerrados y todas las sustancias que entran salen de ellos, ya sea con el biogás y/o con los residuos de digestión. En la digestión, una gran parte de materia orgánica se degrada a biogás (metano y dióxido de carbono). Una gran cantidad de S orgánico es mineralizado de las proteínas y algo de ello deja el proceso como ácido sulfhídrico contaminando el biogás. Una gran porción del N orgánico es mineralizada de las proteínas y así el N de los residuos consiste en gran parte (50-70 %) de amonio (Berg, 2000), el remanente es N orgánico. El amonio está disponible directamente para las plantas y la disponibilidad de los otros nutrientes para las plantas es también buena.

2.5.2.5. Higienización química

La higienización de las heces puede ser alcanzada mezclándolas con urea. La urea es degradada a amonio por la ureasa que ocurre naturalmente en las heces. Por lo tanto, este proceso probablemente funciona mejor si las heces están en forma de lodo,

que puede ser mezclado. En el lodo, el equilibrio es establecido entre el amonio y el amoníaco. El amoníaco es tóxico para los microbios y la reducción de patógenos es muy buena en el proceso (Vinnerås et al., 2003b). Las adiciones de ceniza y cal que incrementan el pH durante el tratamiento primario por tanto se incrementa el efecto higienizante. Este tratamiento debe ser realizado en un contenedor cerrado. El proceso es similar al almacenamiento, en este no ocurre degradación de las heces y consecuentemente no se pierden ni materia orgánica ni N.

2.5.2.6. Vermicompostaje

El vermicompostaje o lombricompostaje es un proceso biotecnológico que permite degradar y estabilizar residuos orgánicos bajo condiciones aerobias y mesófilas mediante la acción de ciertas especies de lombrices de tierra capaces de alimentarse del residuo a la vez que aceleran su degradación microbiana. Así, en este proceso se aprovecha la capacidad detritívora de las lombrices, que ingieren, trituran y digieren el residuo orgánico, descomponiéndolo mediante la acción de sus enzimas digestivas y de la microflora aeróbica y anaeróbica presente en el interior de su intestino (Edwards, 1988).

Las especies de lombrices involucradas en el proceso son capaces de ingerir al día cantidades de residuos equivalentes al 50-100 % de su propio peso, dependiendo del tipo de residuo y la especie de lombriz empleada (Edwards y Bohlen, 1996; Garg et al., 2008; Riggle y Holmes, 1994). La digestión del residuo orgánico por la lombriz conlleva una alteración física ya que éste es fragmentado, reduciéndose su volumen hasta aproximadamente el 50 % (Sinha et al., 2010b), a la vez que aumenta su relación superficie-volumen; lo cual facilita la colonización microbiana del residuo excretado (Domínguez, 2004). El paso del residuo orgánico a través del intestino de la lombriz también altera su composición química de forma que se incrementa la concentración de nutrientes fácilmente asimilables para los microorganismos, los cuales proliferan rápidamente en el residuo recién excretado terminando su degradación (Parthasarathi y Ranganathan, 1999). Durante el proceso de vermicompostaje los residuos orgánicos se convierte en dos productos valiosos: fertilizante orgánico (Arancon et al., 2004; Atiyeh

et al., 2000) y la biomasa de lombriz, que puede ser utilizado como una fuente de proteína en la alimentación animal (Mitchell, 1997).

2.5.2.7. Solarización

La mayoría de los organismos nocivos del suelo tienen un carácter mesofílico, o sea resisten poco temperaturas por encima de 31-32 °C en el suelo, por lo que su eliminación es factible si se logra tales niveles térmicos en el suelo. El método de solarización, ensayado y propuesto por primera vez por Katan (1981) en Israel, es un proceso hidrotérmico que crea condiciones de altas temperaturas en el suelo, lo que resulta ideal principalmente en el período de pre-siembra o pre-plantación para controlar un buen número de plagas del suelo (insectos, patógenos, nematodos y malezas).

La técnica se basa en la utilización de una manta transparente de polietileno, la cual permite el paso de los rayos solares, que son absorbidos por el suelo húmedo. El éxito de la solarización dependerá de varios factores, pero lo esencial, según comunica DeVay (1991), es la humedad del suelo a fin de lograr un máximo de transferencia de calor sobre los organismos nocivos del suelo. El tiempo de solarización y la temperatura lograda en el suelo durante tal período son factores esenciales del éxito de este método.

2.6 Tratamiento higiénico de la orina

2.6.1 Tratamiento primario o in situ – orina

La orina es entubada del inodoro desviador de orina al contenedor de recolección. Debido a la acumulación de ureasa, se forman sedimentos donde la orina ha permanecido inmóvil por un tiempo. Este sedimento consiste de estruvita ($MgNH_3PO_4$) y apatita [$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$]. Es formado porque el pH de la orina aumenta a 9-9.3 debido a la degradación de la urea a amonio y a este pH alto las concentraciones iniciales de fosfato, magnesio, calcio y amonio ya no son solubles sino que se precipitan. Del P de la orina, el 30 % o más se transforma eventualmente en sedimentos (Jönsson et al., 2000; Udert et al., 2003).

Dado el caso de que los sedimentos sean manipulados y reutilizados con el resto de la orina, no se alteraran ni la cantidad, ni la disponibilidad de nutrientes. La concentración de P en el sedimento inferior puede ser más del doble que en el resto de la orina. Es así, que estos sedimentos pueden ser utilizados para cultivos con altas demandas de P o manipulados con el resto de la orina.

El pH alto de la orina en el tanque de recolección, normalmente 9-9.3, añadido a la alta concentración de amonio, significa que existe el riesgo de perder N en forma de amoníaco con la aireación. Sin embargo, estas pérdidas son fácilmente eliminadas al diseñar el sistema de tal manera que el tanque y las tuberías no sean ventilados, sino solamente la presión igualada. Esto también elimina el riesgo de malos olores del sistema de orina.

2.6.2 Tratamiento secundario o externo - orina

La orina contiene relativamente pocos patógenos y puede ser fácilmente desinfectados por el almacenamiento (Schönning et al., 2002). Este es un método de tratamiento secundario sencillo y económico. En el tanque de almacenamiento ocurren los mismos procesos que en el tanque de recolección. Mientras el tanque tenga una presión equilibrada y no sea ventilado, no se producirán pérdidas de nutrientes ni cambios en su disponibilidad.

La higienización que se da cuando la orina es almacenada por separado no puede ser confiable cuando la orina es almacenada conjuntamente con heces, puesto que las heces aumentan el número de patógenos, y la capacidad de amortiguamiento y la materia orgánica. Es así, que al mezclar la orina con las heces, esto aumenta simultáneamente la necesidad de higienización y reduce el efecto de higienización.

2.7 Experiencias con excretas y orina humana para uso agrícola

Se ha realizado diferentes labores sobre el compostaje de heces a bajas temperaturas (Morgan, 2003). En una serie de experimentos en Zimbabue, hortalizas como espinacas, lechugas, pimiento verde, tomates y cebollas fueron cultivadas en baldes de 10 litros con suelo local pobre, y su crecimiento fue comparado con plantas

cultivadas en contenedores similares llenos con una mezcla 50/50 (v/v) del mismo suelo con humus proveniente del co-compostaje de heces humanas y orina. Los resultados muestran un incremento marcado en la producción de hortalizas debido al mejoramiento del suelo pobre por efecto de la mezcla de heces y orina compostadas.

En Guatemala, tras el terremoto de 1976, el Centro Mesoamericano de Estudios sobre Tecnología Apropiada (CEMAT) desarrolló una tecnología sencilla de saneamiento rural, compatible con el reaprovechamiento agrícola (Cáceres, 1981; Strauss, 1986a), consistente en una variante del retrete vietnamita de doble pozo para preparación de abonos, que recibe el nombre de Letrina Abonera Seca Familiar (LASF). En estos depósitos, solo se recogen las heces y la orina se recoge aparte. Después de cada utilización, se añade ceniza de madera quemada en estufas. Cuando un depósito está lleno (por lo general, transcurridos entre 4 y 6 meses), se cierra y se pone en funcionamiento el segundo; cuando este último está lleno, se vacía el primero y se guarda su contenido para aplicarlo a la tierra inmediatamente antes de la siembra. La orina, después de diluirla con agua, se utiliza para regar las plantas. El contenido del depósito se transforma en una materia seca e inodora con un contenido en materia orgánica que varía entre 3 – 10 %, con un 0.3 – 1.1 % de nitrógeno total, 150-410 mg kg⁻¹ de fósforo total y 7000-7600 mg kg⁻¹ de potasio total; el pH es alto, debido a las grandes cantidades de ceniza añadidas, y se sitúa entre 9.8 y 11.2. Las cantidades de organismos coliformes son bastante pequeños, por lo general inferiores a 4000 por gramo (peso con agua), y hay 8500 huevos de helmintos por gramo, con una viabilidad de menos del 30 %. Se considera que esa calidad microbiológica permite la reutilización sin riesgos (Zandstra, 1986).

Se ha probado la orina como fertilizante en cultivos de amaranto en México (Clark, 2003). Los resultados demuestran que una combinación de orina y gallinaza da la mayor producción, 2350 kg ha⁻¹. La gallinaza sola da una producción de 1900 kg ha⁻¹. La orina humana aplicada sola genera una producción de 1500 kg ha⁻¹ y la muestra de control sin fertilizar dio una producción de 875 kg ha⁻¹. La cantidad de nitrógeno aplicada fue de 150 kg N ha⁻¹ en los tres ensayos. Un muestreo del suelo demostró que no existen diferencias entre los ensayos en lo que respecta a las características físicas o químicas.

En ensayos de campo en granjas orgánicas durante 1997-1999, la orina humana fue probada como fertilizante en granos de primavera y trigo de invierno (Lundström y Lindén, 2001). Para el trigo de invierno, las aplicaciones de orina se realizaron en la primavera en el cultivo en crecimiento. Se realizó una comparación con gallinaza seca y carne + harina de huesos. La orina humana correspondiente a 40, 80 y 120 kg N ha⁻¹ aumentó la producción de grano de trigo de invierno en un promedio de 750, 1500 y 2000 kg ha⁻¹, respectivamente. La gallinaza seca produjo un incremento en la producción de, en promedio, alrededor de 600, 1100 y 1500 kg ha⁻¹, respectivamente. La carne seca + harina de huesos ocasionaron el menor incremento en la producción, alrededor de 400, 800 y 1200 kg ha⁻¹, respectivamente. En promedio para los tres niveles de fertilización de N, el incremento de la producción del trigo de invierno fue 18 kg de grano por kg de N para la orina humana, 14 kg para la gallinaza seca y 10 kg para la carne + harina de huesos. Estos datos muestran que la disponibilidad de N en la orina para las plantas es mayor que en la gallinaza y en la carne + harina de huesos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación

El presente trabajo de investigación fue realizado en el Invernadero de Fertilidad de Suelos, de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), la cual se encuentra a 12°4'58" Latitud Sur, 76°57' Longitud Oeste y una altitud de 244 m.s.n.m.

El promedio de temperaturas máximas y mínimas anuales es 24 y 16 °C respectivamente. La precipitación acumulada anual es 23 mm aproximadamente.

3.2 Cultivo indicador

El cultivo indicador fue el siguiente:

Maíz (*Zea mays*) híbrido PM 213: Variedad de buenas características agronómicas, periodo vegetativo corto, recomendada para su siembra de enero a marzo y con buen comportamiento frente a factores abióticos y bióticos. Este híbrido fue seleccionado debido a su crecimiento rápido y por ser exigente en agua y nutrientes, lo cual lo hace adecuado para ensayos de disponibilidad de nutrientes a partir de fuentes orgánicas.

3.3 Suelo

El suelo empleado para el ensayo, fue colectado de la capa arable de una parcela agrícola ubicada en el campo "Santa Teresa" del campus de la UNALM. El suelo presenta una textura franco arenoso con presencia moderada de fragmentos gruesos. Es de reacción alcalina, ligeramente salino, y con un contenido bajo de materia orgánica. El contenido de fósforo disponible es alto, en tanto que el potasio tiene una disponibilidad media. La capacidad de intercambio catiónico del suelo es baja, con contenido alto de calcio, bajo de magnesio, medio de potasio y bajo de sodio cambiabiles. Las propiedades físicas y químicas del suelo, determinadas mediante el análisis de caracterización, se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5: Características físicas y químicas del suelo empleado en las macetas

Característica	Unidad	Valor	Clasificación
Arena	%	64	--
Limo	%	22	--
Arcilla	%	14	--
Clase textural	--	--	Franco arenoso
pH _(1:1)	--	7.69	Ligeramente alcalino
CE _(1:1)	dS m ⁻¹	1.17	Ligeramente salino
CaCO ₃	%	3.20	Medio
Materia orgánica	%	1.41	Bajo
Fósforo disponible	mg kg ⁻¹	20.3	Alto
Potasio disponible	mg kg ⁻¹	133	Medio
CIC	cmol _c kg ⁻¹	9.92	Baja
Ca ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	8.41	Alto
Mg ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	0.85	Bajo
K ⁺	cmol _c kg ⁻¹	0.39	Medio
Na ⁺	cmol _c kg ⁻¹	0.27	Bajo
Al ³⁺ + H ⁺	cmol _c kg ⁻¹	0.00	--
PSB	%	100.0	Elevado

Fuente: LASPAF-UNALM, 2013

3.4 Materiales

3.4.1 Fase de invernadero

- 35 macetas de plástico con capacidad de 3 kg.
- Semillas de maíz
- Papel filtro.
- Tamiz de malla de cobre de 4 mm.
- Tijera de podar.
- Regla graduada o cinta métrica.
- Recipientes graduados de plástico.

- Balanzas mecánica y electrónica.
- Etiquetas adhesivas.
- Bolsas de papel reciclado.
- Cilindro metálico de 5 cm de altura por 5 cm de diámetro.
- Guantes quirúrgicos.
- Mascarillas.
- Cajas de plástico.
- Cámara fotográfica.

3.4.2 Fase de laboratorio

- Balanza electrónica.
- Pipeta.
- Conductivimetro digital.
- Peachimetro digital.
- Embudos.
- Tubos de ensayo.
- Erlenmeyer.

3.5 Descripción de los residuos orgánicos ensayados

En el presente ensayo fueron empleados los siguientes residuos orgánicos tratados:

3.5.1 Excreta procedente de un baño ecológico portátil

La excreta humana compostada fue provista por la empresa “Xrunner” la cual ofrece el servicio de recolección y tratamiento de las excretas. El tiempo de llenado del baño ecológico seco portátil fue de dos semanas aproximadamente y el material secante utilizado fue aserrín, para asegurar la higienización del material orgánico se realiza el

proceso de compostaje ya que el proceso de secado durante el tiempo de llenado de las excretas no es el adecuado.

El material orgánico contiene compuestos solubles los cuales se descomponen entre 2 a 3 días, luego pasan por una etapa termofílica que dura entre 2 a 3 meses, asimismo se realizan los volteos una vez por semana de las pilas que tienen más de 3 semanas, se riega y se coloca en el centro un tubo con agujeros para una mejor oxigenación, en el proceso se pueden alcanzar temperaturas de hasta 70 °C, asegurándose la destrucción de patógenos. Luego de esta etapa la temperatura va disminuyendo y finalmente entra a una etapa de curado por 4 semanas donde la humedad del compost disminuye.

Por lo general se agrega una cantidad de estiércol de vacuno y de hojas secas para obtener una relación C/N adecuada para el compostaje, durante todo el proceso se redujeron los virus y parásitos peligrosos, obteniendo un material orgánico seguro.

3.5.2 Excreta procedente del baño ecológico de la UNALM

La excreta procedente del baño ecológico seco público instalado en la puerta de ingreso vehicular de la UNALM, fue llenada en 6 meses en una cámara de 500 litros, el material secante usado fue aserrín. La excreta fue separada en dos partes y puestas en cajas de plástico, una de ellas recibió tratamiento de vermicompostaje donde se incorporó 0.5 kg de lombrices rojas californianas *Eisenia foetida*, una especie de lombriz que puede llegar a ingerir hasta el 90% de su propio peso, de esta manera se acelero el proceso de descomposición, las lombrices estuvieron por 60 días dentro del material orgánico. En tanto que la segunda parte fue almacenada durante ese tiempo. Posteriormente ambas partes fueron asimismo divididas en dos partes, las cuales recibieron:

- Solarización por 10 días incorporando 3 litros de agua.
- Solarización por 10 días incorporando 3 litros de orina fermentada como medio alcalinizante.

Para el caso del material sin tratamiento de vermicompostaje, se tuvo que adicionar 5 litros de agua, ya que la humedad era muy baja; esto se hizo con el fin de tener una humedad parecida a la otra parte tratada con vermicompostaje.

Con esta combinación resultaron cuatro residuos procesados (Cuadro 6).

Cuadro 6: Procesos externos, valores de pH y temperatura (°C) luego de la solarización de las excretas procedentes del baño ecológico de la UNALM.

Procesos externos	pH	Temperatura (°C)
Almacenamiento (2 meses) + solarización con agua	8.3	39.1
Almacenamiento (2 meses) + solarización con orina	8.5	37.3
Vermicompostaje + solarización con agua	7.8	36.5
Vermicompostaje + solarización con orina	8.2	34.2

3.5.3 Excreta procedente de un baño ecológico familiar

La excreta procedente de un baño ecológico seco ubicado en San Juan de Miraflores, fue llenada en un baño de doble cámara de aproximadamente 500 litros de capacidad cada una, por un periodo de 12 meses y luego fue secada durante otros 12 meses. Después de cada uso del baño ecológico se uso como material secante aserrín para acelerar la deshidratación, estas excretas solo pasaron por el proceso *in situ* de llenado y secado dentro del mismo baño ecológico, usándose directamente en las macetas sin pasar por ningún proceso externo.

En los tres tipos de baños ecológicos secos (portátil, público y familiar) se uso el mismo material secante que fue aserrín; luego de que los residuos orgánicos ensayados pasaron por los procesos anteriormente mencionados, se tomaron muestras las cuales fueron llevadas al laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la UNALM (LASPAF-UNALM) para su respectivo análisis, los resultados se muestran en el cuadro 7.

Cuadro 7: Características fisicoquímico de los residuos orgánicos ensayados

Característica	Unidad	Vermicompost	6 Meses	Maduro	Xrunner
pH	--	6.7	6.6	6.6	6.7
CE	dS m ⁻¹	9.3	4.6	6.4	8.7
Materia orgánica	%	66.2	57.0	83.3	19.1
Humedad	%	75.2	22.5	22.5	8.4
N	%	1.9	1.3	1.7	0.5
P ₂ O ₅	%	2.8	0.8	1.6	0.7
K ₂ O	%	1.6	0.6	0.9	0.7
CaO	%	5.2	3.7	2.2	2.9
MgO	%	1.1	0.7	0.6	0.9
Na	%	0.4	0.3	0.4	0.3

Fuente: LASPAF-UNALM, 2012

El análisis químico efectuado en la orina utilizada en el proceso de solarización se detalla en el cuadro 8. Puede asumirse que los nutrientes contenidos en la orina enriquecieron las excretas procesadas en las que ésta última fue empleada.

Cuadro 8: Características de la orina utilizada en el proceso de solarización

Característica	Unidad	Orina
Nitrógeno (N)	mg L ⁻¹	4956.0
Fósforo (P ₂ O ₅)	mg L ⁻¹	337.2
Potasio (K ₂ O)	mg L ⁻¹	1003.0

Fuente: LASPAF-UNALM, 2012

Los diferentes residuos orgánicos procedentes de baños secos portátiles, públicos (UNALM) y familiares, pasaron por los procesos *in situ* y externos descritos anteriormente, resultando los siguientes tratamientos como se muestra Figura 1.

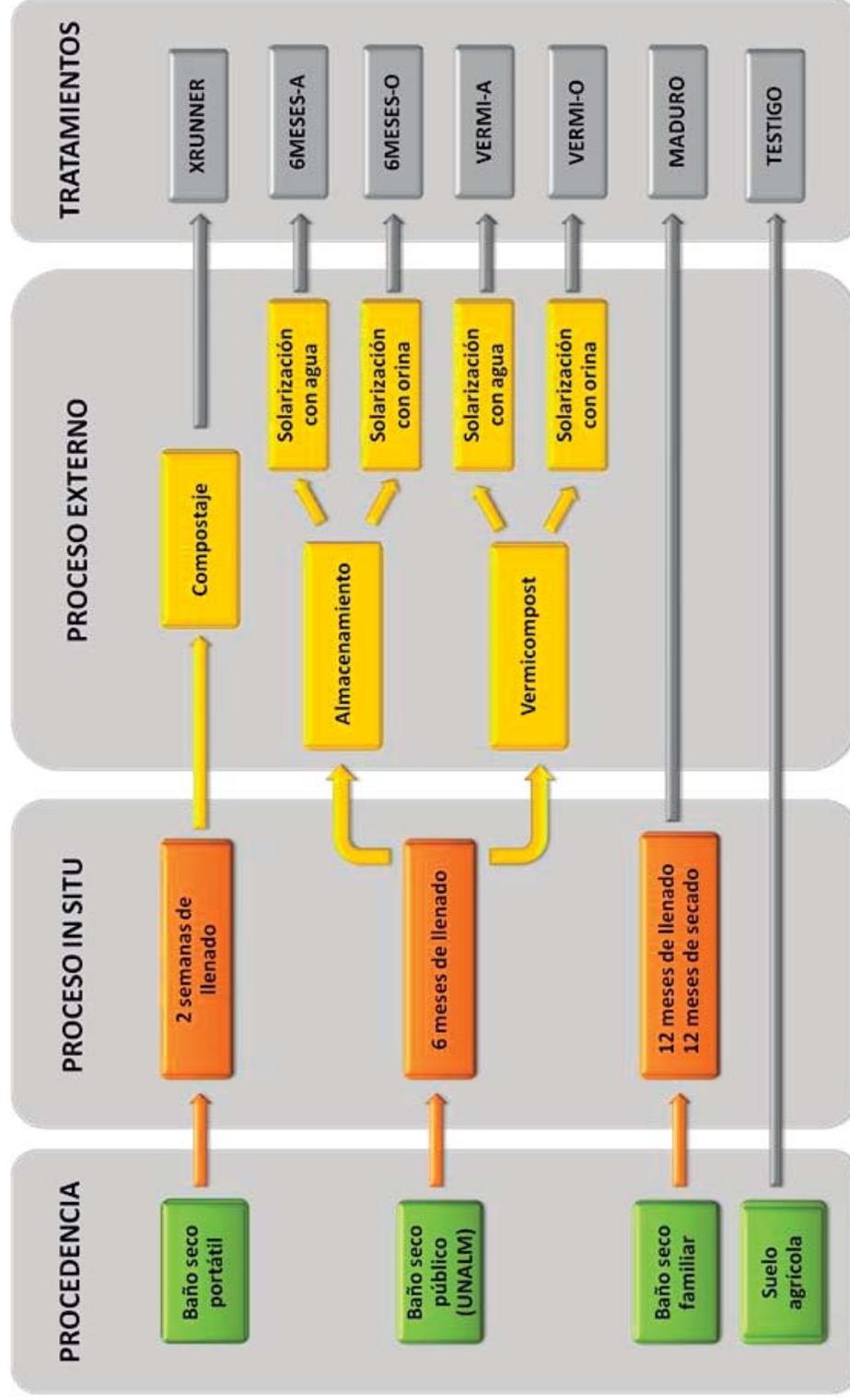


Figura 1: Tratamientos ensayados detallando los procesos *in situ* y externos aplicados a los residuos orgánicos.

3.6 Metodología y procedimiento

3.6.1 Colecta, preparación y muestreo del suelo

El suelo fue colectado del campo agrícola “Santa Teresa” ubicado en el campus de la UNALM en el mes de diciembre del 2012, previo a la colecta el suelo fue muestreado para obtener una muestra compuesta de 1 kg de peso de los primeros 20 cm de la capa arable el cual fue llevado al laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la UNALM (LASPAF-UNALM) para su respectivo análisis, el suelo fue colectado empleando palas y sacos de polipropileno, secado al aire por 5 días, tamizado en malla de 4 mm de diámetro para obtener tierra fina seca al aire (TFSA) posteriormente fue ensacado y llevado al laboratorio.

Para determinar la cantidad de suelo seco a estufa a ser colocado en cada maceta, el contenido de humedad en la TFSA fue calculado usando la fórmula:

$$\% Hum = \left(\frac{pesohúmedo - peso seco}{peso seco} \right) * 100$$

Dado que el contenido de humedad en la TFSA fue calculado en 6.44 %, entonces se emplearon 2.89 kg de TFSA, para tener 2.70 kg de suelo seco a estufa en cada maceta.

3.6.2 Preparación de las macetas

Las 35 macetas de plástico fueron lavadas y secadas al aire por 2 a 3 horas, esterilizadas con alcohol y nuevamente secadas al aire. Una vez rotuladas, un círculo de papel toalla fue colocado en la base de cada maceta y éstas fueron llenadas con 2.89 kg de TFSA para un volumen de suelo suficiente para incorporar las fuentes orgánicas.

3.6.3 Aplicación del material orgánico

Cada maceta fue llenada con 3 kg de peso seco total, de los cuales 2.7 kg correspondieron a suelo seco a estufa y 0.3 kg (equivalentes al 10 % del peso total) correspondieron al peso seco del material orgánico ensayado.

El peso fresco de cada material orgánico fue obtenido a partir de sus respectivos contenidos porcentaje de humedad, como se muestra en el Cuadro 9.

Cuadro 9: Porcentaje de humedad y peso húmedo del material orgánico

Fuente orgánica	% Humedad	Peso húmedo (g)
Compostaje de "Xrunner"	5.0	316
6 meses llenado + almacenamiento + solarización con agua	64.6	846
6 meses llenado + almacenamiento + solarización con orina	62.5	800
6 meses llenado + vermicompostaje + solarización con agua	77.7	1344
6 meses llenado + vermicompostaje + solarización con orina	77.7	1344
12 meses llenado + 12 meses secado	17.2	362

Los materiales orgánicos fueron mezclados homogéneamente con la TFSA y luego incorporados a las macetas. Posteriormente fueron sometidos a un periodo de incubación por 15 días aplicando riego constante.

3.6.4 Conducción del experimento

La siembra de maíz fue realizada en enero del 2013. La mezcla de sustratos fue humedecida hasta alcanzar capacidad de campo. Posteriormente, cinco semillas fueron colocadas en cada maceta. Cinco días después de la germinación, las plántulas fueron desahijadas dejando dos plántulas vigorosas por maceta.

Las macetas fueron regadas durante todo el desarrollo del cultivo (60 días). Los riegos fueron frecuentes con volúmenes variables de agua manteniendo al suelo a capacidad de campo. En el ensayo no se realizó ningún tipo de fertilización química. La cosecha de maíz fue realizada en marzo del 2013.

3.7 Parámetros evaluados

3.7.1 Altura de planta

La altura final de planta fue medida con una regla métrica, desde la superficie del suelo hasta la hoja más larga estirada.

3.7.2 Determinación de área foliar

Al momento de la cosecha, las dos plantas de cada maceta fueron cortadas desde la base con una tijera de podar. Para la determinación del área foliar de las plantas de maíz, las hojas de cada planta fueron extraídas y extendidas sobre una mesa, donde se midió el largo desde la base hasta el ápice y el ancho máximo de la hoja. El área foliar en maíz fue estimada mediante la fórmula de Montgomery:

$$Af = \sum^n (L * Am * 0.75)$$

Donde:

L = largo de la hoja desde la base hasta el ápice.

Am = ancho máximo de la hoja

n = número de hojas de la planta.

3.7.3 Pesos fresco y seco de la parte aérea

Luego de la determinación del área foliar, los tejidos aéreos de las plantas fueron picados y colocados en bolsas de papel previamente pesadas y rotuladas, para determinar el peso fresco.

Las bolsas con material vegetal fueron colocadas en una estufa a 70 °C hasta obtener el peso constante para determinar el peso seco.

3.7.4 Extracción de nitrógeno por la planta

La parte aérea de las plantas de maíz, fue sometida a análisis químico para la determinación del contenido de nitrógeno. Para ello, porciones de materia seca de follaje fueron molidas y homogenizadas. El contenido de nitrógeno fue determinado mediante el método Kjeldahl. Muestras de 0.1 g de materia seca pulverizada fueron introducidas en un balón y digerida en presencia de 3 ml de H₂SO₄ concentrado y 0.2 g de catalizador. Luego de la digestión la muestra fue destilada con NaOH al 50 % y el NH₃ desprendido fue capturado en la solución de ácido bórico al 2 %. Esta solución fue finalmente titulada con H₂SO₄ 0.02 N. El cálculo para la obtención del nitrógeno es el siguiente:

$$N(\%) = \frac{G * C * 14 * 100}{W}$$

Donde:

G= gasto de ácido sulfúrico (L)

C= normalidad exacta del ácido sulfúrico

W= peso de la muestra (g)

La determinación de nitrógeno en plantas de maíz fue realizada en abril del 2013. Los contenidos de nitrógeno obtenidos fueron empleados para calcular la remoción parcial del follaje.

3.7.5 Determinación de la densidad aparente y contenido de humedad en suelo

La determinación de la densidad aparente fue realizada mediante el método del cilindro. Una muestra de suelo húmedo a capacidad de campo fue tomada de cada maceta empleando un cilindro metálico de 98.17 cm³ de volumen. El suelo extraído con el cilindro fue pesado en húmedo, secado a estufa a 105 °C por 48 horas y luego vuelto

a pesar obteniéndose el peso seco del suelo. La densidad aparente (g cm^{-3}) fue obtenida dividiendo la masa del suelo seco a estufa sobre el volumen del cilindro.

El contenido de humedad de cada muestra de suelo obtenida anteriormente fue determinado por la pérdida en peso (agua) expresada en porcentaje sobre la base de peso seco, mediante la siguiente fórmula:

$$\% Hum = \left(\frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \right) * 100$$

3.7.6 Determinación de conductividad eléctrica y pH

Porciones de suelo de cada maceta fueron secadas al aire y molidas finamente. Una muestra de 50 g de suelo fue colocada en un vaso de precipitados, se agregó agua destilada gradualmente y se mezcló con ayuda de una espátula hasta formar una pasta saturada que fluía lentamente por las paredes del vaso. La pasta saturada fue vertida en un embudo de filtración, el extracto acuoso o filtrado fue recibido en un frasco. La conductividad eléctrica (dS m^{-1}) fue leída en los extractos empleando un conductivímetro digital YSI (*Yellow Spring Instruments*)®.

El pH del suelo fue determinado en agua, empleando una relación 1:1 de suelo/agua. Para ello, 30 g de suelo fueron colocados en un vaso de precipitados. Se agregaron 30 ml de agua destilada, se agitó la mezcla por 20 minutos y posteriormente se dejó en reposo por unos minutos. La lectura fue realizada empleando un potenciómetro digital *Consort 600*®.

3.7.7 Carbono orgánico y nitrógeno total en suelo

Muestras separadas de TFSA, fueron llevadas al laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la UNALM (LASPAF-UNALM) y analizadas en su contenido de carbono orgánico total por el método de Walkley y Black, cuyo principio se basa en la oxidación del carbono orgánico por una mezcla oxidante de dicromato de potasio y ácido sulfúrico.

El contenido de nitrógeno total del suelo fue determinado por el procedimiento de Kjeldahl. Mediante la digestión ácida se efectuó la transformación del nitrógeno orgánico a mineral (mineralización) y posteriormente se cuantificó el contenido total en forma de nitrógeno mineral. A partir de los valores obtenidos, se calculó la relación C/N en el suelo al final de la segunda campaña.

3.8 Análisis estadístico

Para el cultivo de maíz se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) simple, en el cual existen 7 tratamientos con 5 repeticiones.

El modelo aditivo lineal es el siguiente:

$$Y(ij) = \mu + t_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

$i = 1, 2, 3, \dots, t$ (número de tratamientos)

$j = 1, 2, 3, \dots, r_i$ (número de repeticiones en el i -ésimo tratamiento)

$Y(ij)$ = Valor observado de la unidad experimental j -ésimo a lo cual se aplicó el i -ésimo tratamiento.

μ = Efecto de la media general.

T_i = Efecto del i -ésimo tratamiento.

ϵ_{ij} = Efecto del error experimental al cual se aplicó el tratamiento i , en la repetición j .

La distribución de grados de libertad, suma de cuadrados y cuadrado medio para cada fuente de variación puede apreciarse en el Cuadro 10.

Cuadro 10: Distribución de grados de libertad, suma de cuadrados y cuadrado medio por fuente de variación.

Fuente de variación	Grados de libertad (G.L)	Suma de cuadrados (S.C)	Cuadrado medio (C.M)
Tratamiento	T – 1	S.C. tratamientos	C.M tratamientos
Error	T(R – 1)	S.C. error	C.M error
Totales	TR – 1	S.C. total	-----

$$r_0 = r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_t$$

Los datos obtenidos fueron sometidos al análisis de variancia (ANVA) con un nivel de significación de 0.05. Los promedios fueron comparados mediante la prueba de comparación de medias HSD Tukey. Para el análisis estadístico se empleó el paquete *Agricolae* del ambiente de proceso estadístico R, versión 3.0.1 (R Core Team, 2013).

IV. RESULTADOS

4.1 Resultados en el cultivo de maíz

El análisis de varianza demostró que los tratamientos aplicados produjeron efectos significativamente diferentes sobre las variables de altura, área foliar, peso fresco y seco, y nitrógeno extraído. Las medias de los tratamientos y sus diferencias estadísticas según la prueba de Tukey se presentan en el cuadro 11.

Según la prueba de comparación de medias, el tratamiento Maduro género mayores valores en altura de planta (Figura 2); siendo estadísticamente superiores a las plantas de los demás tratamientos. El tratamiento Vermi-A no causó incremento en altura de planta y el tratamiento 6 Meses-A no muestra valores significativamente diferentes con respecto a las plantas del testigo.

En área foliar (Figura 3), el tratamiento Maduro género mayor producción de área, siendo estadísticamente superior a las plantas de los demás tratamientos. El tratamiento Vermi-A no causó incremento en área foliar de planta y los tratamientos Vermi-O, Xrunner y 6 Meses-A no mostraron valores significativamente diferentes con respecto a las plantas del testigo, el cual presentó un valor de 1311.5 cm² maceta⁻¹.

En peso fresco (Figura 4) y seco (Figura 5), el tratamiento Maduro género mayor producción de biomasa, siendo estadísticamente superior a las plantas de los demás tratamientos. El tratamiento Vermi-A no causó incremento en el peso fresco y seco de planta y los tratamientos 6 Meses-A y Xrunner no mostraron valores significativamente diferentes con respecto al testigo, el cual presentó un valor de 52.6 y 12.5 g maceta⁻¹.

El mayor nivel de extracción de N (Figura 6) en la biomasa aérea de maíz fue originado en el tratamiento Maduro, siendo estadísticamente superior a las plantas de los demás tratamientos. El tratamiento Vermi-A no causó incremento en la extracción de N en la biomasa aérea de planta y los tratamientos 6 Meses-O, Xrunner y 6 Meses-A no mostraron valores significativamente diferentes con respecto a las plantas del testigo, el cual presentó un valor de 112.8 mg maceta⁻¹.

Cuadro 11: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre la altura, área foliar, peso fresco, seco y la extracción de nitrógeno de plantas de maíz

Tratamiento	Altura de planta (cm)	Área foliar (cm ² maceta ⁻¹)	Peso (g maceta ⁻¹)		N extraído (mg maceta ⁻¹)
			Fresco	Seco	
Xrunner	85.3 bc	1676.0 bc	81.4 bcd	17.9 bcd	177.3 bc
6 Meses-A	78.9 cd	1398.8 cd	64.6 cde	13.4 cde	119.2 cd
6 Meses-O	97.1 b	2108.4 b	106.5 b	23.4 b	183.3 bc
Vermi-A	59.8 e	877.4 d	40.5 e	8.0 e	61.9 d
Vermi-O	87.8 bc	1844.2 bc	93.4 bc	20.8 bc	245.2 ab
Maduro	113.3 a	2907.6 a	154.9 a	34.4 a	290.2 a
Testigo	71.4 de	1311.5 cd	52.6 de	12.5 de	112.8 cd
Pr(>F)	1.48e ⁻¹² ***	1.57e ⁻⁰⁸ ***	3.14e ⁻⁰⁹ ***	1.02e ⁻⁰⁹ ***	6.35e ⁻⁰⁶ ***
C.V. (%)	7.18	19.68	21.99	21.57	18.78

Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes a ($P < 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.

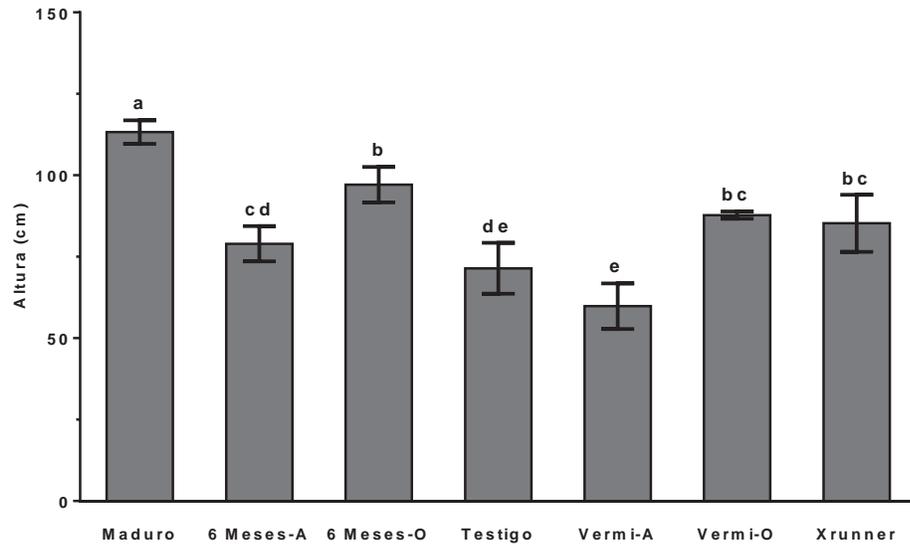


Figura 2: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre la altura de plantas de maíz

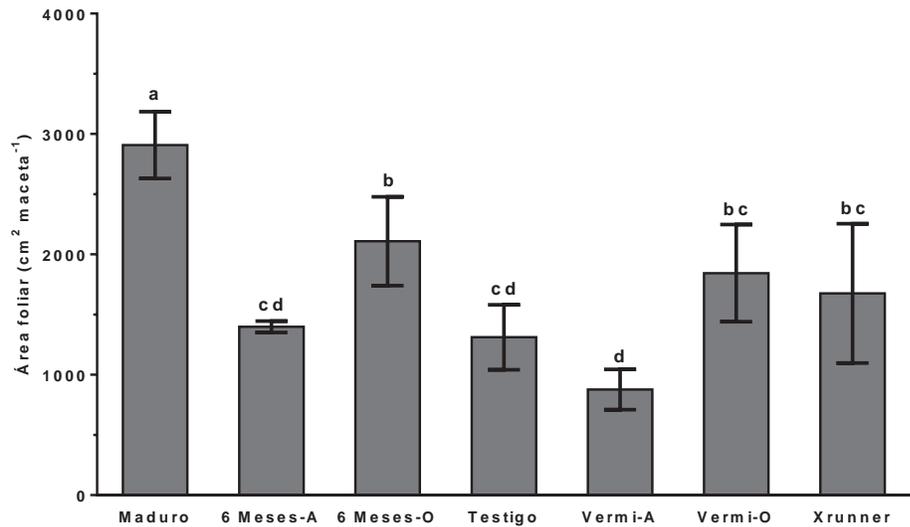


Figura 3: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre el área foliar de plantas de maíz

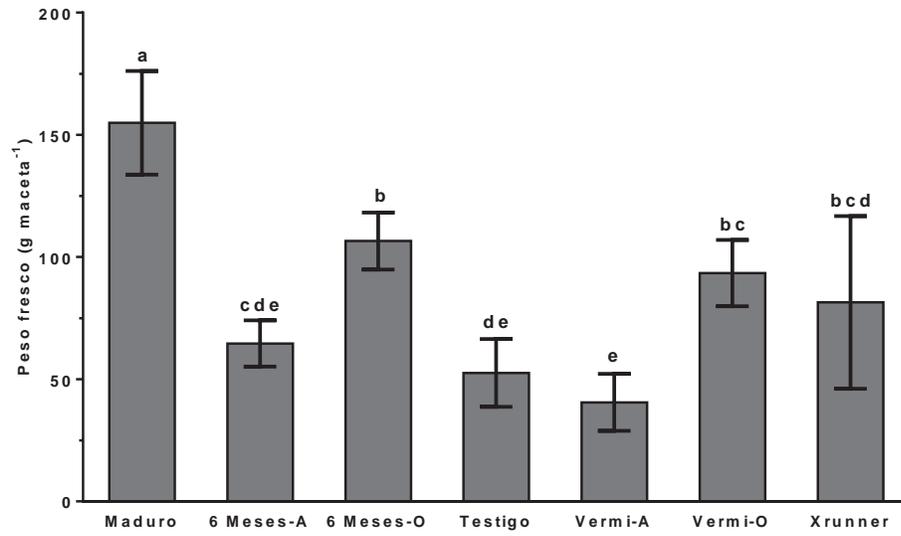


Figura 4: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre el peso fresco de plantas de maíz

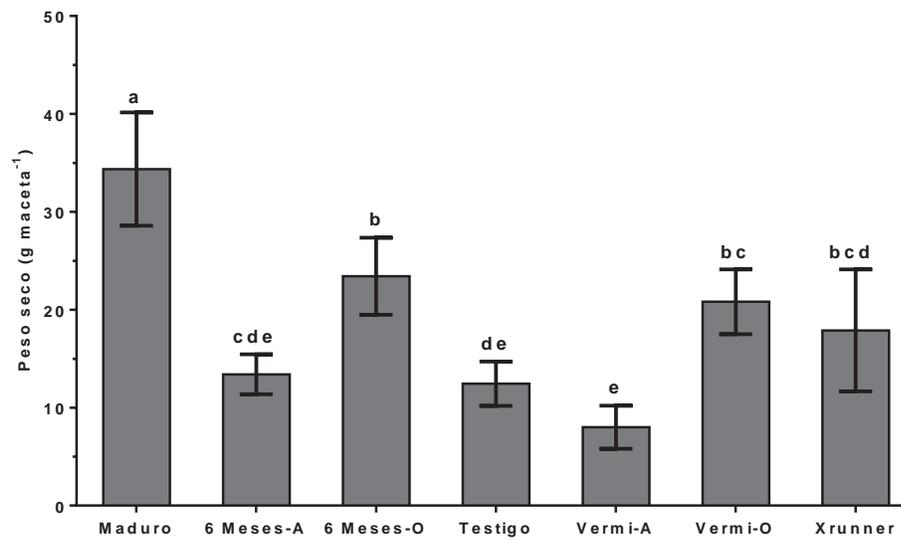


Figura 5: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre el peso seco de plantas de maíz

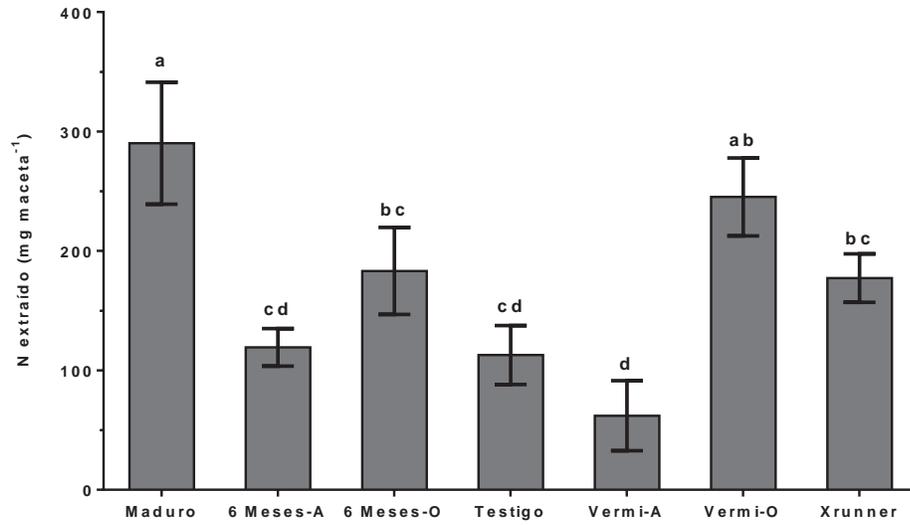


Figura 6: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre la extracción de nitrógeno de plantas de maíz

4.2 Resultados en el suelo

El análisis de varianza demostró que los tratamientos aplicados produjeron efectos significativamente diferentes sobre las variables de humedad gravimétrica, densidad aparente, conductividad eléctrica, carbono orgánico total y nitrógeno total, excepto para el pH. Las medias de los tratamientos y sus diferencias estadísticas según la prueba de Tukey se presentan en el cuadro 12.

Según la prueba de comparación de medias, el tratamiento 6 Meses-A generó mayores valores para el porcentaje de humedad gravimétrica en suelo (Figura 7); siendo estadísticamente superiores a los demás tratamientos. El tratamiento Xrunner no muestra valores significativamente diferentes con respecto al suelo del testigo, el cual presentó un valor de 18.8 %.

Todas las fuentes orgánicas aplicadas redujeron la densidad aparente del suelo siendo estadísticamente significativa con respecto al tratamiento testigo (Figura 8), el cual obtuvo un valor de 1.47 g cm^{-3} . Los valores más bajos en densidad se obtuvieron de los tratamientos 6 Meses-A, 6 Meses-O y Maduro con 1.05 , 1.07 y 1.05 g cm^{-3} , respectivamente.

En el pH de suelo (Figura 9) no se observó diferencias significativas entre los diferentes tratamientos.

En la conductividad eléctrica de suelo (Figura 10), el tratamiento 6 Meses-O obtuvo un valor de 2.70 dS m^{-1} , siendo estadísticamente superior a los demás. El suelo del testigo presentó un valor de 1.0 dS m^{-1} .

Con respecto al carbono orgánico total (Figura 11) y nitrógeno total de suelo (Figura 12), el tratamiento Maduro obtuvo el mayor porcentaje, siendo estadísticamente superior a los demás. El tratamiento Xrunner no causó un incremento significativo sobre el carbono orgánico total y nitrógeno total de suelo con respecto al testigo, el cual presentó un valor de 1.1 % y 0.09 % respectivamente.

Cuadro 12: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre la humedad gravimétrica, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N en el suelo

Tratamiento	Humedad gravimétrica (%)	Densidad aparente (g cm ⁻³)	pH	CE (dS m ⁻¹)	Carbono orgánico total (%)	Nitrógeno total (%)	Relación C/N
Xrunner	23.1 de	1.26 b	7.9 a	1.8 ab	1.5 c	0.15 bc	10
6 Meses-A	40.7 a	1.05 d	7.8 a	1.3 b	2.5 b	0.18 b	13.9
6 Meses-O	37.5 ab	1.07 d	7.9 a	2.7 a	2.6 b	0.19 b	13.7
Vermi-A	28.6 cd	1.18 bc	7.9 a	1.4 ab	2.2 b	0.17 b	12.9
Vermi-O	31.8 bc	1.13 cd	7.9 a	1.3 b	2.7 b	0.20 b	13.5
Maduro	33.4 abc	1.05 d	7.6 a	1.9 ab	3.7 a	0.35 a	10.6
Testigo	18.8 e	1.47 a	7.6 a	1.0 b	1.1 c	0.09 c	12.2
Pr(>F)	2.06e ⁻⁰⁷ ***	1.03e ⁻¹¹ ***	0.716	0.00975 **	2.02e ⁻¹⁰ ***	1.13e ⁻¹⁰ ***	---
C.V. (%)	11.72	3.53	4.71	36.44	11.40	14.54	---

Los valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0.05$), según la prueba de comparación de medias HSD de Tukey.

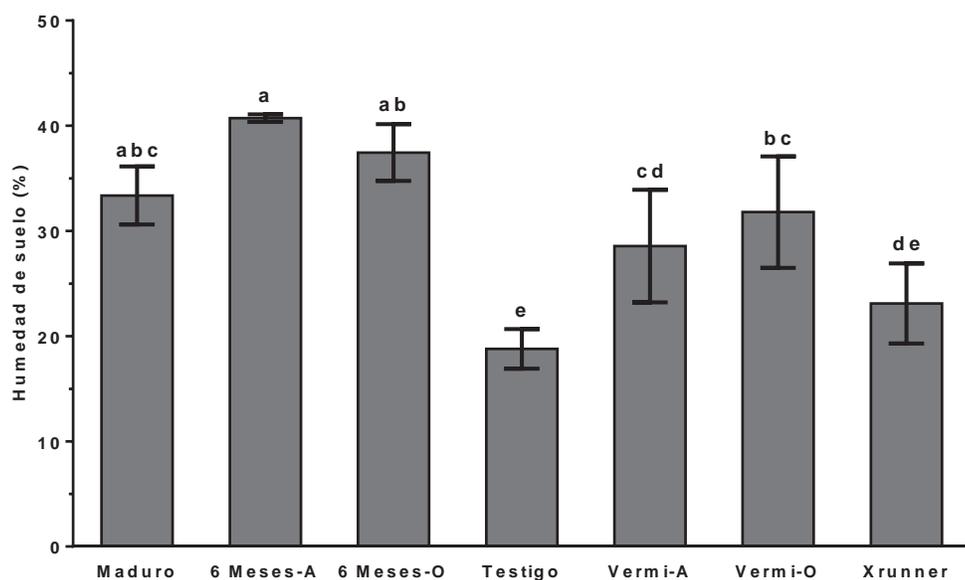


Figura 7: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre la humedad gravimétrica en el suelo

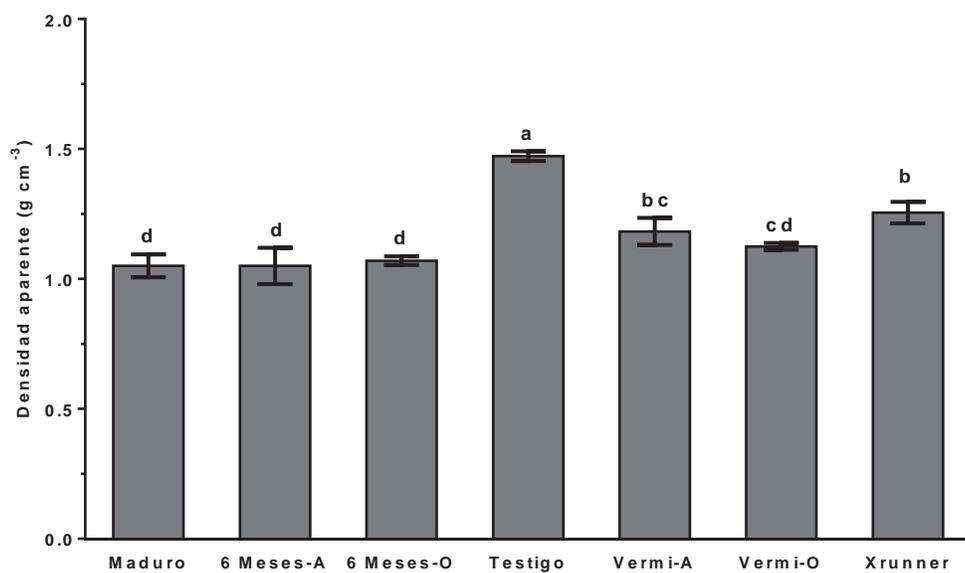


Figura 8: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre la densidad aparente en el suelo

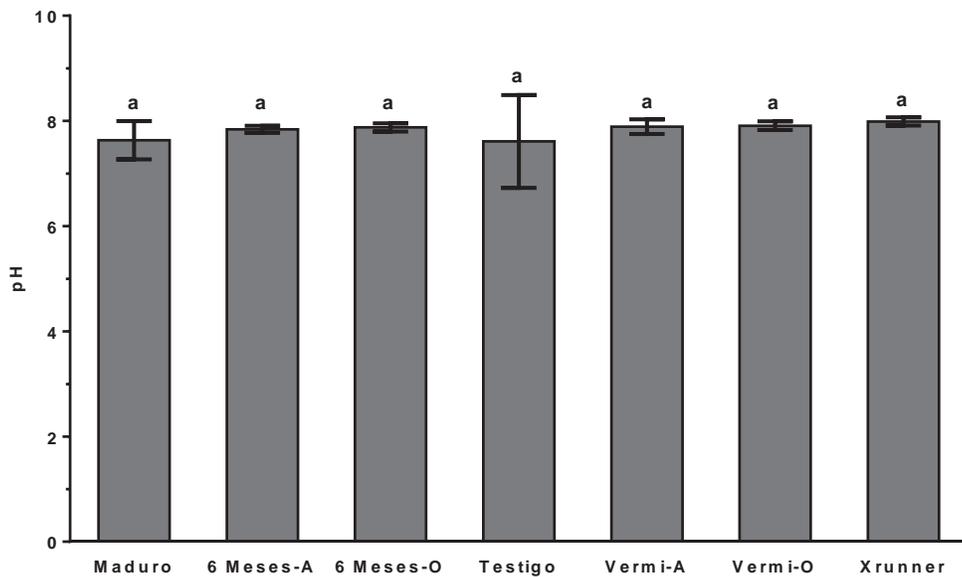


Figura 9: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre el pH en el suelo

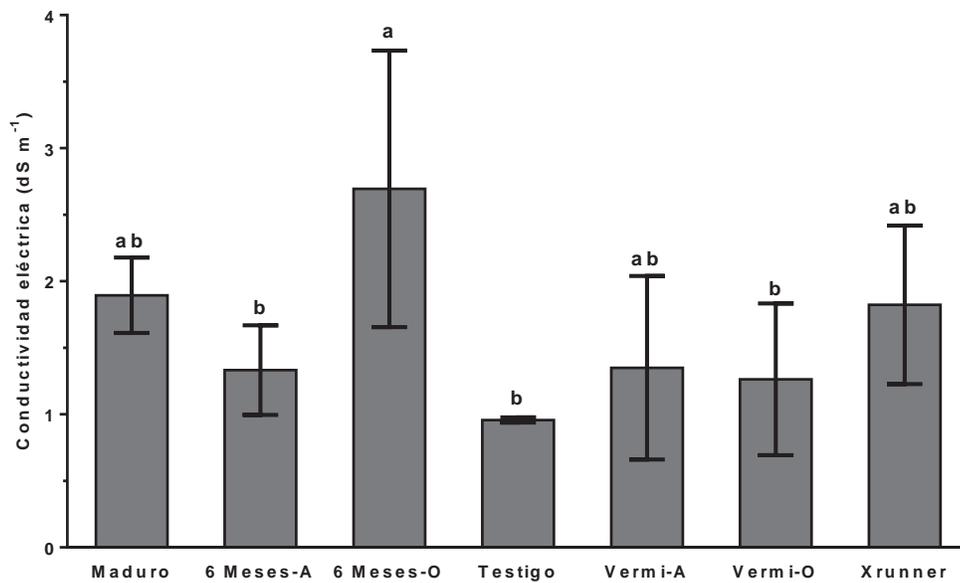


Figura 10: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre la conductividad eléctrica en el suelo

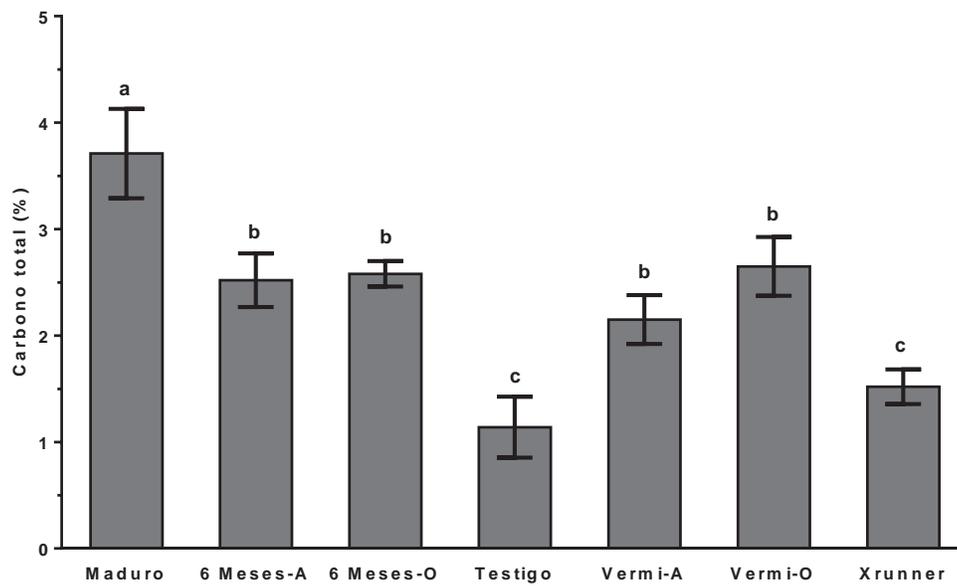


Figura 11: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre el contenido de carbono orgánico total en el suelo

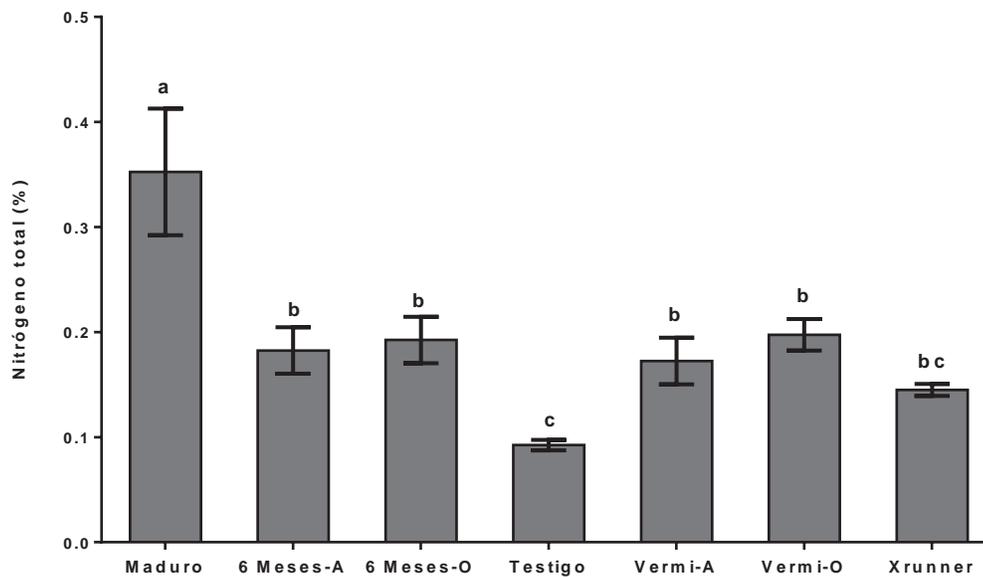


Figura 12: Efecto de la aplicación de excretas humanas sometidas a seis diferentes procesos sobre el contenido de nitrógeno total en el suelo

V. DISCUSIÓN

En la presente investigación, el uso de excretas humanas procesadas produjo efectos significativos para todas las variables biométricas evaluadas como altura de planta, área foliar, peso fresco y seco, y nitrógeno extraído para el cultivo indicador (maíz). También se produjo efectos significativos para las variables evaluadas en el suelo como porcentaje de humedad gravimétrica, densidad aparente, conductividad eléctrica, carbono orgánico total y nitrógeno total, con la excepción para el pH donde no hubo diferencia significativa.

Para el cultivo de maíz, el tratamiento Maduro obtuvo los mejores resultados para todas las variables evaluadas en planta, a pesar de ser el tercer tratamiento con el mayor contenido de nutrientes (Cuadro 13) por debajo de los tratamientos sometidos a vermicompostaje. Este efecto fue favorecido por el alto contenido de materia orgánica 83.31 % del tratamiento Maduro mejorando la capacidad de intercambio catiónico y regulando la humedad, de esta manera su fertilidad mejoro significativamente; por otro lado este material orgánico tuvo un tiempo de 12 meses de llenado y 12 meses de secado, obteniendo un alto grado de mineralización permitiendo que los nutrientes sean fácilmente asimilados por las plantas de maíz. El área folia es un parámetro muy importante, según (Kozlowsky et al., 1991; Leopold y Kriedemann, 1975) la capacidad de fotosíntesis de las plantas está directamente relacionado con la superficie foliar expresada como el índice de área foliar. El tratamiento maduro favoreció el área foliar en el cultivo de maíz, esto se relaciona con el crecimiento y desarrollo dado que en las hojas se sintetizaran los carbohidratos que serán repartidos a los diferentes órganos.

Los tratamientos procedentes del baño seco público (UNALM) que fueron llenados por 6 meses, específicamente los solarizados con orina (Vermi-O y 6Meses-O) tuvieron mejores resultados que los solarizados con agua (Vermi-A y 6Meses-A), debido al efecto inmediato que provoco el aporte de orina. El 90-100 % del N de la orina se encuentra como urea y amonio, su disponibilidad es la misma que la de los fertilizantes químicos y ha sido verificado en experimentos de fertilización (Kirchman y

Pettersson, 1995; Richert Stintzing et al., 2001). El P en la orina es prácticamente (95-100 %) inorgánico y es excretado en forma de iones de fosfato (Lentner et al., 1981). El K es excretado en la orina como iones, los cuales están disponibles directamente para las plantas. El S es excretado principalmente en la forma de iones libres de sulfato (Lentner, 1981; Kirchmann y Pettersson, 1995).

Según Schargel y Delgado (1990), algunos valores de la densidad aparente, con relación a la textura son los siguientes: textura fina ($1.0-1.3 \text{ g cm}^{-3}$), textura media ($1.3-1.5 \text{ g cm}^{-3}$) y textura gruesa ($1.5-1.7 \text{ g cm}^{-3}$). Los suelos con incorporación de excreta humana procesada tienen una densidad que varía desde 1.05 a 1.26 g cm^{-3} , convirtiéndolos en suelos porosos con buena aireación y drenaje, donde se tiene una mejor penetración y desarrollo de las raíces. El suelo testigo tuvo una densidad de 1.47 g cm^{-3} siendo el valor más alto en comparación con los otros tratamientos, se puede decir que es un suelo con un mayor grado de compactación, con una aireación deficiente dificultando el desarrollo de las raíces, de esta manera afecto el crecimiento y desarrollo de las plantas.

La materia orgánica es uno de los factores que tiene influencia sobre la densidad del suelo, el suelo del testigo y del tratamiento Xrunner tienen los valores más bajos de materia orgánica esto pudo haber influenciado en la densidad aparente ya que estos dos suelos tienen los valores más altos en densidad. Los suelos tratados con excretas procedentes del baño seco familiar y público (UNALM) presentaron un alto contenido de materia orgánica incrementando su capacidad de intercambio catiónico y capacidad de retención de humedad, reduciendo la evaporación del agua y regulando la humedad. El contenido de materia orgánica del suelo agrícola según el análisis de suelo del LASPAF-UNALM fue de 1.41 % mediante el método de Walkley y Black, finalizada la campaña se determinó el contenido de carbono orgánico total en el suelo mediante el mismo método, obteniendo un valor de 1.1 % para el suelo testigo; todos los tratamientos mostraron un incremento significativo en el contenido de carbono orgánico total, con la excepción del tratamiento Xrunner, ya que el tiempo de llenado de las excretas fue de dos semanas, en comparación con el tratamiento maduro que tuvo un tiempo de dos años, de esta manera el contenido orgánico fue enriquecido con el tiempo siendo una fuente importante de nutrientes para la planta.

Para el nitrógeno total en el suelo, el tratamiento Maduro tuvo un valor de 0.35 % siendo estadísticamente superior a los demás, este nitrógeno persistió en el suelo debido a una mayor estabilidad por tener un periodo de llenado y secado superior a los demás tratamientos. En el porcentaje relativo de extracción de N con respecto al testigo (Cuadro 14), el tratamiento maduro obtuvo 257 % de extracción N para el cultivo de maíz, a pesar de que este tratamiento es superado en contenido de N por las excretas sometidas a vermicompostaje (Cuadro 13). La extracción de N no solo depende de la cantidad de N que puede contener un suelo, sino también de las propiedades o condiciones del suelo para que ese N sea fácilmente asimilado por las plantas.

A pesar de haber diferencia estadística para la conductividad eléctrica en el suelo, los valores obtenidos de conductividad se consideran muy ligeramente salino para todos los tratamientos, con la excepción para el tratamiento 6 Meses-O que se considera ligeramente salino. Para pH no existe diferencia significativa entre los tratamientos, el rango varía de 7.6 a 7.9 siendo ligeramente a moderadamente alcalino.

Cuadro 13: Aporte total de macronutrientes por las diferentes excretas humanas procesadas

Tratamiento	Contenido total de nutrientes (mg maceta ⁻¹)		
	Total N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Xrunner	1530	2100	1950
6 Meses-A	3840	2310	1710
6 Meses-O	4079	2326	1758
Vermi-A	5550	8370	4680
Vermi-O	5734	8383	4717
Maduro	5190	4830	2910

Cuadro 14: Valores entre paréntesis correspondientes al porcentaje relativo de extracción de N con respecto al testigo en maíz

Tratamiento	N extraído (mg maceta ⁻¹)
	Maíz
Xrunner	177.3 (157 %)
6 Meses-A	119.2 (106 %)
6 Meses-O	183.3 (163 %)
Vermi-A	61.9 (55 %)
Vermi-O	245.2 (217 %)
Maduro	290.2 (257 %)
Testigo	112.8

VI. CONCLUSIONES

- La excreta del tratamiento Maduro, procedente del baño seco familiar incrementó la producción de biomasa aérea y área foliar en el cultivo de maíz.
- Las excretas de los tratamientos solarizadas con orina (6 Meses-O y Vermi-O) tuvieron mejores resultados que las excretas solarizadas con agua (6 Meses-A y Vermi-A), ya que el uso de orina sobre las excretas favoreció el crecimiento y desarrollo en las plantas de maíz, debido a que es un fertilizante líquido bien equilibrado, con elementos en forma asimilables para las plantas.
- La excreta del tratamiento Xrunner, procedente del baño seco portátil no incrementó la producción de biomasa aérea y área foliar en el cultivo de maíz.
- Las excretas de los tratamientos Maduro, 6 Meses-A, 6 Meses-O, Vermi-A, Vermi-O mejoraron las características físicas y químicas del suelo como la retención de agua, densidad aparente, carbono orgánico y nitrógeno total, pero no tuvieron el mismo efecto para el pH y conductividad eléctrica. La excreta del tratamiento Xrunner no mejoró ninguna de las características del suelo agrícola utilizado.

VII. RECOMENDACIONES

- Seguir realizando ensayos con excretas humanas procesadas con una aplicación mayor al 10% del peso total, para determinar la cantidad adecuada para poder ser usada a nivel de campo.
- Realizar ensayos con excretas humanas que tengan un tiempo mayor a seis meses de almacenamiento y secado, para favorecer el contenido de nutrientes y materia orgánica.
- Buscar nuevas técnicas de higienización de excretas que favorezcan el contenido de nutrientes disponible para las plantas, como por ejemplo el vermi-compostaje. Incluir la orina en la higienización.
- Determinar el adecuado proceso de higienización de las excretas para obtener un material libre de patógenos y fácilmente manipulable.
- Realizar ensayos para determinar el efecto residual de las excretas humanas procesadas para una segunda campaña, usando como cultivo indicador una hortaliza como por ejemplo tomate.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Almeida, M.C.; Butler, D.; Friedler, E. 1999. At source domestic wastewater quality. *Urban Water* 1: 49-55.
- Arancon, N.Q.; Edwards, C.A.; Atiyeh, R.; Metzger, J.D. 2004. Effects of vermicomposts produced from food waste on the growth and yields of greenhouse peppers. *Bioresource Technology*. 93 (2): 139–144.
- Atiyeh, R.M.; Subler, S.; Edwards, C.A.; Bachman, G.; Metzger, J.D.; Shuster, W. 2000. Effects of vermicomposts and composts on plant growth in horticultural container media and soil. *Pedobiologia* 44 (5): 579–590.
- Becker, W. 1994. Befolkningens kostvanor och näringsintag i Sverige 1989 Dietary habits and intake of nutrition in Sweden 1989. The National Food Administration. Uppsala, Sweden.
- Beck-Friis, B.; Smårs, S.; Jönsson, H; Kirchmann, H. 2001. Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes. *Journal of Agricultural Engineering Research* 78(4): 423-430.
- Beck-Friis, B.; Smårs, S.; Jönsson, H.; Eklind, Y.; Kirchmann, H. 2003. Composting of source-separated household organics at different oxygen levels: Gaining an understanding of the emission dynamics. *Compost Science and Utilization* 11(1): 41-50.
- Berger, E.Y. 1960. Intestinal absorption and excretion. En: Comar, C.L.; Bronner F (eds) *Mineral Metabolism*. Academic Press, New York: 249-286.
- Berg, J. 2000. Storing and handling of biogas residues from big-scale biogas plants (In Swedish). JTI report Kretslopp y Avfall 22, Swedish Institute for Agricultural and Environmental Research. Sweden.

- Cáceres, A.; Cáceres, R. 1981. Control sanitaria de bio-abonos y efluentes de letrinas secas familiares y digestores de biogás. Documento inédito presentado al XIII Congreso Centroamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Guatemala, Guatemala, 16-20 de marzo.
- Clark, G.A. 2003. A test of the production of organically fertilized amaranth in Tehuixtla, Morelos, Mexico. Manuscrito disponible en esac@laneta.apc.org.
- De Vay, J. 1991. Historical review and principles of soil solarization. En: Soil Solarization, FAO Plant Production & Protection Paper No. 109: 1-15.
- Domínguez, J. 2004. State of the art and new perspectives on vermicomposting research, In: Edwards, C.A. (ed.). Earthworm ecology, CRC Press; Boca Raton, FL, USA: 401-424.
- Edwards, C.A.; Bohlen, P.J. 1996. Biology and ecology of earthworms (3rd Ed), Champman and Hall, London, U.K.
- Edwards, C.A. 1988. Breakdown of animal, vegetable and industrial organic wastes by earthworms. In: Edwards, C.A.; Neuhauser, E.F. (eds.). Earthworms in Waste and Environmental Management. SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands; ISBN 90-5103-017-7, pp: 21-32.
- Eklind, Y.; Kirchmann, H. 2000. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. II. Nitrogen turnover and losses. *Bioresource Technology* 74(2): 125-133.
- Feachem, R.G.; Bradley, D.J.; Garelick, H.; Mara, D.D. 1983. Sanitation and disease: health aspects of excreta and wastewater management. World Bank Studies in Water Supply and Sanitation 3. Wiley, Chichester, UK.
- Fittschen, I; Hermann, H.H. 1998. Characterization of the municipal wastewaterpart human urine and a preliminary comparison with liquid cattle excretion. *Water Science and Technology* 38(6): 9-16.

- Fraústo da Silva, J.J.R.; Williams, R.J.P. 1997. The biological chemistry of the elements -The inorganic chemistry of life. Oxford : Oxford
- Gao, X. Zh.; Shen, T.; Zheng, Y.; Sun, X.; Huang, S.; Ren, Q.; Zhang, X.; Tian, Y.; Luan, G. 2002. Practical manure handbook. In Chinese. Chinese Agriculture Publishing House. Beijing, China.
- Garrow, J.S. 1993. Composition of the body. en: Garrow, J.S.; James, W.P.T. (eds) Human nutrition and dietetics, 9th ed. Churcill Livingstone, Edinburgh, UK.
- Garg, V.K.; Gupta, R.; Yadav, A. 2008. Potential of vermicomposting technology in solid waste management, en: Pandey, A., Soccol, C.R., Larroche, C. (eds), Current Developments in Solid-state Fermentation. Springer New York 468-511.
- Guyton, A.C. 1992. Human physiology and Mechanisms of disease. W.B. Saunders Company, Philadelphia, USA.
- Haug, R.T. 1993. The practical handbook of compost engineering. Lewis Publishers, USA.
- Instituto de Desarrollo Urbano CENCA y Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento MVCS. 2009. Una guía para un sistema integral de saneamiento ecológico en áreas periurbanas y rurales El ECODESS. Primera edición. Lima-Perú, marzo.
- Instituto de Desarrollo Urbano CENCA y Programa de Agua y Saneamiento WSP del Banco Mundial. 2001. Experiencias alternativas de saneamiento rural y periurbano en Latinoamérica. Aportes para una estrategia en política de saneamiento en el Perú. Seminario-Taller del 21-22 junio de 2001. Lima: CENCA y WSP. 100 pp.
- Johansson, M.; Jönsson, H.; Höglund, C.; Richert Stintzing, A.; Rodhe, L. 2001 Urine separation-closing the nutrient cycle. Stockholm Water Company. Stockholm,Sweden.http://www.swedenviro.se/gemensamma_se/documents/Uri_nsep_eng.pdf.

- Johnston F.A.; McMillan T.J. 1952. The amount of nitrogen retained by 6 young women on an intake of approximately 70 grams of protein a day. *Journal of Nutrition* 35: 425-433.
- Jönsson, H.; Baky, A. ; Jeppsson, U.; Hellström, D.; Kärrman, E. 2005. Composition of Urine, Faeces, Greywater and Biowaste for Utilisation in the URWARE Model. Report 2005:6, Urban Water, Chalmers University of Technology, Sweden Sweden. <www.urbanwater.org>.
- Jönsson, H.; Eklind, Y.; Albihn, A.; Jarvis, Å.; Kylin, H.; Nilsson, M.-L.; Nordberg, Å.; Pell, M.; Schnürer, A.; Schönning, C.; Sundh, I.; Sundqvist, J.-O. 2003. Samhällets organiska avfall – en resurs i kretsloppet The organic waste in society – a resource in the circulation; in Swedish. Fakta Jordbruk – No 1-2, SLU, Swedish University of Agricultural Sciences. Sweden.
- Jönsson, H.; Vinnerås, B.; Höglund, C.; Stenström, T.A.; Dalhammar, G.; Kirchmann, H. 2000. Källsorterad humanurin i kretslopp Recycling source separated human urine In Swedish, (Resumen en ingles, original no consultado). VA-FORSK Report 2000•1. VA-FORSK/VAV. Stockholm, Sweden.
- Jönsson, H.; Vinnerås, B. 2004. Adapting the nutrient content of urine and faeces in different countries using FAO and Swedish data. In: *Ecosan – Closing the loop. Proceedings of the 2nd International Symposium on Ecological Sanitation, incorporating the 1st IWA specialist group conference on sustainable sanitation, 7th-11th April 2003, Lübeck, Germany.* pp 623-626.
- Katan J. 1981. Solar heating solarization of soil for control of soilborne pests. *Annual Review of Phytopathology*. 19: 211-236.
- Kirchmann, H.; Pettersson, S. 1995. Human urine – chemical composition and fertilizer use efficiency. *Fertilizer Research* 40:149-154.
- Kozlowski, T.; Kramer. P.; Pallardy, S. 1991. The Physiological Ecology of Woody Plants. A volume in *Physiological Ecology*: 31-68

- Lentner, C.; Lentner, C.; Wink, A. 1981. Units of Measurement, Body Fluids, Composition of the Body, Nutrition. Geigy Scientific Tables. Ciba-Geigy, Basel, Switzerland.
- Leopold, A.; Kriedemann, P.E. 1975. Plant growth and development. McGraw Hill, New York: 545
- Lundström, C.; Lindén, B. 2001. Kväveeffekter av humanurin, Biofer och Binadan som gödselmedel till höstvet, vårvete och vårkorn i ekologisk odling. Nitrogen effects of human urine and fertilizers containing meat bone meal (Biofer) or chicken manure (Binadan) as fertilizers applied to winter wheat, spring wheat and spring barley in organic farming. Skara Series B Crops and Soils Report 8, Department of Agricultural Research, Swedish University of Agricultural Sciences. Skara, Sweden.
- Mitchell, A. 1997. Production of *Eisenia foetida* and vermicompost from feed-lot cattle manure. *Soil Biology and Biochemistry*. 29 (3/4), 763–766.
- Moe, C.; Izurieta, R. 2003. Longitudinal study of double vault urine diverting toilets and solar toilets in El Salvador. Proceedings from the 2nd International Symposium on Ecological Sanitation, 7th -11th April 2003, Lübeck, Germany: 295-302.
- Morgan, P. 2003. Experiments using urine and humus derived from ecological toilets as a source of nutrients for growing crops. Paper presented at 3rd World Water Forum 16-23 March 2003. Available at: <http://aquamor.tripod.com/KYOTO.htm>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) 2003. FAOSTAT Nutrition data – Food Supply – Crops Primary Equivalent. <http://apps.fao.org/page/collections?subset=nutrition>, visited 2003-02-28.
- Organización Mundial de la Salud. (OMS) 1990. Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura: medidas de protección de la salud pública / preparadas por Duncan Mara y Sandy Cairncross. Ginebra.

- Organización Mundial de la Salud. (OMS) 2006. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Excreta and Greywater Use in Agriculture. Vol. 4, ISBN 92 4 154685 9.
- Parthasarathi, K.; Ranganathan, L.S. 1999. Longevity of microbial and enzyme activity and their influence on NPK content in pressmud vermicasts. *European Journal of Soil Biology* 35: 107-113.
- Richert Stintzing, A.; Rodhe, L.; Åkerhielm, H. 2001. Human urine as fertilizer – plant nutrients, application technique and environmental effects (In Swedish, English summary). JTI-Rapport Lantbruk y Industri 278, Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering.
- Riggle, D.; Holmes, H. 1994. New horizons for commercial vermiculture. *BioCycle* 35: 58-62.
- R Development Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>
- Schargel, R.; Delgado, F. 1990. Características y manejo de los suelos utilizados en la producción de carne en Venezuela. En: Plasse, D., Peña de Borsotti, N., eds. VI Cursillo sobre Bovinos de Carne. Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad Central de Venezuela. Maracay, pp. 187-220.
- Schönning, C.; Stenström, T.A. 2004. Guidelines for the safe use of urine and faeces in ecological sanitation systems. EcoSanRes Report 2004-1, SEI, Stockholm, Sweden.
- Schönning, C.; Leeming, R.; Stenström, T.A. 2002. Faecal contamination of source separated human urine based on the content of faecal sterols. *Water Research*. 36: 1965–1972.
- Simons, J.; Clemens, J. 2004. The use of separated human urine as mineral fertilizer. In: Ecosan – Closing the loop. Proceedings of the 2nd International Symposium on

Ecological Sanitation, incorporating the 1st IWA specialist group conference on sustainable sanitation. Lübeck: 595-600

Sinha, R.K.; Agarwal, S.; Chauhan, K.; Chandran, V.; Soni, B.K., 2010 b. Vermiculture technology: Reviving the dreams of Sir Charles Darwin for scientific use of earthworms in sustainable development programs. *Technology and Investment* 1: 155-172.

Sonesson, U. 1996. The Orware Simulation Model – Compost and Transport Submodels. Licentiate thesis Report 215, Department of Agricultural Engineering, Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, Sweden.

Strauss, M. 1986 About agricultural use of wastewater and excreta in Latin America. Dubendorf. International Reference Centre for Waste Disposal.

Strauss, M. 1985 Health aspects of nightsoil and sludge use in agriculture and aquaculture. Part II: Pathogen survival. Dubendorf, International Reference Centre for Waste Disposal (Report No. 04/85).

Trémolières, J.; Bonfilis, S.; Carré, L.; Sautier, C. 1961. Une méthode d'étude de la digestibilité chez l'homme, le fécalogramme. *Nutritio et Dieta; European Review of Nutrition and Dietetics* 3: 281-289.

Udert, K.M.; Larsen, T.; Gujer, W. 2003. Estimating the precipitation potential in urine-collecting systems. *Water Research* 37(11): 2667-2677.

Vinnerås, B.; Björklund, A.; Jönsson, H. 2003a. Thermal composting of faecal matter as treatment and possible disinfection method – laboratory-scale and pilot-scale studies. *Bioresource Technology* 88: 47–54

Vinnerås, B.; Holmqvist, A.; Bagge, E.; Albiñ, A.; Jönsson, H. 2003b. The potential for disinfection of separated faecal matter by urea and by peracetic acid for hygienic nutrient recycling. *Bioresource Technology* 89(2): 155-161.

Vinnerås, B.; Höglund, C.; Jönsson, H.; Stenström, T.A. 1999. Characterisation of sludge in urine separating sewerage systems. En: Klöve B., Etniner C., Jenssen

P. y Maehlum T.(eds) Proceedings of the 4th International Conference – Managing the Wastewater Resource Ecological Engineering for Wastewater Treatment. Norway. June 7-11.

Vinnerås, B. 2002. Possibilities for sustainable nutrient recycling by faecal separation combined with urine diversion. *Agraria* 353, Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, Sweden.

Vinnerås, B. 2007. Comparison of composting, storage and urea treatment for sanitising of faecal matter and manure. *Bioresource Technology*. 98: 3317–3321.

Zandstra, I. Reclamation of nutrients, water and energy from wastes: a review of selected IDRC-supported research. Ottawa, International Development Research Centre, 1986 Manuscript Report No. IDRC-MR124e.

IX. ANEXOS

ANEXO 1: ANVA de altura de la biomasa aérea en maíz

Fuente de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Significación
Tratamiento	6	9042	1507.1	40.65	1.48e ⁻¹² ***
Residuales	28	1038	37.1		

Códigos de Significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANEXO 2: ANVA de materia fresca de la biomasa aérea en maíz

Fuente de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Significación
Tratamiento	6	44401	7400	21.24	3.14e ⁻⁰⁹ ***
Residuales	28	9755	348		

ANEXO 3: ANVA de materia seca de la biomasa aérea en maíz

Fuente de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Significación
Tratamiento	6	2270.9	378.5	23.47	1.02e ⁻⁰⁹ ***
Residuales	28	451.6	16.1		

ANEXO 4: ANVA de área foliar de la biomasa aérea en maíz

Fuente de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Significación
Tratamiento	6	12787292	2131215	18.34	1.57e ⁻⁰⁸ ***
Residuales	28	3253816	116208		

ANEXO 5: ANVA de extracción de N/maceta en la biomasa aérea en maíz

Fuente de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Significación
Tratamiento	6	113555	18926	18.56	6.35e ⁻⁰⁶ ***
Residuales	14	14275	1020		

ANEXO 6: ANVA de humedad gravimétrica en el suelo

Fuente de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Significación
Tratamiento	6	1432.8	238.79	18.62	$2.06e^{-07}$ ***
Residuales	21	269.3	12.82		

ANEXO 7: ANVA de densidad aparente en el suelo

Fuente de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Significación
Tratamiento	6	0.5587	0.09312	54.4	$1.03e^{-11}$ ***
Residuales	21	0.0360	0.00171		

ANEXO 8: ANVA de pH en el suelo

Fuente de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Significación
Tratamiento	6	0.5008	0.08346	0.614	0.716
Residuales	21	2.8524	0.13583		

ANEXO 9: ANVA de conductividad eléctrica en el suelo

Fuente de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Significación
Tratamiento	6	7.978	1.3296	3.832	0.00975 **
Residuales	21	7.286	0.3469		

ANEXO 10: ANVA de carbono total en el suelo

Fuente de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Significación
Tratamiento	6	16.839	2.8065	39.94	$2.02e^{-10}$ ***
Residuales	21	1.476	0.0703		

ANEXO 11: ANVA de nitrógeno total en el suelo

Fuente de V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Significación
Tratamiento	6	0.1534	0.02557	33.25	$1.13e^{-09}$ ***
Residuales	21	0.0161	0.00076		