

**VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN ÍNDICE DE NITRÓGENO
(N-INDEX) DEL CARIBE EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE HORTALIZAS EN EL
VALLE DE LAJAS**

Por

Miguel Oliveras Berrocales

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

MAESTRIA EN CIENCIAS

EN

SUELOS

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ
2014

Aprobado por:

David Sotomayor Ramírez, Ph.D.
Presidente, Comité graduado

Fecha

Luis Pérez Alegría, Ph.D.
Miembro, Comité graduado

Fecha

Elvin Román Paoli, Ph.D.
Miembro, Comité graduado

Fecha

Edna Negrón, Ph.D.
Representante de Estudios Graduados

Fecha

Elvin Román Paoli, Ph.D.
Director Interino de Departamento

Fecha

Resumen

La pérdida de nutrientes de los sistemas agrícolas es una de las principales causas de degradación al medio ambiente. El consumo de fertilizante nitrogenado en la producción de vegetales y hortalizas, comúnmente fluctúa entre 112 a 253 kg N/ha, lo que puede generar altos niveles de nitrógeno (N) residual en el suelo posterior a las cosechas de los cultivos, lo que a su vez incrementa los flujos de N al ambiente. La cuantificación de las pérdidas de N de los sistemas agrícolas se puede realizar mediante modelos de simulación como el N-Index. El N-Index es un modelo de simulación el cual predice pérdidas de N a través de los diferentes mecanismos tales como; volatilización, desnitrificación, lixiviación y por transporte superficial. Se condujo un estudio en una finca productora de hortalizas en el Valle de Lajas, en el cual se establecieron predios demostrativos con siembras de cebolla (*Allium cepa* L.), calabaza (*Cucúrbita moschata* D.), pimiento (*Capsicum annuum*) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.), con el motivo de (i) recopilar los parámetros de entrada al modelo de simulación N-Index, y (ii) validar el mismo en esta localidad. Se compararon valores de N residual en el suelo y N absorbido por el cultivo medidos en el campo vs. los predichos por el modelo, para probar la eficiencia del modelo y su desempeño. Los resultados obtenidos en los experimentos de campo demuestran que el modelo de simulación tuvo una buena correlación ($p < 0.05$) entre los valores predichos y los medidos en el campo para el N residual en el suelo ($r = 0.88$) y N absorbido por los cultivos ($r = 0.99$). En los sistemas de producción evaluados los flujos de N variaron entre 1 y 4 kg N/ha para volatilización, 18 y 46 kg N/ha para desnitrificación, 155 y 779 kg N/ha para lixiviación y entre 64 y 401 kg N/ha para N residual en el suelo. La eficiencia de utilización de N varió entre 17 y 39%. Los resultados demuestran que es válido la aplicación del modelo N-Index para la región de la zona semiárida de Puerto Rico, en sistemas de producción de hortalizas.

Abstract

Nutrient losses from agricultural fields are one of the principal causes of environmental degradation. Typical nitrogen (N) fertilizer consumption rates in vegetable production systems and horticultural crops, typically fluctuates between 112 to 253 kg N/ha. This can generate high residual soil N at harvest, and may increment N losses to the environment. The evaluation of N losses to the environment can be evaluated with simulation models such as the N-Index, that can be aid in the identification of N losses and evaluate the effect of best management practices. The N-Index is a simulation model that predicts N losses via surface, leaching, and atmospheric pathways. A field study was conducted to quantify the residual soil N and crop N uptake to validate the N-Index in vegetable production systems in the Lajas Valley in Puerto Rico. Field plots were established with vegetables such as onion (*Allium cepa* L.), pumpkin (*Cucurbita Moschata* D.), pepper (*Capsicum annum*), and tomato (*Solanum lycopersicum* L.) with two main objectives (i) collect the input parameters for the simulation model N-Index, and (ii) collect the field data to validate the model. Residual soil N and crop N uptake values measured were used to evaluate the model estimations, evaluate the model performance and validate the model. Results obtained from the experimental fields showed a good correlation ($p < 0.05$) between observed and predicted values for residual soil N ($r = 0.88$) and crop N uptake ($r = 0.99$). In the production systems evaluated the N losses ranged between 1 and 4 kg N/ha for volatilization, 18 and 46 kg N/ha for denitrification, 155 and 779 kg N/ha for lixiviation and between 64 and 401 kg N/ha for residual soil N. The N use efficiency ranged between 17 and 39%. The results demonstrate that the simulation model N-Index was valid for the Caribbean region in Puerto Rico, in vegetable production systems.

Dedicatoria

A Dios...

"Por siempre guiar mis pasos y permitirme haberme levantado cada día"

A mis padres... Lourdes y Manuel

"Por siempre haberme llevado por el camino correcto... y con sus sacrificios haber hecho de mí la persona que soy hoy día"

A mis hermanos... Carlos y Manuel

"Porque siempre me han apoyado en todo y por siempre haber podido contar con ellos en todo momento"

A mis abuelas... Ramonita y May

"Quienes siempre me ayudaron con lo poco que podían, pero que para mí significaba mucho... y aunque una de ellas no pudo presenciar este momento, sé que está feliz de que lo haya logrado"

Agradecimientos

Al Dr. David Sotomayor Ramírez por haber creído en mi capacidad como estudiante, por todo el apoyo brindado durante esta etapa de crecimiento profesional, y por todo lo aprendido trabajando a su lado.

Al Dr. Jorge A. Delgado por proveer el modelo, material que facilitó nuestro trabajo, por haber podido contar con él y haber sido una guía en este trabajo.

A los miembros de mi comité graduado los doctores Luis R. Pérez Alegría y Elvin Román Paoli por su aporte, respaldo, consejos y orientación durante el desarrollo de esta investigación.

Al agricultor Carlos González, el agrónomo Moisés Soto y el equipo de trabajo de la Finca González en Guánica, por todo su respaldo y su ayuda incondicional, sin ellos nuestra investigación no hubiera sido posible.

A la Dra. Rosa Chávez por sus consejos y metodologías en la preparación de muestras vegetales para análisis.

A la técnica de laboratorio Rocío Suarez por toda su ayuda y consejos.

A las secretarias del departamento Floripe Cancel, Gloria Aguilar, Evelyn Rosselló y Norma García por toda su ayuda.

A la Sociedad Puertorriqueña de Ciencias Agrícolas (SOPCA) por hacerme merecedor de su beca SOPCA2014 en su convención anual, lo cual fue una gran aportación para mi estudio.

A mis compañeros de grado Remy Rodríguez, Leonardo Marrero, José Arocho y Yaniel Román, por su amistad, ayuda, apoyo y motivación durante todo este tiempo.

© Miguel Oliveras Berrocales Diciembre 2014

Tabla de Contenido

| | |
|---|-----|
| Resumen | ii |
| Abstract | iii |
| Dedicatoria | iv |
| Agradecimientos | v |
| Derechos de autor | vi |
| Tabla de contenido | vii |
| Lista de cuadros | ix |
| Lista de figuras | x |
| Lista de anejos | xi |
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Objetivos | 4 |
| 2.1. Objetivos generales | 4 |
| 2.2. Objetivos específicos | 4 |
| 3. Revisión de literatura | 5 |
| 3.1. Nitrógeno en el suelo | 5 |
| 3.1.1. Reservas de N en el suelo | 5 |
| 3.1.2. Entradas y salidas de N al sistema | 5 |
| 3.2. Impactos ambientales del nitrógeno | 7 |
| 3.2.1. Efecto de los flujos de nitrógeno al ambiente | 7 |
| 3.2.2. Nitrógeno en la salud humana | 8 |
| 3.3. Industria de producción de hortalizas..... | 9 |
| 3.3.1. Importancia económica | 9 |
| 3.3.2. Incidencia de la producción de hortalizas en las pérdidas de N | 9 |
| 3.4. Evaluación de las pérdidas de nitrógeno | 11 |
| 3.4.1. Modelos de simulación | 12 |
| 3.4.2. Índice de nitrógeno | 12 |

| | |
|---|----|
| 4. Metodología | 14 |
| 4.1. Área de estudio | 14 |
| 4.2. Estudio de campo..... | 18 |
| 4.3. Aplicación del modelo de simulación N-Index a los predios demostrativos | 23 |
| 4.4. Metodología de simulación y parámetros de entrada | 23 |
| 4.5. Salidas del modelo | 26 |
| 4.6. Validación del modelo | 27 |
| 4.7. Métodos de evaluación para determinar la eficiencia y desempeño del modelo | 28 |
| 4.8. Análisis de sensibilidad | 30 |
| 4.9. Análisis estadístico | 31 |
| 5. Resultados y Discusión | 32 |
| 5.1. Rendimientos..... | 32 |
| 5.2. Nitrógeno en el perfil del suelo..... | 33 |
| 5.3. Comparación de nitrógeno residual en el suelo medido vs. estimado..... | 33 |
| 5.4. Comparación de nitrógeno absorbido por el cultivo medido vs. estimado..... | 36 |
| 5.5. Salidas del modelo para los demás mecanismos de pérdidas de N..... | 38 |
| 5.6. Desempeño del modelo..... | 39 |
| 5.7. Sensitividad del modelo..... | 40 |
| 5.8. Eficiencia de uso de nitrógeno del sistema..... | 45 |
| 5.9. Comparación de niveles de aplicación de nitrógeno | 45 |
| 5.10. Evaluación económica..... | 46 |
| 5.11. Prácticas de manejo sugeridas para reducir las pérdidas de nitrógeno | 48 |
| 6. Conclusiones | 49 |
| 7. Literatura citada | 51 |
| 8. Anejos..... | 62 |

Lista de Cuadros

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Localización y características climáticas de la finca seleccionada para la investigación..... | 17 |
| Cuadro 2. Parámetros de entrada recopilados para correr el modelo en la localidad con cada cultivo en específico | 24 |
| Cuadro 3. Rendimientos logrados en cada cultivo con cada dosis de aplicación de N utilizada..... | 32 |
| Cuadro 4. Valores simulados por el modelo y medidos en campo para los parámetros a validar | 34 |
| Cuadro 5. Predicciones del modelo con las estimaciones para los demás mecanismos de pérdida de N en cada sistema establecido..... | 38 |
| Cuadro 6. Indicadores estadísticos utilizados para evaluar la eficiencia del modelo N-Index en la localidad | 39 |
| Cuadro 7. Análisis de sensibilidad del N-Index a cambios en parámetros de entrada | 41 |
| Cuadro 8. Comparación de resultados mediante el uso del N-Index..... | 46 |
| Cuadro 9. Evaluación económica del modelo para los mecanismos de pérdida de N..... | 47 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Localización de la finca seleccionada (marca roja) dentro del Valle de Lajas en el pueblo de Guánica para el estudio de validación y uso del modelo N-Index | 16 |
| Figura 2. Predios establecidos para las siembras (A) Ia, Ib y II, (C) siembra III y (B) siembra IV la distribución de las series de suelo en los predios | 18 |
| Figura 3. Relación entre valores analizados y estimados por el modelo N-Index para el parámetro de N residual en el suelo luego de la cosecha de los cultivos | 35 |
| Figura 4. Relación entre valores analizados y estimados por el modelo N-Index para el parámetro nitrógeno absorbido por el cultivo para los distintos cultivos establecidos | 37 |
| Figura 5. Análisis de sensibilidad del N-Index a cambios en A) N aplicado y B) cantidad de riego aplicado al cultivo seleccionado para el análisis | 43 |
| Figura 6. Resultados cualitativos del N-Index para los distintos casos hipotéticos usados en el análisis de sensibilidad | 44 |

Lista de Anejos

| | |
|--|----|
| Anejo 1: Parámetros de entrada necesarios para hacer las simulaciones en el modelo N-Index... | 62 |
| Anejo 2: Diagnóstico de fertilidad (0-15cm) previo al establecimiento de los cultivos en localidad seleccionada Finca González en Guánica | 64 |
| Anejo 3: Porcentaje de N en el contenido vegetal de los cultivos establecidos | 65 |
| Anejo 4: Coeficientes correlación Pearson (r) para las predicciones del N-Index y los valores medidos en campo | 66 |
| Anejo 5: Prueba de normalidad para el conjunto de datos predichos por el N-Index y medidos en campo para los parámetros a validar | 67 |
| Anejo 6: Análisis de varianza para el parámetro N absorbido | 68 |
| Anejo 7: Prueba no paramétrica para diferenciar las medias de los datos medidos y simulados para ambos parámetros | 69 |
| Anejo 8: Datos Históricos precipitación Estación Santa Rita (1971-2000) | 70 |
| Anejo 9: Descripción oficial de las series de suelo en los predios del estudio..... | 71 |
| Anejo 10: Fotos del estudio | 77 |
| Anejo 11: Contactos | 86 |

1. Introducción

El nitrógeno (N) es un elemento de importancia para la producción agrícola. Es usualmente el principal nutriente limitante en la mayoría de los sistemas agrícolas y es el fertilizante de mayor consumo a nivel mundial (Ribaud et al., 2011). La utilización de N en los sistemas agrícolas es necesaria para mantener la producción global de alimentos. Altos rendimientos en los cultivos requiere de mayores insumos de N. No todo el N aplicado en los sistemas de producción agrícola es utilizado por los cultivos. Se estima que la eficiencia de utilización de N varía entre un 30 a 50%, por lo que el restante se queda en el perfil del suelo, parte del cual se puede perder del sistema agrícola (Delgado et al., 2000). Esto resulta en el aumento de flujos de N al medio ambiente.

La pérdida de N de los sistemas agrícolas es una de las causas principales de la contaminación del ambiente y de los cuerpos de agua (Antweiler et al., 1996). El impacto de estos flujos de N tiene un gran efecto en la calidad de cuerpos de agua subterráneos, aguas superficiales y la calidad del aire. El N proveniente de los sistemas agrícolas está asociado como contribuyente a la eutroficación de cuerpos de agua, destrucción de la capa de ozono y al calentamiento global (Follet y Delgado, 2002; Meisinger y Delgado, 2002). La lixiviación de nitratos de los sistemas agrícolas puede contribuir al impacto de aguas subterráneas. El costo potencial de remover el nitrato proveniente del uso agrícola de las aguas potables de EE.UU. se reporta en alrededor de 1,700 millones por año (EPA-SAB, 2011). Se estima que el 11% de los cuerpos de agua afectados son a causa de la pérdida de N de los sistemas agrícolas (USEPA, 2002). El manejo adecuado de fertilizantes en los sistemas agrícolas, es la mejor forma de reducir pérdidas de N. Se han realizado trabajos de evaluación de tasas de fertilización de N en cultivos como las hortalizas, pero en Puerto Rico, es necesario evaluar sistemas de producción

de hortalizas así como también prácticas de manejo que ayuden a disminuir los flujos de N al ambiente.

La cuantificación de las pérdidas de N puede ser un proceso complicado (Delgado, 2002). Para ayudar en la cuantificación de las pérdidas de nitrógeno de los sistemas agrícolas se han desarrollado distintos modelos de simulación como el *Índice de Nitrógeno* (N-Index), "*Nitrogen Loss Estimator Assessment Package*" (NLEAP), "*Nutrient Tracking Tool*" (NTT), entre otros. Estos modelos difieren en su nivel de complejidad para operar y su información puede ser muy útil en cuanto a la toma de decisiones en los sistemas de producción. El uso de modelos de simulación en sistemas agrícolas es una forma para estimar los efectos de manejo en las pérdidas de N. Los modelos de simulación difieren en su nivel de complejidad y en la información que necesita para evaluar la dinámica de N en los sistemas de producción agrícola. El modelo N-Index se enfoca en un nivel 1 para evaluar el manejo de N. Es decir, es de baja dificultad y requiere de pocos datos de entrada para realizar sus estimaciones. El mismo se basa en un balance de N anual y separa escenarios de muy bajo a muy alto riesgo de pérdidas de N al ambiente (Shaffer y Delgado, 2002). En este nivel se evalúa de manera cualitativa y cuantitativa los efectos de las prácticas de manejo empleadas por el agricultor.

El modelo N-Index estima un balance anual de las entradas y salidas de N en el suelo. El modelo realiza un estimado de la magnitud en las pérdidas de N mediante un análisis cuantitativo. En el análisis cualitativo el modelo categoriza mediante un índice el nivel de riesgo a las pérdidas de N en un sistema agrícola en categorías de "muy bajo", "bajo", "medio", "alto" o "muy alto riesgo". El N-Index puede ser utilizado para distinguir entre las regiones que pueden tener mayores o menores pérdidas de nitrógeno. La meta del manejo de nutrientes es asegurar un

uso eficiente de los mismos reduciendo las pérdidas. Mediante el uso de este modelo se puede evaluar los sistemas agrícolas y su eficiencia de uso de N.

El índice de N es útil para evaluar la eficacia de las prácticas de manejo empleadas en los sistemas de producción, y basado en distintos escenarios se puede evaluar distintas prácticas de manejo para minimizar las pérdidas de nitrógeno. El mismo es útil para comprobar si un sistema tiene un alto riesgo a pérdidas de N al ambiente. El índice de N predice las pérdidas de nitrógeno a través de los diferentes mecanismos tales como; volatilización, desnitrificación, lixiviación y por transporte superficial. Además, el modelo estima la cantidad de N absorbido por el cultivo y el N residual que queda en el suelo al finalizar el ciclo del cultivo, el cual es potencialmente disponible para los cultivos próximos. El modelo considera el efecto de las características del suelo, el cultivo utilizado, el clima y la hidrología del lugar, sobre las prácticas de manejo utilizadas, como la irrigación, aplicación de fertilizantes y manejo de estiércol. El modelo con sus adaptaciones ha sido evaluado en distintas regiones como California, Kentucky, Dakota del Sur, México (Figuerola-Viramontes et al., 2011), Bolivia, Ecuador y regiones Mediterráneas (De Paz et al., 2009), donde se han desarrollado sus propias versiones del modelo en distintos sistemas de producción con buenas correlaciones entre valores medidos y predichos por el modelo.

Se ha desarrollado una versión del índice de N para el Caribe (Delgado et al., 2011). Sin embargo, en Puerto Rico el modelo no ha sido implementado ni probado en las áreas de producción agrícola. Se desconoce el riesgo que representan los sistemas de producción agrícola en el país como por ejemplo, los sistemas de producción de hortalizas en el Valle de Lajas y las magnitudes de los flujos de N al medio ambiente. Por tal razón existe la necesidad de aplicar y validar este modelo de simulación, para evaluar los flujos de N al ambiente. Este modelo provee

una forma rápida y efectiva de evaluar el efecto de las prácticas de manejo de los agricultores sobre las pérdidas de N de sus sistemas de producción, de manera que se tome acción correctiva para reducir los flujos de N al ambiente y a los cuerpos de agua.

2. Objetivos

2.1. Generales

1. Evaluar la aplicabilidad del modelo N-Index del Caribe como una herramienta para identificar y evaluar las prácticas de manejo en los sistemas agrícolas en cuanto al riesgo de pérdidas de N.

2.2. Específicos

1. Recopilar la información en el campo necesaria para poder utilizar el modelo N-index y hacer las simulaciones en sistemas de producción de hortalizas en el Valle de Lajas.
2. Cuantificar la magnitud del N residual y el N absorbido por los cultivos en predios demostrativos con sistemas de manejo definidos.
3. Establecer diferentes escenarios con los sistemas de producción evaluados, modificando las variables de entrada al modelo para determinar la sensibilidad del modelo a flujos de N al ambiente en comparación con el escenario real utilizado.

3. Revisión de literatura

3.1. Nitrógeno en el suelo

3.1.1. Reservas en el suelo

El N es considerado un elemento esencial para las plantas y es el nutriente que más limita la productividad biológica. El N en el suelo proviene de los residuos de plantas y animales, fijación por las leguminosas, lluvia, y fertilizantes. El N total en los suelos generalmente se encuentra en mayor cantidad en los primeros 15 a 20 cm de la superficie que en el subsuelo. El N total del suelo ocurre como N inorgánico y N orgánico, donde alrededor del 90% del N total en la superficie de los suelos ocurre como N orgánico. Bajo condiciones adecuadas parte del N orgánico se mineraliza y pasa a formas inorgánicas (NH_4^+ , NO_3^-), que son asimilables por la planta. El N orgánico del suelo consiste de proteínas, amino azúcares, ácidos nucleicos, ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas. La porción grande de N orgánico es resistente a la descomposición, por lo que una pequeña parte del N orgánico esté disponible para los cultivos. La disponibilidad de N para la planta proveniente de fuentes orgánicas depende de la magnitud de las reservas inmediatamente disponibles totales y de las tasas de mineralización.

3.1.2. Entradas y salidas de N al sistema

Las entradas de N al suelo ocurren por la lluvia, residuos de plantas y animales, y mediante la aplicación de fertilizantes sintéticos. Las salidas de N del sistema agrícola ocurre por distintos mecanismos; la desnitrificación, volatilización, lixiviación, transporte superficial y extracción por el cultivo.

La desnitrificación ocurre por la reducción de NO_3 a N_2O y N_2 bajo condiciones anaeróbicas. (Mosier et al., 2002; Meisinger y Randall, 1991; Peoples et al., 1995). La desnitrificación ocurre cuando bacterias anaeróbicas facultativas oxidan la materia orgánica usando el NO_3^- como aceptador de electrones. Los suelos con mayores pérdidas de N por desnitrificación son aquellos que tienen un pobre drenaje, mayor densidad aparente por la compactación y mayor materia orgánica (Havlin et al., 2005).

La volatilización es el proceso en el cual el NH_4 se pierde del suelo en forma gaseosa (NH_3). Las condiciones conducentes a la volatilización son cuando se aplica el N en formas de NH_4 , un pH del suelo mayor de 7.5, cuando la aplicación se realiza al voleo, suelos con baja capacidad de intercambio catiónico, altas temperaturas y al mantener suelos húmedos con la acumulación de residuos orgánicos (Havlin et al., 2005). En condiciones conducentes a volatilización una cantidad significativa de N puede ser pérdida si las fuentes de N susceptibles a volatilización son aplicadas sin seguir las prácticas de manejo recomendadas (Meisinger y Randall, 1991; Hutchinson et al., 1982).

Otro mecanismo importante de pérdida es la lixiviación de $\text{NO}_3\text{-N}$ a través del perfil del suelo. Las condiciones de suelo conducentes a propiciar la lixiviación de N son suelos de textura gruesa, alta tasa de aplicación, el tiempo de aplicación, la fuente, el método de fertilización, la precipitación, suelos que faciliten la percolación y la cantidad y tiempo de riego. Se estima que la lixiviación de N es la mayor vía para las pérdidas de N, perdiéndose alrededor de un 10-30% del fertilizante nitrogenado aplicado (Havlin et al., 2005). Altos niveles de NO_3^- en el suelo promueve la percolación a través del suelo debido a que el NO_3^- , por su carga, no es adsorbido por arcillas con carga predominante negativa.

Para maximizar la eficiencia en el uso de nitrógeno, hay que manejar los niveles, la forma, la fuente y el tiempo de aplicación de N para minimizar los riesgos de pérdidas de N a través de lixiviación, desnitrificación o volatilización y para maximizar la absorción por la plantas.

3.2. Impactos ambientales del N

3.2.1. Efecto de los flujos de N al ambiente

Cuando se aplica más N de lo necesario se puede incrementar las pérdidas de N en los sistemas de producción agrícolas (Figuroa-Viramontes et al., 2011). Sobre un tercio del fertilizante aplicado a los campos agrícolas, puede perderse fuera de la zona radicular de los cultivos (Randall et al., 2008). El N fuera de la zona radicular puede ser transportando a cuerpos de agua y a la atmósfera por los distintos mecanismos.

Los flujos de N transportados a la atmósfera aumentan los gases de invernadero (N_2 , NO_2 , NH_3) contribuyendo a la destrucción de la capa de ozono y a cambios climáticos (Ribaudó et al., 2011). Las actividades agrícolas han contribuido al enriquecimiento nutricional de los cuerpos de agua ocasionando altas concentraciones de NO_3^- en aguas subterráneas, eutroficación, crecimiento de algas nocivas y muerte del ecosistema marino (Sharpley et al., 1999; Follet y Walker, 1989). Las zonas acuáticas impactadas por N son generalmente aguas subterráneas, aguas costeras y cuerpos de agua superficiales. Estudios demuestran que las concentraciones de NO_3^- en aguas subterráneas están positivamente correlacionadas a altas dosis de aplicación de N y a la irrigación excesiva (Muir et al., 1973).

Las actividades agrícolas y las distintas prácticas de manejo realizadas por los agricultores, pueden ser causantes de los flujos y transportes de NO_3^- hacia los cuerpos de agua

(Mitsch y Day, 2006). Las distintas prácticas de manejo llevadas a cabo deben ser evaluadas para reducir el impacto ambiental.

3.2.2. Nitrógeno en la salud humana

El NO_3^- en los cuerpos de agua, comida y forrajes, puede afectar la salud humana y animal (Follet et al., 2010). Ingestión de aguas con altas concentraciones de NO_3^- por infantes está asociado a problemas de salud como la metahemoglobinemia conocido como el síndrome del "bebe azul" (Comly, 1945). En adición a las aguas potables, la metahemoglobinemia puede ocurrir por alimentar niños con alimentos con un alto contenido de nitratos (Keating et al., 1973).

Otros problemas de salud reportados que pueden estar relacionados a la ingestión de NO_3^- en el agua potable son; cáncer (Saul et al., 1981), hipertensión (Malberg et al., 1978), incremento en la mortalidad de infantes (Super et al., 1981), defectos de nacimiento en el sistema nervioso central (Dorsch et al., 1984) y "Non-Hodgkins lymphoma" (Weisenburger, 1991). Alrededor de un 20% del consumo de NO_3^- en los humanos proviene de líquidos y aguas potables (Isermann, 1983). La intoxicación por NO_3^- también ha sido reportada en animales (Schneider et al., 1990).

Los efectos de la toxicidad de NO_3^- en animales para la producción de carne y leche tienen como consecuencia una reducción en la tasa de crecimiento, la reducción en la producción de leche, incremento en la susceptibilidad a infecciones y abortos (Schneider et al., 1990). La utilización de forrajes para alimento con altas concentraciones de NO_3^- , puede causar toxicidad en rumiantes. La dieta de vacas de carne en embarazo no debe exceder la mitad de esta concentración. En cuanto al agua potable para los animales, puede haber toxicidad al estos ingerir cantidades de agua con una alta concentración de NO_3^- -N (Schneider et al., 1990).

3.3. Industria de producción de hortalizas

3.3.1. Importancia económica

En Puerto Rico para el año 2009-2010, el ingreso bruto agrícola (IBA) total fue estimado en \$785.5M, del cual el IBA en el renglón de hortalizas fue de \$56.8M, contribuyendo a un 13.8% del IBA total. Para estos años la producción de cebolla (*Allium cepa* L.) fue de 42,218 qq para un IBA de \$1.1M, la producción de calabaza (*Cucurbita moschata* L.) fue de 191,779 qq para un IBA de \$4.1M, la producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) fue de 400,709 qq para un IBA de \$35.7M y la producción de pimiento (*Capsicum annum*) fue de 30,209 qq para un IBA de \$3.3M. Estos cultivos en combinación contribuyeron a un 55% del IBA total para la producción de hortalizas (Departamento de Agricultura, 2011a).

Los cultivos de tomate, calabaza, y cebolla ocupan los primeros lugares en importancia económica entre las hortalizas que se siembran comercialmente en Puerto Rico. De estos, el tomate y la cebolla son las hortalizas que más se importan en P.R. La producción de tomate se concentra en la zona sur de la isla en los proyectos localizados entre Juana Díaz, Santa Isabel, Salinas y en el pueblo de Guánica. En la calabaza las importaciones representan solo un 8%, mientras que la producción local representa un 92% del total disponible para consumo. En P.R. la producción comercial de calabaza proviene de los proyectos de la costa sur (64.5%), Guánica (21.6%) y de otros proyectos privados en la isla (13.9%).

3.3.2. Incidencia de la producción de hortalizas en las pérdidas de N

En los últimos años la producción de hortalizas a ido en aumento. El Departamento de Agricultura de Puerto Rico (Departamento de Agricultura, 2011b), reportó que para el año 2010, el IBA de la producción de hortalizas aumentó en un 61% con relación al año 2009. El N es un

nutriente importante en la producción de hortalizas, tanto para el rendimiento como para la madurez del cultivo. El N es también un factor importante desde el punto de vista ambiental. Altos niveles de salinidad y de NO_3^- en aguas subterráneas han sido reportados en zonas productoras de hortalizas (Cepilecha et al., 2004). En sistemas de producción de hortalizas se tienden a utilizar altos niveles de aplicación de N para lograr mayores rendimientos, generando N residual en el perfil del suelo el cual puede ser perdido al ambiente.

Se utilizan niveles de aplicación de sobre 200 kg N/ha, con la meta de incrementar el rendimiento y el tamaño del bulbo de la cebolla en EE. UU. (Bartolo et al., 1997). En la zona sur de Puerto Rico los agricultores de cebolla típicamente utilizan dosis entre 175 y 230 kg N/ha (Colberg y Beale, 1991; EEA-UPR, 2012). En el suroeste y en la zona central de Florida productores de tomate utilizan aplicaciones de entre 230 y 560 kg N/ha (Csizinsky y Schuster, 1982) para asegurar altos rendimientos. En un estudio en Lajas se encontró que la dosis de aplicación de N óptima para tomate varió entre 143 y 165 kg N/ha (Sotomayor-Ramírez et al., 2010). Los productores de calabaza utilizan aplicaciones de entre 150 y 225 kg N/ha (EEA-UPR, 2012; Swiader et al., 1988) para lograr buenos rendimientos y tamaño del fruto. La eficiencia de utilización de N (NUE) en vegetales es bajo, siendo en cebolla alrededor de un 15% (Halvorson et al., 2002), y en tomate alrededor de 27%, por lo que se requieren altas dosis de N para optimizar el rendimiento de los cultivos (Sammis, 1997).

Las altas dosis de aplicación incrementan el contenido de sales en el suelo y el NO_3^- residual en el suelo (Csizinsky y Schuster, 1982). Cultivos como la cebolla tienen un sistema radicular poco profundo (<60 cm) y requieren irrigaciones frecuentes (Schwartz y Bartolo, 1995). El tipo de irrigación utilizado en la producción de hortalizas en Puerto Rico es el riego por goteo. Estudios demuestran que niveles de NO_3^- -N residual en el suelo son mayores cuando se

utiliza riego por goteo (Halvorson et al., 2008). Niveles excesivos de nutrientes hacen que disminuya el uso eficiente por la planta, haciendo disponible mayor NO_3^- para escorrentía y lixiviación (Doss et al., 1975). En lugares productores de calabaza la concentración de NO_3^- en aguas superficiales fue mayor de $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ en más del 30% de los lugares muestreados (David et al., 1997).

En la producción de tomates, rutinariamente se aplican altas dosis de N en intentos de maximizar los rendimientos (Anderson et al., 1999). La calidad del agua se pone en riesgo debido a los flujos de N provenientes de estos sistemas de producción (Tan et al., 2002). Por tales razones existe la necesidad de evaluar la magnitud de las pérdidas de N provenientes de los sistemas agrícolas.

3.4. Evaluación de las pérdidas de nitrógeno

Para maximizar el uso eficiente de nutrientes hay que considerar la relación entre el suelo, el cultivo, el clima y la hidrología del lugar, y asegurarse que las prácticas de manejo del riego y la aplicación de fertilizantes son adecuadas (Delgado et al., 2006). El productor puede minimizar las pérdidas de nutrientes y maximizar su uso eficiente. La complejidad que tiene el ciclo de N dificulta grandemente el poder estimar estas pérdidas en los sistemas de producción. Por tal razón existe la necesidad de usar herramientas más rápidas y efectivas para evaluar los efectos de las prácticas de manejo empleadas en las pérdidas de N. Hoy día se han desarrollado varios modelos de simulación que estiman las pérdidas de N según las condiciones del lugar y las prácticas de manejo que se utilizan. El uso de modelos de simulación es la mejor forma de evaluar las pérdidas de N en sistemas de producción debido a que ejecutan estimaciones de una forma rápida y acertada. Basado en insumos numéricos y no numéricos estos modelos de

simulación rápidamente conducen salidas cuantitativas y cualitativas para evaluar las pérdidas de N al ambiente.

3.4.1. Modelos de simulación

Se han desarrollado varios modelos de simulación para estimar pérdidas de nutrientes de los predios agrícolas. Modelos como el NTT, NLEAP y N-Index pueden ser utilizados para realizar evaluaciones de las pérdidas de N al ambiente y evaluar distintos escenarios con distintas prácticas de manejo alternativas que ayuden a reducir estos flujos (De Paz et al., 2009). Estos modelos de simulación difieren en su nivel de complejidad y permiten evaluar diferentes escenarios y prácticas de manejo para maximizar el uso eficiente de N en los predios agrícolas. Los mismos contribuyen a tomar decisiones que puedan reducir las pérdidas de N y reducir el impacto ambiental. Schaffer y Delgado (2002) describen en detalle varios niveles de modelamiento utilizados para evaluar el efecto de fertilizantes nitrogenados y N en el suelo en sistemas de producción agrícola.

3.4.2. Índice de Nitrógeno

El N-Index es capaz de predecir la dinámica del flujo de N en sistemas de producción agrícola para diferentes escenarios y cultivos. Este modelo tiene la capacidad de evaluar los riesgos de los efectos del manejo de N y sus pérdidas al aire, en la superficie y por lixiviación. El N-Index predice pérdidas cuantitativas anuales de N a través de las diferentes vías. Este modelo puede ser aplicado para analizar simulaciones de los predios agrícolas e identificar cuál de las vías de pérdida de N es la más importante. Las simulaciones pueden realizarse en varias localidades, puede usarse para identificar regiones con alto riesgo de pérdidas de N (Delgado et al., 2006). Así mismo, en el modelo se pueden construir escenarios para evaluar alternativas

potenciales para minimizar los flujos de N al ambiente y reducir el impacto ambiental. Este modelo es un programa basado en selecciones de un menú en cada parámetro que el modelo toma en consideración, para facilitar la entrada de información de una forma rápida. En cuestión de minutos se puede entrar todos los datos requeridos por el modelo para cada parámetro. Una vez se ejecuta la rutina el modelo cataloga estas pérdidas en un índice de "muy bajo", "bajo", "medio", "alto" o "muy alto". De esta forma se puede evaluar el uso eficiente de N en los sistemas de producción.

Versiones de este modelo han sido probadas y adaptadas en la región Mediterránea (De Paz et al., 2009), California (Wu et al., 2005), Canadá (OMAFRA, 2003), México (Figueroa-Viramontes et al., 2011) y en Noroeste de los Estados Unidos (Van Es et al., 2002). Estos grupos han encontrado buenos resultados en las predicciones del modelo; otras versiones en Bolivia y Ecuador están actualmente en desarrollo. Un manual del Índice de nitrógeno ver. 4.3.2 ha sido publicado (Delgado et al., 2010) y para la versión 4.4 por Delgado et al. (2011) para los usuarios. Figueroa-Viramontes et al. (2011). desarrollaron otro manual adaptado para la versión de México. Estos índices han sido desarrollados como modelos independientes para cada localidad. Se desarrolló un prototipo de este modelo para el Caribe conocido como el índice de nitrógeno del Caribe el cual está siendo probado para comprobar su funcionalidad y adaptabilidad a las condiciones del Caribe (Delgado et al., 2011).

Esta versión N-Index del Caribe presenta algunas limitaciones ya que no ha sido probado bajo condiciones del trópico. La base de datos del modelo solo posee forrajeras, por lo que si se trabaja con otros cultivos, el usuario debe proveer al modelo la información acerca del cultivo con el cual trabaja, requerida por el modelo para ejecutar las estimaciones. Para más detalle sobre la información requerida por el modelo para un cultivo que no está en la base de datos

favor ver de la guía del usuario la sección 15, valores personalizados del cultivo (Delgado, 2010). Para utilizar este modelo como una estrategia de evaluación de pérdidas de N para mejorar las prácticas de manejo, es necesario validar el mismo en la localidad en la que se trabaja para asegurarse que el modelo brinda estimaciones que son confiables. Esto requiere toma de datos en campo para comparar con las salidas del modelo.

4. Metodología:

4.1. Área de estudio

Valle de Lajas. El Valle de Lajas es una reserva agrícola (LPRA 277, 1999), y es uno de los recursos agrícolas más importantes del país por su gran potencial de desarrollo. La zona tiene suelos fértiles, buena disponibilidad de agua, temperaturas favorables y el potencial para mecanización (USDA-SCS, 1965; Lugo-López, 1995). El valle se encuentra cerca de 17°58'50.21" N y 66°54'00.09" O al suroeste de P.R. el cual se extiende por cinco municipios, pero principalmente en Lajas y Guánica. El Valle varía en elevación de alrededor de 13 m sobre el nivel del mar (SNM) a lo largo de este a oeste y desciende hacia el este donde el nivel más bajo está a 1.1m (SNM), cerca de la antigua Laguna de Guánica. El área tiene dos picos de precipitación máxima durante agosto a principios de diciembre y de abril a junio, cuya precipitación anual promedio de 1982 a 1986 es de 1524 mm (Bonnet y Tirado-Sulsona, 1950; U.S. Department of Commerce, 1986).

En general, los suelos son considerados de alta fertilidad, arcillosos, con una capacidad de drenaje de media a baja (Lugo-López y Pérez-Escolar, 1959; Lugo-López et al., 1959). Las series de suelo predominantes en el area son: Aguirre (Very-fine, smectitic, isohyperthermic Sodic Haplusterts), Cartagena (Fine, mixed, superactive, isohyperthermic Sodic Haplusterts), Fé

(Fine, smectitic, isohyperthermic Sodic Haplusterts), Fraternidad (Fine, smectitic, isohyperthermic Typic Haplusterts) y Guánica (Fine, smectitic, isohyperthermic Typic Calciaquerts) (USDA-NRCS, 2008).

El valle tiene un área de 41,000 ha (101,270 acres), en las cuales operan sobre 250 agricultores. En el área existen sistemas de producción de vegetales, hortalizas, forrajes y ganado de leche. El 43% de los productores de forrajes en Puerto Rico están localizados en el Valle de Lajas. La producción de vegetales se lleva a cabo en cerca de 300 ha (740 ac) operadas por 16 agricultores, principalmente en la parte este del Valle de Lajas cercano a Guánica (Sotomayor-Ramírez y Pérez-Alegría, 2012). Para incrementar los rendimientos de los cultivos hortícolas los agricultores de esta área utilizan altas dosis de fertilizantes nitrogenados. El consumo de N en áreas utilizadas para producción de vegetales y cultivos hortícolas, fluctúa entre 112 a 252 kg N/ha (100 a 225 lb N/acre) (Sotomayor-Ramírez y Pérez-Alegría, 2012).

Se escogió una localidad dentro del Valle de Lajas (Fig. 1); en el área del pueblo de Guánica, ya que es una de las áreas de gran producción de hortalizas, para hacer una evaluación de las prácticas de manejo que son empleadas. El modelo de simulación N-Index se utilizó para realizar evaluaciones en predios demostrativos para evaluar la magnitud de las pérdidas de N al ambiente. El modelo se probó en una rotación de cebolla con calabaza y siembras de pimiento, cebolla y tomate, para validar su aplicabilidad y adaptación a esta área del Valle de Lajas.

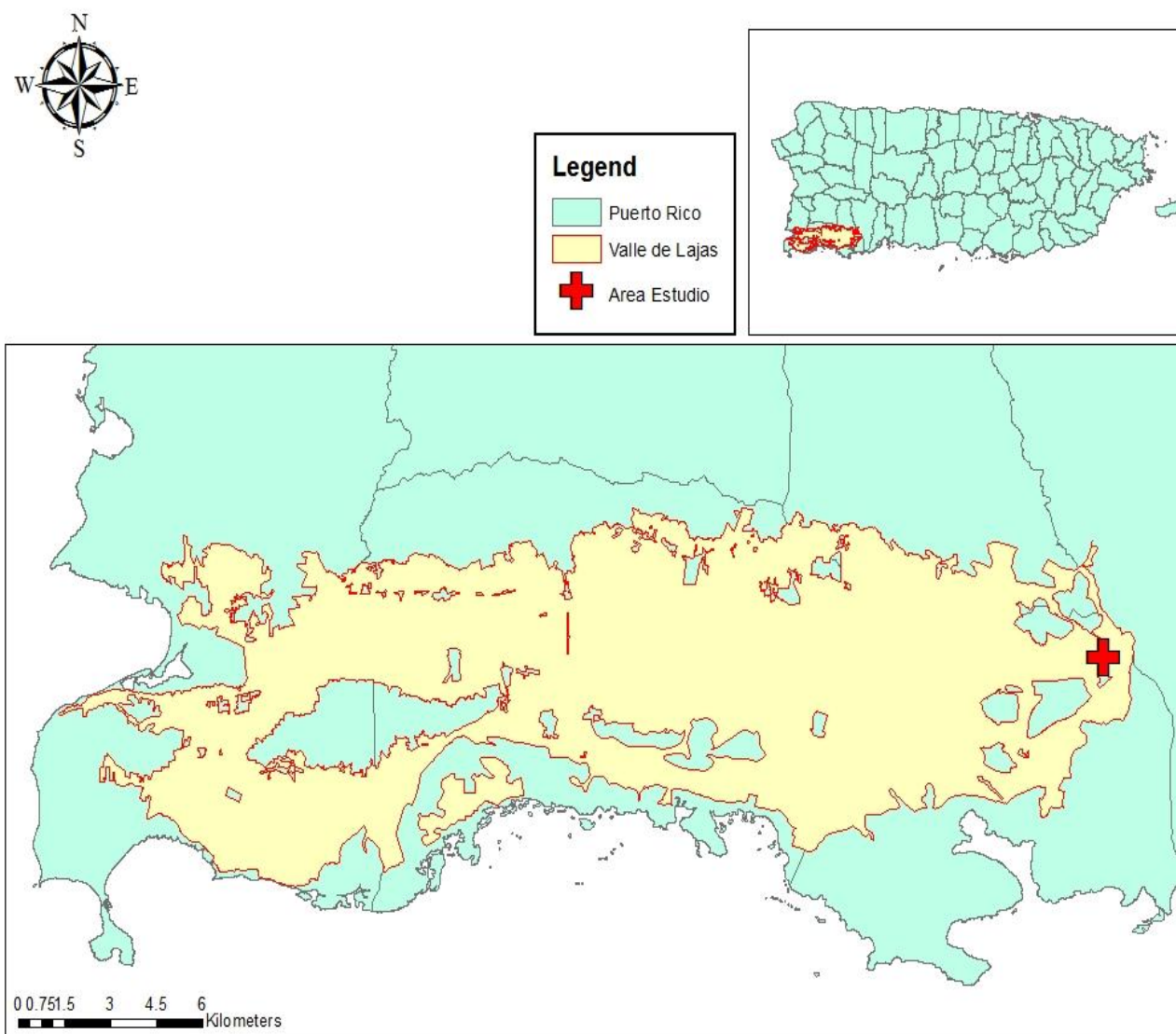


Figura 1. Localización de la finca seleccionada (marca roja) dentro del Valle de Lajas en el pueblo de Guánica para el estudio de validación y uso del modelo N-Index.

Descripción de la localidad. Se seleccionó la finca del agricultor Carlos González, la cual está ubicada en la carretera #334 km 0.5 en el barrio La Luna del pueblo de Guánica. Las series de suelos predominantes en el área son Guayacán Clay (GyB) y Melones Clay (MnC) (Figura 2).

En esta finca se producen cultivos como el pepinillo (*Cucumis sativus* L.), sandía (*Citrullus lanatus* T.), calabaza (*Cucurbita moschata* D.), durante el verano, papaya (*Carica papaya* L.) durante casi todo el año y tomate (*Solanum lycopersicum* L.), cebolla (*Allium cepa* L.) durante el invierno. La misma tiene un área de alrededor 39 ha (96 ac) de las cuales aproximadamente 9.7 ha (24 ac) son sembradas en cebolla, 4.9 ha (12 ac) en pimiento, 3.2 ha (8 ac) en tomate, 1.6 ha (4 ac) en papaya, 13 ha (32 ac) en calabaza, 4.9 ha (12 ac) en pepinillo y 1.6 ha (4 ac) en sandía, al año (comunicación personal, C. González, 2013).

Cuadro 1. Localización y características climáticas de la finca seleccionada para la investigación.

| Localidad | Latitud (Norte) | Longitud (Oeste) | Elevación (m) | Precipitación (mm) | Temperatura media anual (°F) | Cultivo |
|-------------|-----------------|------------------|---------------|--------------------|------------------------------|---|
| Guánica, PR | 18° 01'37.60" | 67° 03'29.0" | 22.86 | 998 | 89.9 | Cebolla Calabaza Pimiento Tomate |

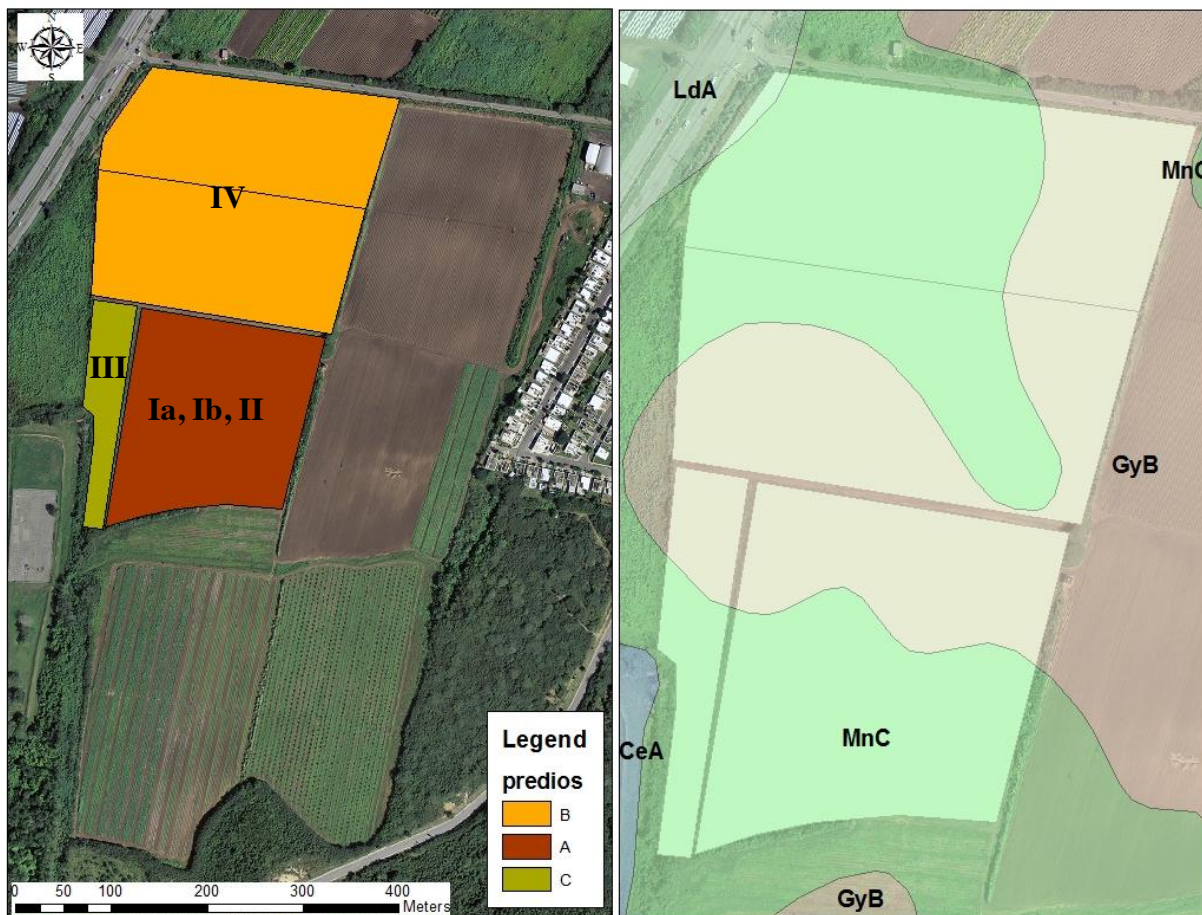


Figura 2. Predios establecidos para las siembras; (A) Ia, Ib y II; (C) siembra III y (B) siembra IV y la distribución de las series de suelo en los predios.

4.2. Estudio de campo

Descripción de las siembras establecidas. Se estableció una primera siembra con una rotación de cebolla-calabaza (siembra Ia y Ib) y otras siembras con cultivos de pimienta (II), tomate (III) y cebolla (IV). Para la siembra I se seleccionó el cuadrante noroeste de 0.6 ha (1.5 acre) de un predio de aproximadamente 2.43 ha (6 acres), que fue sembrado con el cultivo de cebolla (var. Mercedes). El agricultor usualmente logra un rendimiento de 34,090 kg/ha (600 a 700 sacos de 50 lbs/saco) y ha registrado un rendimiento máximo de 51,136 kg/ha (900 sacos de 50 lbs/saco). La siembra de cebolla en esta finca se realiza en bancos de ocho hileras (6.5" entre

hileras, 2.75" entre plantas). Los bancos tienen un ancho de 1.37m (4.5 pies) y una distancia entre banco de 1.83m (6 pies). La densidad de plantas óptima es de 614,818 plantas/ha (248,914 plantas/acre). La germinación típica es entre un 60 a un 80%. Cada banco tiene dos cintas de riego y cuatro hileras entre las cintas. Los bancos se preparan y simultáneamente se aplica un abono base granulado incorporado al banco. La siembra de la cebolla se realiza de dos a cuatro semanas después de la preparación de los bancos. Para la producción de la cebolla, la aplicación de fertilizantes típica del agricultor es de 213 kg N/ha (190 lb N/ac), con 11% (23.43 kg N/ha) (20.9 lb N/ac) del N total aplicado al momento de la siembra y el restante en forma de fertigación. Se realizan fertilizaciones dosificadas semanales durante 10 semanas. Después de la cosecha de la cebolla (siembra Ia), se estableció una siembra de calabaza (var. Soler) (siembra Ib) en el mismo predio utilizado. La siembra se realizó por transplante en la etapa de dos hojas a 1.8 m (6 ft) entre plantas para una densidad optima de 2,989 plantas/ha (1,210 plantas/acre). Para la calabaza, usualmente se siembran cinco bancos y se dejan dos bancos seguidos libre para un mejor manejo. El tiempo típico de transplante de la calabaza hasta la cosecha usualmente varía de 105 a 120 días.

El cultivo de cebolla fue sembrado el 22 de octubre de 2012, una semana después de la preparación de los bancos y fue cosechada el 1 de marzo de 2013. La calabaza fue transplantada el 15 de abril de 2013 y cosechada el 19 de julio de 2013. El predio se mantuvo en barbecho hasta la próxima temporada de cultivo.

Las siembras II, III y IV fueron predios comerciales establecidos durante el 2013 al 2014 por el agricultor con los cultivos de pimiento, tomate y cebolla, respectivamente. Para la siembra II se establecieron bancos de 0.9m (3 pies) de ancho con una distancia de 1.8m (6 pies) entre bancos. Cada banco constaba con dos hileras a una distancia de 0.9m (3 pies) entre hileras y

0.3m (1 pie) entre plantas con una población de 35,963 plantas/ha (14,560 plantas/acre). La siembra del pimiento se realizó por transplante de dos a cuatro semanas después de la preparación de los bancos. La siembra III se realizó de la misma forma que la siembra II, a diferencia que cada banco constaba de una hilera a una distancia de 0.6m (2pies) entre plantas, para una población de 8,966 plantas/ha (3,630 plantas/acre). En ambas siembras cada banco constaba con una cinta de riego de igual especificación a las utilizadas en la siembra I. La siembra IV fue realizada de igual manera a la siembra I.

Descripción de los tratamientos. En la siembra I se evaluó el efecto de tres niveles de fertilizante nitrogenado; N1, 140 kg N/ha (125 lb N/ac); N2, 196 kg N/ha (175 lb N/ac); N3, 252 kg N/ha (225 lb N/ac) sobre el rendimiento de la cebolla. Para el cultivo de la calabaza se aplicaron tres niveles de nitrógeno, N1, 112 kg N/ha (100 lbs N/ac); N2, 196 kg N/ha (175 lbs N/ac); y N3, 280 kg N/ha (250 lbs N/ac). El abono pre-siembra en la cebolla consistió de fertilizante granular aplicado a los bancos a un nivel de 224 kg/ha (200 lb/ac) con formulación 10-5-10 (N-P₂O₅-K₂O) para los tres tratamientos. La diferencia entre la meta de aplicación y el N aplicado como abono base se aplicó por fertigación. Las fuentes de N por fertigación fueron urea, sulfato de amonio (SA) y nitrato de potasa (NP) (12-0-45) a una proporción de N 50:25:25 (urea-N, SA-N, NP-N). Se dosificaron las fuentes de N en proporciones variables según las etapas de crecimiento del cultivo. Para el cultivo de la cebolla el N se aplicó distribuido en 10 aplicaciones semanales comenzando una semana después de la siembra de la cebolla. Para la calabaza se realizaron 8 aplicaciones bisemanal luego del trasplante de las plántulas. Todos los tratamientos recibieron los mismos niveles de P y de K.

En las siembras II y III no se aplicó un abono pre-siembra, por lo que el agricultor aplicó el 100% de la meta de aplicación por fertigación a un nivel de 274 kg N/ha (245 lbs N/ac).

Las fuentes de N por fertigación fueron urea y nitrato de potasa (NP) (12-0-45) a una proporción de N 75:25 (urea-N:NP-N). El N se aplicó distribuido en 22 aplicaciones semanales comenzando una semana después del transplante. Ambas siembras recibieron el mismo nivel de P y de K. En la siembra IV el nivel de aplicación utilizado por el agricultor fue de 188 kg N/ha (168 lbs N/ac), se utilizó urea y NP como las fuentes de N a una proporción de 75:25 (urea-N:NP-N). El N se aplicó distribuido en 12 aplicaciones semanales comenzando una semana después de la siembra.

Aplicación de los tratamientos. En la siembra I cada banco tenía dos líneas de riego por goteo con un flujo de 0.576 L/min (0.5 gal/min 100ft) a una presión de 69 KPa (10 psi) con una distancia entre emisor de 30.5 cm (1 pies). En el diseño experimental se estableció un sistema de riego independiente del utilizado por el agricultor para realizar las aplicaciones de los tratamientos. El sistema constaba de tres líneas individuales, con una llave de pase cada una para asegurar la aplicación individual del tratamiento a cada zona. En la preparación de las dosis se utilizaron tres contenedores con capacidad de 0.13m³ (30 gal), en los cuales se diluían las cantidades de fertilizante a aplicarse cada semana. El predio recibía un pre-riego el día antes de la aplicación, el próximo día se aplicaba riego durante unos 15 minutos y se realizaban las fertigaciones individualmente a cada cuadrante durante unos 30 minutos. Luego de la fertigación se le aplicaba riego durante otros 15 minutos, para asegurar que la tubería estuviese limpia y no quedaran residuos del tratamiento anterior en el sistema de distribución. La fertigación se realizaba utilizando una bomba de inyección calibrada modelo "E-Z Meter Injection Pump" (CDS-John Blue Company, North Carolina).

En las siembras II, III y IV el sistema de riego tenía las mismas especificaciones que en la siembra I, a diferencia que las aplicaciones de los tratamientos fueron realizadas por el agricultor.

Variables agronómicas tomadas. En todas las siembras se realizó un muestreo de suelos en las parcelas establecidas antes de la siembra de los cultivos y después de la cosecha, a profundidades de 0-15, 15-30, 30-60 y 60-90cm (hasta 3ft de profundidad). Las muestras fueron enviadas a AgSource Laboratories (Lincoln, NE) para análisis de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ y $\text{NO}_3^-\text{-N}$ extraíble con 1M KCl. Se cuantificó la extracción de nutrientes por parte de los cultivos como el producto de la concentración de nutriente y la materia seca del fruto. La absorción de nutrientes incluye el nutriente utilizado en el fruto más aquel en la biomasa vegetal. Estos parámetros fueron calculados en lbs N/ac para validar las estimaciones por parte del modelo. En la siembra I se tomó una serie de medidas agronómicas, cuyos resultados fueron reportados por Sotomayor-Ramírez et al. (2014). De las medidas agronómicas tomadas en la siembra I se utilizaron los datos de N inorgánico en el suelo, valores de rendimiento de los cultivos, contenido de humedad de los cultivos, y la absorción de N por cada cultivo para hacer las simulaciones con el modelo N-Index. En las siembras II, III y IV, se tomaron los mismos datos necesarios para correr el modelo en parcelas establecidas. El rendimiento de los cultivos fue recolectado en la cosecha en cada parcela establecida. Los datos de N inorgánico en el suelo y la absorción de N por los cultivos fueron tomados de igual manera a la siembra I en las parcelas establecidas. Un procedimiento similar al realizado por Shumway et al. (2012), en el cual validó el modelo en siembras establecidas en la Universidad de Arkansas durante el 2008 con los cultivos de algodón (*Gossypium hirsutum* L.) y maíz (*Zea mays* L.)

Información de manejo. Las prácticas de manejo tales como preparación de terreno, siembra, irrigación, control de malezas, control de plagas, etc. fueron las acostumbradas por el agricultor. Las fechas de riego y niveles de riego, fechas de aplicación de fertilizante-N, fuente, cantidad, rendimiento y otra información sobre prácticas de manejo utilizadas por el agricultor,

así como también información acerca de la localidad fué recolectada de la base de datos del agricultor.

Información climatológica. Datos de clima tales como cantidad de lluvia mientras el cultivo no está en crecimiento y mientras el cultivo si está en crecimiento, fueron colectados de la estación meteorológica más cercana a la localidad de estudio (Anejo 8). Para las variables climáticas entradas al modelo se usaron datos de precipitación históricos de 10 años, ya que se ha reportado (Delgado et al., 2008) que el modelo ejecuta mejores estimaciones utilizando datos históricos de precipitación. Datos de precipitación por mes del 1971-2000 fueron obtenidos de una de las estaciones de la NOAA cercanas a la localidad (Disponible gratuitamente en <http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=20341>).

4.3. Aplicación del modelo N-Index a los predios demostrativos

4.4. Metodología de simulación y parámetros de entrada¹

El modelo de simulación N-Index es utilizado para simular las pérdidas de N al ambiente (transporte superficial, desnitrificación, lixiviación y volatilización) y su magnitud. El modelo genera evaluaciones anuales de cada mecanismo de pérdida. Se generaron los parámetros iniciales de entrada requeridos por el modelo. Estos parámetros están basados en la información del suelo, el tipo de cultivo, los planes de fertilización, el riego aplicado, la hidrología de cada predio establecido, entre otros factores que describen el manejo y las características de los predios establecidos en ambas localidades. (Disponible en www.ars.usda.gov)

¹ El modelo utiliza sistema de unidades inglés por lo que en los resultados se incluyen las unidades en sistema inglés en paréntesis para mejor entendimiento de los usuarios del modelo.

Todos los datos de entrada al modelo fueron recolectados de los sistemas de producción de hortalizas establecidos en la localidad mencionada, para poder entrarlos al modelo de simulación y evaluar los sistemas de producción con el modelo N-Index (Cuadro 2).

Cuadro 2. Parámetros de entrada recopilados para correr el modelo en la localidad con cada cultivo en específico¹.

| Parámetros de entrada | Siembra | | | | |
|--|----------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| Información del suelo | Ia | Ib | II | III | IV |
| Profundidad (ft) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Materia orgánica (%) | 2.33 | 2.35 | 2.35 | 2.35 | 2.35 |
| NO ₃ -N (ppm) | 38.33 | 75.50 | 37.33 | 69.33 | 80.75 |
| NH ₄ -N (ppm) | 5.03 | 2.53 | 3.23 | 3.13 | 2.00 |
| Densidad aparente (g/cm ³) | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.20 |
| pH | 8.20 | 8.03 | 8.00 | 8.00 | 8.00 |
| Fertilizante | | | | | |
| Fuente | * | * | ** | ** | ** |
| Lluvia/Riego (in) | 1/4 | 1/4 | 1/4 | 1/4 | 1/4 |
| Cantidad ¹ (lbs N/ac) | 125 | 100 | 245 | 245 | 168 |
| AVC ² | Default | Default | Default | Default | Default |
| Aplicación dividida | si | si | si | si | si |
| Riego | | | | | |
| Tipo | Goteo | Goteo | Goteo | Goteo | Goteo |
| Pre-siembra (in) | 0.00 | 8.26 | 6.90 | 6.90 | 5.48 |
| Post-siembra (in) | 8.26 | 6.90 | 9.50 | 8.30 | 9.46 |
| Concentración NO ₃ -N (ppm) | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| Cultivo | | | | | |
| Cultivo | Cebolla | Calabaza | Pimiento | Tomate | Cebolla |
| Rendimiento ³ | 40.17 | 36.42 | 72.1 | 39.3 | 39.9 |
| Unidad | Ton | Ton | Ton | Ton | Ton |
| Peso/Unidad | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| %H ₂ O ⁴ | 92.2 | 83.4 | 92.0 | 94.0 | 92.0 |
| NUI ⁵ | 3.1 | 5.8 | 2.7 | 4.1 | 3.3 |
| Residuos | n/a | n/a | n/a | n/a | n/a |
| Factores off-site | | | | | |
| Tiempo al acuífero | Largo | Largo | Largo | Largo | Largo |
| Posición del acuífero | Profundo | Profundo | Profundo | Profundo | Profundo |
| Vulnerabilidad del acuífero ⁶ | IIB | IIB | IIB | IIB | IIB |
| N atmosférico anual (lbs N/ac) | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8 |
| Coefficiente desnitrificación | 8.0 | 8.0 | 8.0 | 8.0 | 8.0 |
| Constante k | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| Hidrología | | | | | |
| Grupo hidrológico | C | C | C | C | C |

| | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Precipitación cultivo en crecimiento (in) | 12.82 | 10.18 | 14.1 | 14.1 | 12.82 |
| Precipitación sin cultivo en crecimiento (in) | 21.18 | 23.82 | 19.9 | 19.9 | 21.18 |
| Clima | Seco | Seco | Seco | Seco | Seco |
| Cuadro 2 (continuación) | | | | | |
| | Buen drenaje | Buen drenaje | Buen drenaje | Buen drenaje | Buen drenaje |
| Características hidrológicas | | | | | |
| Factores cualitativos | | | | | |
| Barrera vegetativa | NO | NO | NO | NO | NO |
| Proximidad a cuerpo de agua | Medio | Medio | Medio | Medio | Medio |
| Clase de escorrentía ⁷ | VL | VL | VL | VL | VL |
| Profundidad de raíces ⁸ | SDM | SDM | SDM | SDM | SDM |
| Erosión de suelo | VL | VL | VL | VL | VL |
| Taza de aplicación de N ⁹ | UPR | UPR | UPR | UPR | UPR |
| Volatilización NH ₃ ¹⁰ | INC+IRR | INC+IRR | INC+IRR | INC+IRR | INC+IRR |
| Manejo de riego | SI | SI | SI | SI | SI |
| Tipo de riego | Goteo | Goteo | Goteo | Goteo | Goteo |

*Fuentes usadas: Urea, Sulfato de amonio, Nitrato de potasa (12-0-45).

**Fuentes usadas: Urea, Nitrato de potasa (12-0-45).

¹Cantidades usadas: cebolla-125, 175, 225; calabaza-100, 175, 250; pimiento-245; Tomate-245; cebolla-168.

²AVC- Coeficiente de volatilización.

³Medias de los rendimientos medidos para cada cultivo en los replicados establecidos.

⁴Medias del contenido de humedad de cada cultivo.

⁵Medias del NUI para cada cultivo en los distintos replicados. Representa el N absorbido por unidad de rendimiento.

⁶Potencialmente agua potable.

⁷VL-muy poca

⁸Múltiples poco profundas.

⁹Dosis de nutrientes recomendadas por la UPR-EEA.

¹⁰Fertilizante incorporado más riego aplicado o precipitación recibida.

4.5. Salidas del modelo de simulación N-Index.

Luego de entrar los datos para los parámetros requeridos por el modelo, el mismo genera un análisis cuantitativo y cualitativo, y genera un reporte. En este reporte, el modelo presenta los cálculos ejecutados de acuerdo a las diferentes variables de los parámetros de entrada. El modelo calcula (i) el N total en el sistema; que incluye todas las fuentes de N que hay en el sistema o que son añadidas (insumos de fertilizantes inorgánicos, N inorgánico inicial, mineralización de N, deposición atmosférica de N, residuos del cultivo, nitratos y N inorgánico presentes en el agua de riego), (ii) la volatilización de amonio, (iii) la desnitrificación, (iv) el N absorbido por el cultivo, (v) el índice de lixiviación, (el cual relaciona las condiciones climáticas que afectan la lixiviación de N en el suelo), (vi) el N total lixiviado, (vii) el N residual en el suelo, (viii) la eficiencia de uso de N del sistema de producción, (ix) la razón entre el N aplicado y el N removido por el cultivo.

El modelo contabiliza las pérdidas de N a través de las diferentes vías. Delgado et al. (2010) provee mayor detalles sobre las ecuaciones utilizadas en el modelo para estimar las diferentes pérdidas de N al ambiente y lo que significa cada nivel de riesgo.

Otra tercera sección que ejecuta el modelo es una evaluación económica. El modelo calcula el costo de la fertilización nitrogenada que resulta en pérdidas al ambiente mediante las diferentes vías. De acuerdo a las pérdidas de N calculadas por el modelo, el mismo contabiliza a cuánto dinero (\$/año) equivalen estas pérdidas del sistema de producción al ambiente.

En la parte cualitativa, el modelo evalúa las prácticas de manejo utilizadas en el sistema de producción, así como también las características del área y genera unas categorías de clasificación en las cuales clasifica los niveles de riesgo de pérdidas de N a través de los

diferentes mecanismos de pérdidas. Para cada parámetro de pérdida, el modelo asigna un valor de 0 a 8. Dependiendo de la puntuación total para cada mecanismo de pérdida, el modelo asigna niveles de riesgo "muy bajo", "bajo", "mediano", "alto" y "muy alto". Para cada mecanismo de pérdida el modelo asigna un factor de acuerdo a las variables de entrada y al finalizar realiza una sumatoria de los valores asignados a cada componente y categoriza el nivel de riesgo. El modelo representa el nivel de riesgo en un índice cualitativo. Delgado et al. (2006) provee más detalles de cómo el modelo asigna los valores a cada parámetro para calcular el índice.

4.6. Validación del modelo N-Index

La validación de un modelo es el proceso para probar cuán bien el modelo representa la realidad a un nivel de significancia dado; en este caso se utilizó un nivel de significancia de $p < 0.05$ (Chung, 2004). Para esto se realiza una comparación cuantitativa entre los valores experimentales y los valores predichos por el modelo. De no haber una diferencia significativa entre los conjuntos de datos a utilizarse en la validación, entonces el modelo es considerado válido. En la recolección de datos del sistema la mayor preocupación es coleccionar datos que verdaderamente representen el comportamiento del sistema bajo estudio. Los datos para la validación se obtuvieron de las observaciones realizadas en las distintas replicas establecidas en los distintos casos de estudio. Este enfoque es similar al utilizado por Delgado et al. (2001) y Shumway et al. (2012).

Se evaluaron los parámetros de N residual y N absorbido por el cultivo para hacer la validación del modelo. Se establecieron relaciones entre (i) los valores de N residual en el suelo estimado por el modelo versus los valores medidos de nitrógeno residual en el suelo luego de

cada cultivo y (ii) el nitrógeno extraído por el cultivo estimado por el modelo versus los valores medidos del nitrógeno extraído por el cultivo.

El desempeño de un modelo fue evaluado mediante cinco medidas estadísticas: (i) evaluaciones estadísticas de regresión lineal; (ii) coeficiente de correlación Pearson (r); (iii) raíz cuadrada del error de la media modelo (RMSE); (iv) eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE); (v) índices de error.

4.7. Métodos de evaluación para determinar su eficiencia y desempeño del modelo

Evaluaciones estadísticas de regresión estándar. Las evaluaciones estadísticas se realizaron mediante análisis de regresión lineal. La pendiente de esta línea indica la relación relativa entre los valores simulados y medidos. Una pendiente con valor de 1 y un intercepto de 0 indican que el modelo reproduce perfectamente las magnitudes de la data medida (Willmott, 1981). También se utilizó el coeficiente de determinación (R^2). Este coeficiente describe el grado de ajuste entre los datos medidos y los simulados. El R^2 indica el error que existe en la varianza de los datos. Valores de 0.5 o mayores son considerados aceptables en trabajos de simulación (Santhi et al., 2011; Van Liew et al., 2003). El coeficiente (r) fue utilizado para analizar la correlación entre los datos analizados en campos y los datos simulados por el modelo. Correlaciones positivas indican que el modelo demostró adecuadamente lo que se analizó en el campo. Mientras más alta es la correlación entre los datos evaluados, mejor es el desempeño del modelo hacia el parámetro evaluado.

Eficiencia Nash-Sutcliffe. La eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es un parámetro que determina la magnitud relativa de la varianza residual comparada con la varianza de los datos medidos (Nash y Sutcliffe, 1970). Este parámetro indica cuán bien el valor observado versus el

valor simulado se ajustan a la línea 1:1. La eficiencia NSE, fluctúa en un rango de negativo infinito a 1. Mientras más cercano a 1, más preciso es el modelo. Chung et al. (1999; 2002) establece que valores de $NSE > 0.3$ son considerados aceptables en trabajos de simulación, mientras que Ramanarayanan et al. (1997) y Adeuya et al. (2005) consideran aceptables valores de $NSE > 0.4$.

Índices de error. Las evaluaciones basadas en el índice de error como el porcentaje de sesgo (PBIAS) mide la tendencia promedio del modelo a sobre-estimar o bajo-estimar el valor medido (Gupta et al., 1999). PBIAS es la desviación del conjunto de datos evaluados expresada en porcentaje. Este estadístico es recomendado por su habilidad para indicar claramente el pobre desempeño del modelo; se establece como criterio que las estimaciones son aceptables si tienen un PBIAS de $\pm 70\%$ (Gupta et al., 1999). La razón entre RMSE/STDEV (RSR) es comúnmente utilizado como un índice de error, y varía de 0 a un valor positivo. Mientras más bajo el valor mejor es el desempeño del modelo, siendo 0 el valor óptimo. El error relativo (ER) indica el % de error sistemático en las predicciones del modelo. Se asume como aceptable un ER de alrededor 30%, mientras que un $ER > 50\%$ es considerado un error extremo en la estimación por parte del modelo (Niu et al., 2009).

La validación se llevó a cabo utilizando los conjuntos de datos simulados y analizados en los parámetros N residual en el suelo y N absorbido por los cultivos.

4.8. Análisis de sensibilidad

Modelos de simulación como el N-Index proveen una alternativa para monitorear posibles escenarios que puedan ayudar a reducir las pérdidas de N al medioambiente sin envolver el tiempo y costo que se necesita para probar los mismos escenarios en el campo. Una de las principales preocupaciones en estos modelos son; su respuesta a distintos parámetros de entrada y su sensibilidad para detectar cambios a distintos escenarios evaluados.

Al validar el modelo en la localidad con los distintos cultivos establecidos se probó la sensibilidad del modelo a distintos parámetros de entrada tales como; N aplicado y cantidad de riego aplicado y de esta forma probar cuan sensitivo es el modelo a variaciones en parámetros o insumos. Se seleccionó un predio al azar para conducir el análisis de sensibilidad. El análisis consistió en añadir hipotéticamente distintas dosis de aplicación de fertilizante-N y distintas cantidades de riego aplicado para observar si el modelo responde a cambios en estos parámetros.

Para el cultivo seleccionado, se condujeron simulaciones hipotéticas con cantidades de N y riego aplicado de $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ y $\pm 30\%$, sobre el valor inicial utilizado, dejando los demás insumos de entrada iguales. Se evaluó el efecto de estos casos hipotéticos de N/riego aplicado en las pérdidas de N al ambiente. Un procedimiento similar a Delgado et al. (2008) fue utilizado para realizar este análisis de sensibilidad.

4.9. Análisis estadístico

Se realizaron análisis de correlación pearson para demostrar si los valores analizados en campo se correlacionaban con los valores simulados por el modelo. Se realizaron análisis de regresión lineal para probar si existía una relación lineal entre los valores analizados en campo y los simulados por el modelo para los parámetros N residual en el suelo y N absorbido por el cultivo. Para comprobar si ambos conjuntos de datos eran estadísticamente similares se utilizó una prueba no paramétrica recomendada en trabajos de simulación conocida como Prueba de suma de rangos(Chung, 2004). Esta prueba no parametrica es utilizada cuando los datos a validar no son no cumplen con los supuestos de normalidad y homogeneidad de los datos. Las pruebas fueron realizadas en el programa estadístico Infostat (Infostat, 2008).

5. Resultados y Discusión

5.1. Rendimientos

Los rendimientos logrados en cada cultivo se muestran en el cuadro 3. Los rendimientos de cebolla estuvieron por encima en comparación a otros estudios realizados en la zona sur de Puerto Rico (Colberg y Beale, 1991), pero menores a estudios realizados en los Estados Unidos (Halvorson et al., 2008). Swiader et al. (1994) estudió la respuesta de la calabaza a aplicaciones de N, en el cual reportó rendimientos similares a los obtenidos. Los rendimientos estuvieron dentro de los rangos reportados por Román-Paoli et al. (2012) en un estudio realizado en Lajas y Juana Díaz. Estudios previos muestran rendimientos similares a los obtenidos en los cultivos de pimienta (Hartz et al., 1993), mientras que los rendimientos obtenidos en tomate son menores a los reportados por Hartz y Bottoms (2009) en un estudio realizado en la Universidad de California. En general, los rendimientos obtenidos fueron aceptables a nivel comercial en Puerto Rico.

Cuadro 3. Rendimientos logrados en cada cultivo con cada dosis de aplicación de N utilizada.

| Siembra | Cultivo | Dosis N -----kg N/ha----- | Rendimiento ¹ -----kg/ha----- |
|---------|----------|------------------------------|---|
| Ia | Cebolla | 140 | 37,466 |
| Ia | Cebolla | 196 | 40,031 |
| Ia | Cebolla | 252 | 43,007 |
| Ib | Calabaza | 112 | 29,274 |
| Ib | Calabaza | 196 | 15,126 |
| Ib | Calabaza | 280 | 44,645 |
| II | Pimiento | 275 | 74,492 |
| III | Tomate | 275 | 39,295 |
| IV | Cebolla | 188 | 40,168 |

¹Rendimiento mercadeable.

5.2 Nitrógeno en el perfil del suelo

En la siembra I los niveles de N inicial en el suelo (0-90 cm) variaron entre 189 a 554 kg N/ha (168 a 493 lbs N/ac), mientras que los niveles finales de N residual en el suelo variaron entre 7 y 167 kg N/ha (6 a 149 lbs N/ac). En la siembra II, III y IV; los niveles de N inicial en el suelo (0-90cm) variaron entre 7 a 185 kg N/ha (6 a 165 lbs N/ac), mientras que los niveles finales de N residual en el suelo fueron de 9 y 89 kg N/ha (8 a 79 lbs N/ac). Los resultados de las demás variables agronómicas tomadas y la evaluación sobre los distintos tratamientos sobre el rendimiento de los cultivos en la siembra I se reportaron en Sotomayor-Ramírez et al. (2014).

5.3.Comparacion de nitrógeno residual en el suelo medido vs. estimado

El N residual en el suelo predicho por el modelo fue de 198 ± 108^2 kg N/ha (176 ± 96 lbs N/ac) para cebolla, 101 ± 35^2 kg N/ha (90 ± 31 lbs N/ac) para calabaza, 175 ± 3^3 kg N/ha (156 ± 2 lbs N/ac) para pimienta y 104 ± 3^3 kg N/ha (93 ± 2 lbs N/ac) para tomate. El N residual medido fue de 274 ± 136^2 kg N/ha (244 ± 121 lbs N/ac) para cebolla, 124 ± 24^2 kg N/ha (110 ± 21 lbs N/ac) para calabaza, 141 ± 9^3 kg N/ha (126 ± 8 lbs N/ac) para pimienta y 149 ± 65^3 kg N/ha (133 ± 58 lbs N/ac) para tomate. La media de los valores predichos por el modelo 146 kg N/ha (130 lbs N/ac) fue estadísticamente similar ($p < 0.05$) a la media de los datos experimentales 172 kg N/ha (153 lbs N/ac). Se obtuvo un acuerdo cercano entre el N residual experimental y el simulado con un RMSE de 17 kg N/ha (15 lbs N/ac). Para cada sistema establecido con los distintos cultivos, el modelo predijo adecuadamente el N residual luego de la cosecha de cada cultivo. Las medias de los valores analizados y estimados por el modelo para cada cultivo establecido mostraron ser no

²Media \pm desviación estándar de los valores de N residual obtenidos en los tres niveles de aplicación de N utilizados en cebolla y calabaza.

³ Media \pm desviación estándar de los valores de N residual obtenidos en un nivel de aplicación de N.

significativamente distintas mediante una prueba no paramétrica (Apéndice 7), por lo que el modelo se ajusta y es válido para este parámetro (Cuadro 4).

Cuadro 4. Valores simulados por el modelo y medidos en campo para los parámetros a validar¹.

| Siembra ² | Dosis | N residual medido | N residual estimado | N absorbido medido | N absorbido estimado |
|----------------------|-------|----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| -----kg N/ha----- | | | | | |
| Ia | 140 | 308 | 167 | 111 | 125 |
| Ia | 196 | 474 | 401 | 128 | 135 |
| Ia | 253 | 299 | 204 | 152 | 157 |
| Ib | 112 | 149 | 155 | 218 | 214 |
| Ib | 196 | 102 | 64 | 153 | 157 |
| Ib | 281 | 121 | 106 | 280 | 312 |
| II | 275 | 150 | 174 | 214 | 230 |
| II | 275 | 132 | 179 | 192 | 205 |
| II | 275 | 141 | 173 | 221 | 235 |
| III | 275 | 149 | 104 | 161 | 180 |
| IV | 189 | 147 | 111 | 122 | 138 |
| IV | 189 | 146 | 107 | 136 | 154 |
| Media | | 193 | 161 | 174 | 186 |
| p<0.05 | | NS ³ | | NS | |

¹Cada valor representa la media de los replicados establecidos en cada siembra.

²Ia-cebolla, Ib-calabaza, II-pimiento, III-tomate, IV-cebolla.

³Prueba no-paramétrica fue no significativa (p<0.05)

Las estimaciones de N residual del N-Index se correlacionaron significativamente con los valores analizados en el campo ($r=0.88$, $p<0.05$, $n=12$). La comparación entre los valores de N residual analizados y estimados por el modelo presentado en la Figura 3 muestra que el análisis de regresión mostró un coeficiente de regresión no tan fuerte ($R^2=0.77$, $p<0.05$), pero aceptable en trabajos de simulación (Ramanarayanan et al., 1997; Chung et al., 1999; Adeuya et al., 2005). El modelo fue capaz de estimar el N residual promedio en el suelo después de la cosecha de los cultivos establecidos, el N residual medido fue 0.71x el valor estimado. Usuarios del modelo

pueden identificar aquellos sistemas de producción que representan altos riesgos a pérdidas de N, para así evaluar sus niveles de aplicación, prácticas de manejo y buscar alternativas para reducir altos el impacto ambiental. De modo que estén operando en sistemas agrícolas más seguros para el ambiente.

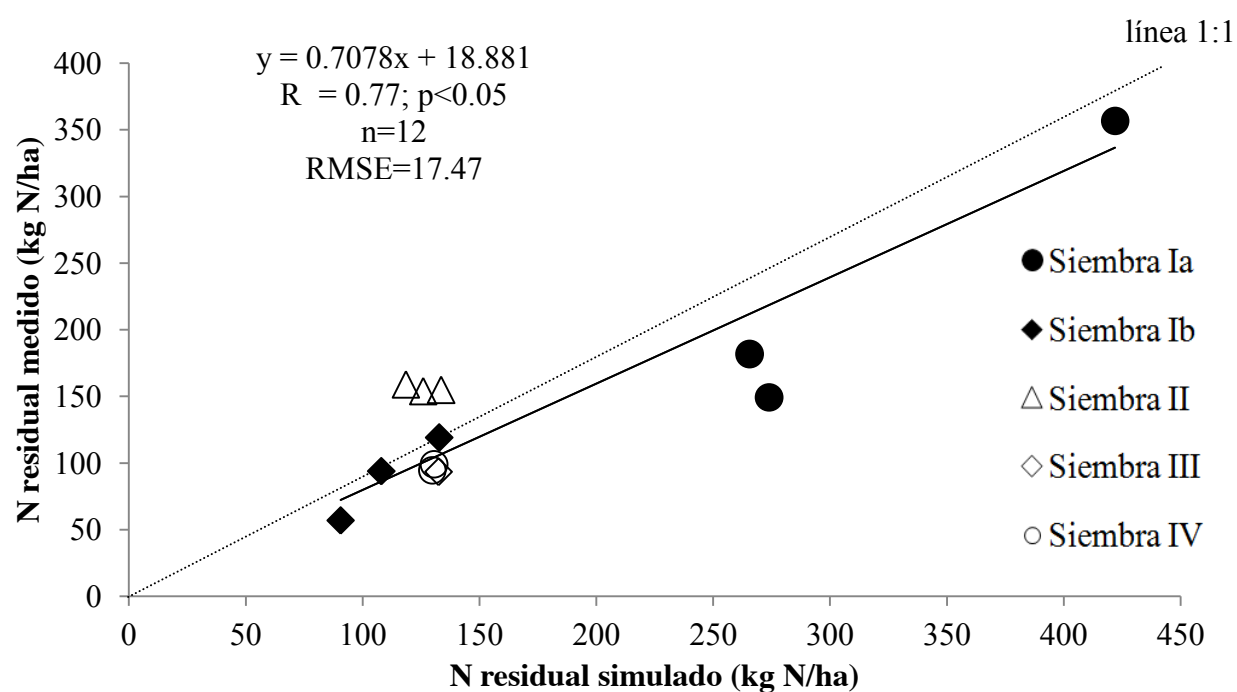


Figura 3. Relación entre valores analizados y estimados por el modelo Índice de N para el parámetro de N residual en el suelo luego de la cosecha de los cultivos⁴.

⁴ Cada valor representa la media de los replicados establecidos en cada cultivo.

5.4. Comparación de nitrógeno absorbido por el cultivo medido vs. estimado.

El N absorbido predicho por el modelo fue 141 ± 12^5 kg N/ha (126 ± 11 lbs N/ac) para cebolla, 228 ± 64^5 kg N/ha (203 ± 57 lbs N/ac) para calabaza, 223 ± 13^6 kg N/ha (199 ± 12 lbs N/ac) para pimiento y 180 ± 7^6 kg N/ha (160 ± 6 lbs N/ac) para tomate. El N absorbido medido fue de 130 ± 15^5 kg N/ha (116 ± 13 lbs N/ac) para cebolla, 217 ± 63^5 kg N/ha (193 ± 56 lbs N/ac) para calabaza, 209 ± 16^6 kg N/ha (186 ± 14 lbs N/ac) para pimiento y 161 ± 8^6 kg N/ha (143 ± 7 lbs N/ac) para tomate. La media de los valores estimados por el modelo 193 kg N/ha (172 lbs N/ac) fue similar a la media de los datos experimentales 179 kg N/ha (159 lbs N/ac, ± 23). En promedio los niveles de extracción para el cultivo de la cebolla fueron de 3.1 , 3.0 , 3.1 y 3.2 kg N/ton para los tratamientos 140 , 189 , 196 , y 253 kg N/ha, respectivamente. En calabaza fueron de 4.5 , 7.0 y 6.0 kg N/ton para los tratamientos 112 , 196 y 281 kg N/ha, respectivamente. Mientras que para pimiento fue de 2.7 kg N/ton y en tomate fue de 4.1 kg N/ton con el tratamiento de 275 kg N/ha. Se observó un acuerdo bastante cercano entre el N absorbido por los cultivos bajo experimento y el simulado por el modelo con un RMSE de 5 kg N/ha (4 lbs N/ac). Las medias de los valores analizados y estimados por el modelo para cada cultivo establecido mostraron ser no significativamente distintas, por lo que el modelo se ajusta y es válido para este parámetro.

Los valores de N absorbido por los cultivos predichos por el modelo N-Index estuvieron correlacionadas significativamente con los valores de N absorbido experimentales ($r=0.99$, $p<0.05$, $n=12$). El modelo estimó acertadamente el N que fue absorbido por los cultivos en los

⁵Media \pm desviación estándar de los valores de N residual obtenidos en los tres niveles de aplicación de N utilizados en cebolla y calabaza.

⁶ Media \pm desviación estándar de los valores de N residual obtenidos en un nivel de aplicación de N.

distintos casos establecidos, el valor medido fue 1.06x el valor estimado. El N absorbido por el cultivo fue la variable mejor simulada por el N-Index. La comparación entre los valores de N absorbido experimentales y los predichos por el modelo presentado en la Figura 4 muestra que el análisis de regresión mostró un coeficiente de regresión fuerte ($R^2=0.97$, $p<0.05$). Esto indica que el modelo se ajustó muy bien y predijo acertadamente el N que fue absorbido por los cultivos en los distintos sistemas establecidos.

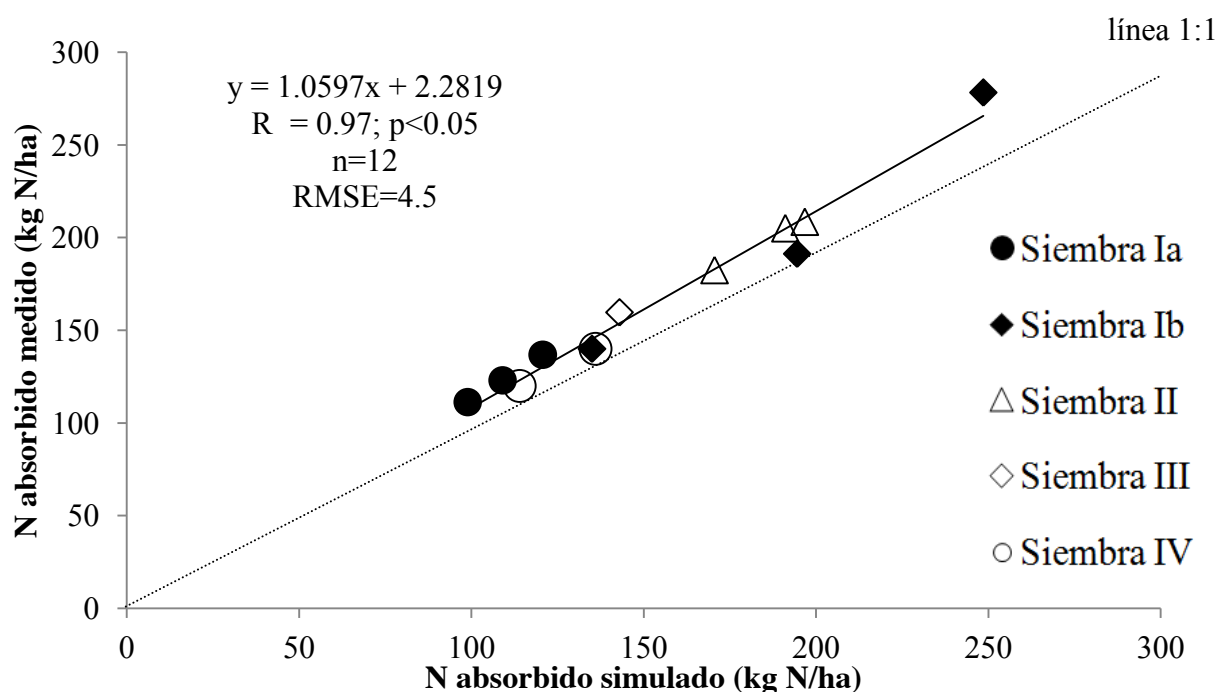


Figura 4. Relación entre valores analizados y estimados por el modelo N-Index para el parámetro Nitrógeno absorbido por el cultivo para los distintos cultivos establecidos⁷.

⁷ Cada valor representa la media de los replicados establecidos en cada cultivo.

5.5. Salidas del modelo para los demás mecanismos de pérdidas de N.

En los sistemas de producción evaluados los flujos de N variaron entre 1 y 4 kg N/ha para volatilización, 18 y 65 kg N/ha para desnitrificación, 155 y 779 kg N/ha para lixiviación de N. La eficiencia de utilización de N vario entre 15 y 39%.

Cuadro 5. Predicciones del modelo con las estimaciones para los demás mecanismos de pérdida de N en cada sistema establecido¹.

| Cultivo | Siembra ² | Dosis N | Volatilización de amonia | Desnitrificación | Lixiviación de N | NUE ³ |
|-------------------|----------------------|---------|-----------------------------|------------------|---------------------|------------------|
| -----kg N/ha----- | | | | | | % |
| Cebolla | Ia | 140 | 1 | 18 | 155 | 29 |
| Cebolla | Ia | 196 | 2 | 46 | 436 | 15 |
| Cebolla | Ia | 253 | 3 | 31 | 220 | 28 |
| Calabaza | Ib | 112 | 1 | 31 | 247 | 39 |
| Calabaza | Ib | 196 | 2 | 65 | 586 | 22 |
| Calabaza | Ib | 281 | 3 | 52 | 399 | 36 |
| Pimiento | II | 275 | 4 | 22 | 765 | 19 |
| Pimiento | II | 275 | 4 | 22 | 779 | 17 |
| Pimiento | II | 275 | 4 | 22 | 756 | 20 |
| Tomate | III | 275 | 4 | 42 | 409 | 24 |
| Cebolla | IV | 189 | 3 | 39 | 424 | 19 |
| Cebolla | IV | 189 | 3 | 39 | 406 | 22 |

¹Cada valor representa la media de los replicados establecidos en cada siembra.

²Ia-cebolla, Ib-calabaza, II-pimiento, III-tomate, IV-cebolla.

³Eficiencia de uso de N (NUE= N absorbido por el cultivo/N total disponible); donde N total disponible = aplicación de fertilizante-N + N inorgánico inicial + mineralización de N + deposición atmosférica de N + residuos incorporados + NO₃-N en agua de riego + N orgánico en agua de riego.

5.6. Desempeño del modelo.

Los resultados de las variables utilizadas para evaluar el desempeño del N-Index son presentados en el Cuadro 6. Entre ambos parámetros analizados el mejor que fue modelado por el N-Index, fue el N absorbido por el cultivo (RMSE=4.5). De acuerdo a la NSE el modelo fue bastante eficiente estimando ambos parámetros con un NSE cercana a 1.

Cuadro 6. Indicadores estadísticos utilizados para evaluar la eficiencia del modelo N-Index en la localidad de Guánica.

| Estadístico | Parámetro | |
|-------------|---------------|-------------|
| | N residual | N Absorbido |
| RMSE | 17.47 kg N/ha | 4.5 kg N/ha |
| NSE | 0.91 | 0.99 |
| PBIAS | 16.1% | -7.44% |
| RSR | 0.30 | 0.09 |
| ER promedio | -12.3% | 7.7% |

En general, la tendencia del modelo fue a sub-estimar el N residual luego de la cosecha de los cultivos y sobre-estimar el N que fue absorbido por los cultivos establecidos. El modelo mostró valores de PBIAS para N residual y N absorbido de 16.1% y -7.44%, respectivamente. No obstante ambos parámetros mostraron un PBIAS considerado aceptable. El RSR es comúnmente utilizado como un índice de error, y varía de cero (0) a un valor positivo; mientras más bajo, mejor el desempeño del modelo, siendo cero (0) el valor óptimo. Se obtuvo un valor de RSR para N residual y N absorbido de 0.30 y 0.09, respectivamente. El error relativo (ER) en las estimaciones del modelo fue de alrededor de un -12% y 7% para los parámetros N residual y N absorbido, respectivamente, ambos menor de lo considerado aceptable ($\pm 30\%$) en ambos parámetros, por lo que sus estimaciones se consideran aceptables.

Los indicadores comúnmente usados para evaluar el desempeño de un modelo demuestran que el N-Index fue claramente capaz de llevar a cabo evaluaciones confiables de las pérdidas de N evaluadas en los casos de estudio establecidos con los distintos cultivos y que el mismo es eficiente. Los resultados obtenidos en los estadísticos utilizados cumplen con los criterios establecidos en trabajos de simulación. El modelo fue claramente capaz de ajustarse a la localidad y a los cultivos evaluados.

5.7. Sensitividad del modelo

Se condujo un análisis de sensibilidad para el cultivo de tomate similar al realizado por Delgado et al. (2008) para probar cuan sensible es el modelo a cambios en la magnitud de fertilización y de riego (Cuadro 7). Estos dos factores son menos monitoreados por los agricultores en los campos de producción. Se encontró que los parámetros más sensitivos a incrementos de fertilización fue la volatilización de N, mientras que la desnitrificación de N, lixiviación de N y N residual fueron similares. A mayor magnitud en los niveles de fertilización con N el modelo estimó mayor volatilización de N, desnitrificación de N, lixiviación de N y N residual, mientras que el % de NUE disminuye y el N absorbido por el cultivo se mantuvieron iguales, debido a que este parámetro cambia en función del rendimiento del cultivo. Se encontró que con una disminución de un 10% del valor inicial de fertilización los parámetros de desnitrificación, lixiviación y N residual disminuyeron por un 3, 4 y 4%, respectivamente. Con un aumento de hasta un 30% en la aplicación de fertilizante, las estimaciones por el modelo aumentan por un 50, 16, 15 y 15%, para los parámetros de volatilización, desnitrificación, lixiviación y N residual, respectivamente.

Cuadro 7. Análisis de sensibilidad del N-Index a cambios en parámetros de entrada en el sistema establecido con el cultivo de tomate siembra III¹.

| | Valor ² | Volatilización | Desnitrificación de N | Lixiviación de N | N residual | N absorbido ³ | NUE ⁴ | |
|----------------------|--------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|------------------|-----|
| | -----kg N/ha----- | | | | | | -%- | |
| Inicial ⁵ | 275 | 4 | 42 | 408 | 104 | 181 | 24 | |
| Aplicación de N | -30% | -25 | -14 | -14 | -14 | 0 | +13 | |
| | -20% | 0 | -8 | -9 | -10 | 0 | +8 | |
| | -10% | 0 | -3 | -4 | -4 | 0 | +4 | |
| | 10% | +25 | +5 | +5 | +5 | 0 | 0 | |
| | 20% | +50 | +11 | +10 | +10 | 0 | -4 | |
| | 30% | +50 | +16 | +15 | +15 | 0 | -8 | |
| | -- in-- | -----kg N/ha----- | | | | | | -%- |
| Inicial ⁵ | 8.3 | 4 | 42 | 408 | 104 | 181 | 24 | |
| Riego aplicado | -30% | 0 | 0 | -6 | +25 | 0 | 0 | |
| | -20% | 0 | 0 | -4 | +16 | 0 | 0 | |
| | -10% | 0 | 0 | -2 | +8 | 0 | 0 | |
| | 10% | 0 | 0 | +2 | -8 | 0 | 0 | |
| | 20% | 0 | 0 | +4 | -14 | 0 | 0 | |
| | 30% | 0 | 0 | +5 | -20 | 0 | 0 | |

¹Cambio con relación al valor estimado inicialmente por el modelo.

²Cambio de un ± 10 , 20 y 30% del valor inicial en los parámetros de entrada aplicación de N y riego aplicado.

³N absorbido por el cultivo (planta+fruto), no varió debido a que el valor de rendimiento no se cambió.

⁴NUE- Eficiencia de uso de N del sistema. Cuanto N del disponible en el sistema está siendo usado por el cultivo (Absorción total del cultivo \div N total en el sistema).

⁵Estimación inicial del modelo.

Un análisis similar, pero esta vez evaluando el efecto del nivel de riego, demostró que los parámetros de volatilización, desnitrificación, N absorbido y % NUE no fueron sensitivos a incrementos en el riego aplicado, ya que nunca mostró cambio alguno en las estimaciones de estos parámetros. Por otro lado, los parámetros de N residual y lixiviación de N, sí mostraron ser

sensitivos al riego aplicado (Cuadro 7). El análisis mostró que existe una relación lineal entre el riego aplicado con el N residual luego de la cosecha y con la lixiviación de N (Figura 5). Según se incrementó el riego aplicado el N residual se reducía, debido principalmente a que la lixiviación de N aumentaba. Al reducir el riego que fue aplicado por un 10% la lixiviación de N disminuyó por un 2% mientras que el N residual aumentó un 8%. Un aumento de un 10, 20 y hasta un 30% en el valor inicial del riego aplicado, la lixiviación de N aumentó por un 2, 4 y 5%, respectivamente y el N residual disminuyó por un 8, 14 y 20%, respectivamente.

El análisis de sensibilidad mostró que los mecanismos de pérdidas de N más sensitivos a la aplicación de fertilizante fue la volatilización de N, mientras que a la aplicación de riego por goteo lo fueron la lixiviación de N y el N residual. Delgado et al. (2008) encontró que los parámetros de pérdidas más sensitivos fueron N residual y lixiviación de N, al evaluar distintos eventos de precipitación con el modelo. De Paz et al. (2009) evaluó la sensibilidad del modelo a cambios en las constantes de entrada y la profundidad de raíces en sistemas de vegetales y cítricos, y encontró que el N residual y el N lixiviado fueron los mecanismos más sensitivos.

El índice visual generado por el modelo en la salida final sirve para identificar el nivel de riesgo que representa el sistema de acuerdo a las prácticas de manejo utilizadas. El modelo identificó mayor riesgo a pérdidas de N para los eventos con una dosis mayor de fertilización, principalmente por el mecanismo de lixiviación (Figura 6). Así mismo, el modelo identificó mayor potencial de riesgo cuanto se aplicó mayor cantidad de riego al cultivo, especialmente por el mecanismo de lixiviación (Figura 6). Este índice visual es capaz de identificar aquellos sistemas de producción que representan un mayor riesgo para el medioambiente. Mediante el mismo los conservacionistas, manejadores de nutrientes, agrónomos, etc. pueden evaluar la

forma en la que operan y de representar un riesgo alto modificar sus prácticas de manejo para reducir el riesgo y los flujos potenciales de N de sus sistemas de producción.

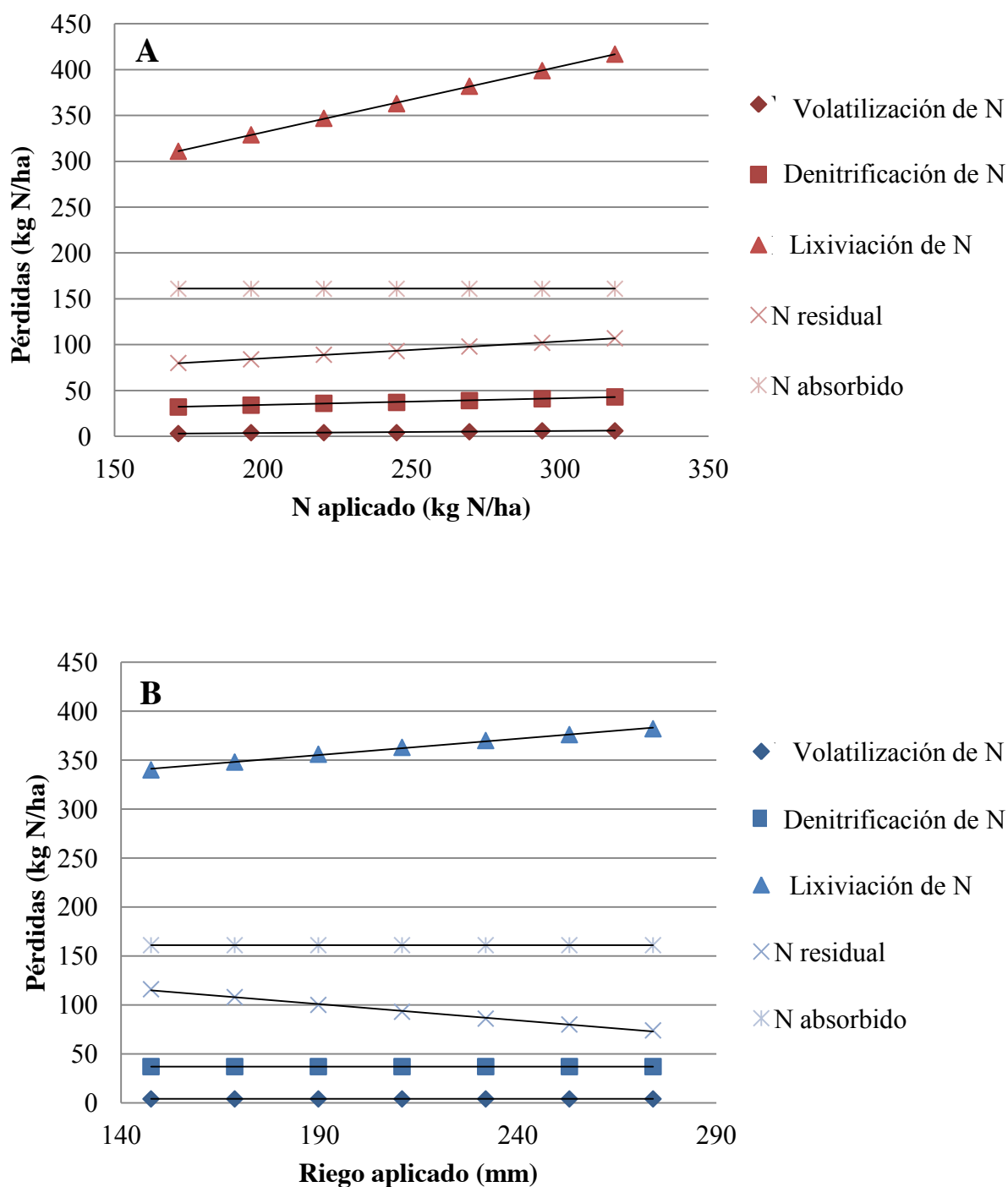
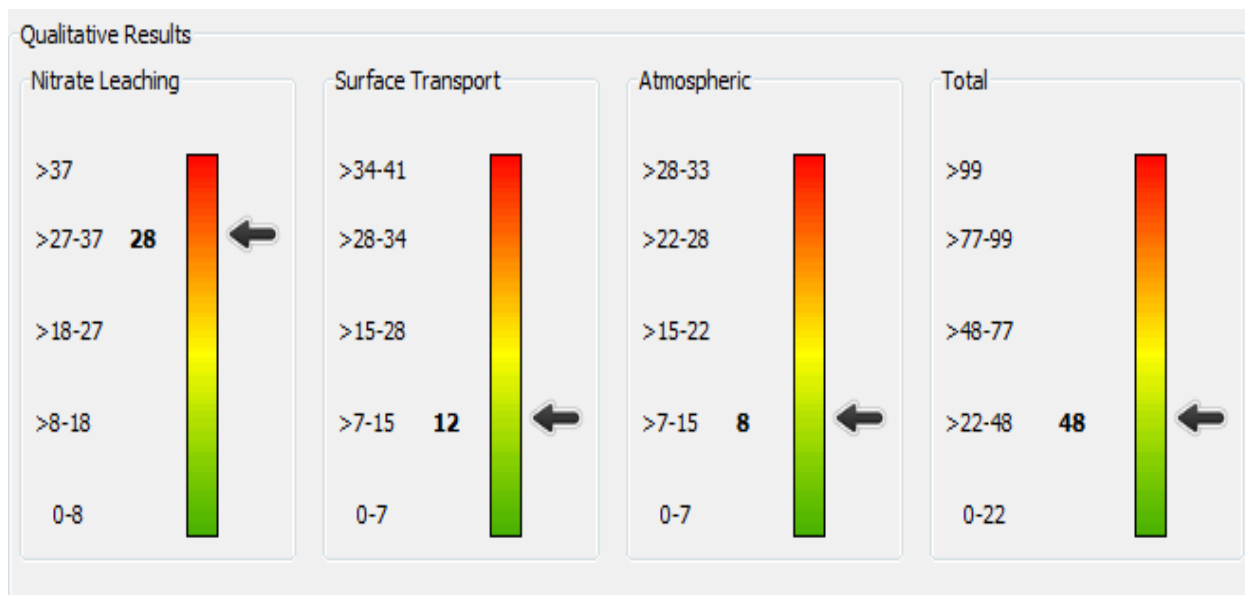


Figura 5. Análisis de sensibilidad del N-Index a cambios en la magnitud en los parámetros de entrada (A) N aplicado y (B) riego aplicado sobre los distintos mecanismos de pérdidas.

A) Baja aplicación de N y menos riego aplicado.



B) Alta aplicación de N y mayor riego aplicado.

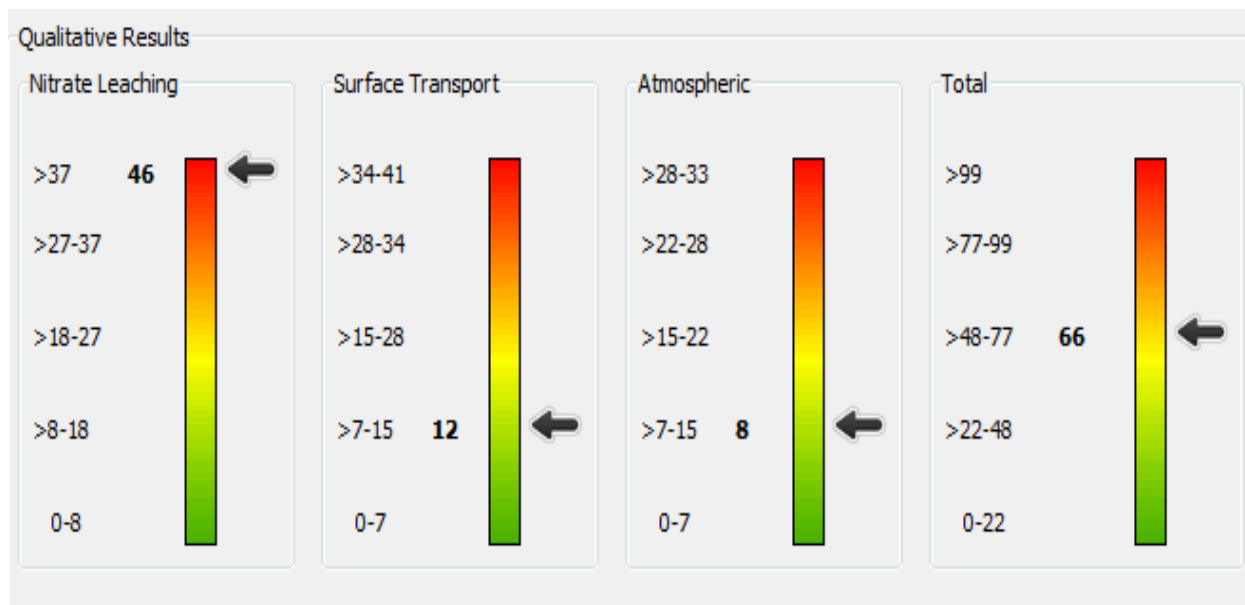


Figura 6. Resultados cualitativos del N-Index para los distintos casos hipotéticos usados en el análisis de sensibilidad.

5.8. Eficiencia de uso de nitrógeno del sistema (NUE)

El NUE para los distintos cultivos vegetales en los distintos sistemas establecidos fue estimada en un 26% (± 8)⁸, similar al observado por De Paz et al. (2009) el cual reportó un NUE para vegetales de un 27% (± 5). Al aumentar las aplicaciones de N, el modelo predice una menor eficiencia de utilización de N en los cultivos. En los cultivos en los cuales se probaron distintas dosis de aplicación de N, como en el caso de cebolla y la calabaza, se obtuvo una mayor NUE en las dosis de aplicación más bajas. En el análisis de sensibilidad mientras más se incrementaba la cantidad de aplicación de fertilizante-N se encontró que la NUE disminuía. Esta baja NUE en vegetales es debido principalmente a las pérdidas por lixiviación de N, lo cual en promedio fueron de 359 lb N/acre, para los distintos sistemas establecidos. De Paz et al. (2009) encontró pérdidas promedio por lixiviación de 400 lb N/acre en vegetales. Una respuesta similar fue encontrada por Delgado (1998; 2001), el cual encontró una correlación entre la profundidad de raíces y la lixiviación de N. El mismo establece que cultivos como los vegetales tienen un mayor potencial a pérdidas por lixiviación debido a su sistema radicular menos profundo en comparación con otros cultivos como los cítricos.

5.9. Comparación de niveles de aplicación de N

En la siembra Ia se monitorearon distintos niveles de aplicación de N en el cultivo de la cebolla. El N-Index versión 4.4.2 posee una opción la cual permite realizar evaluaciones entre escenarios. Al realizar las evaluaciones con el modelo N-Index en el cultivo de cebolla, se encontró que la dosis más baja de aplicación de N (140 kg N/ha) tuvo una mayor eficiencia de uso de N y a su vez mostró menos pérdidas de N al ambiente mediante los mecanismos N residual y lixiviación de N, en comparación con niveles más altos de aplicación (Cuadro 8).

⁸ Desviación estándar del NUE obtenido en cada sistema establecido.

Sotomayor-Ramírez et al. 2013 no encontró una diferencia significativa en el rendimiento del cultivo de la cebolla utilizando estas dosis de aplicación (140, 196, 253 kg N/ha). Esto demuestra que niveles adecuados de aplicación de N pueden reducir los flujos de N al ambiente sin disminuir el rendimiento de los cultivos.

Cuadro 8. Comparación de resultados mediante el uso del N-Index.

| Dosis | NUE | N residual | N absorbido | N lixiviado |
|---------|-------|-------------------|-------------|-------------|
| kg N/ha | --%-- | -----kg N/ha----- | | |
| 140 | 37 | 107 | 141 | 162 |
| 196 | 17 | 286 | 140 | 438 |
| 253 | 27 | 153 | 131 | 234 |

5.10. Evaluación económica

Se realizó una simulación económica para hacer un estimado de cuanto equivale en dinero las pérdidas de N por los distintos mecanismos (Cuadro 9). El valor del N usado, según las fuentes utilizadas (Urea, Sulfato de Amonio, Nitrato de Potasa) fue estimado en 2.02 \$/lb N (comunicación personal, C. González, 2013). El 51% de las pérdidas fue a través del mecanismo de lixiviación de N lo cual representa en promedio \$772/ha/año en pérdidas. Otros de los mecanismos con mayor % en pérdidas son el N residual (19%) y el N absorbido por los cultivos (25%), lo cual en promedio fueron \$288/ac/año y 381/ha/año, respectivamente. Se debe contabilizar el N residual previo al establecimiento de los cultivos para modificar las dosis de aplicación de N y evitar así perder dinero ya que este N residual puede estar potencialmente disponible a pérdidas por lixiviación. Además, el riego debe manejarse para evitar perder el N

residual disponible para los cultivos subsiguientes mediante la lixiviación de N. Esto representaría un ahorro económico para el agricultor.

Cuadro 9. Evaluación económica del modelo para los mecanismos de pérdidas de N¹.

| Siembra ² | Dosis N | Costo fertilización ³ | Volatilización de amonia | Desnitrificación | Absorción de N ⁴ | Lixiviación de N | N residual |
|----------------------|---------|----------------------------------|--------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|------------|
| | kg N/ha | ---\$/ha--- | -----\$/ha/año----- | | | | |
| Ia | 140 | 283 | 6 | 79 | 559 | 690 | 629 |
| Ia | 196 | 397 | 10 | 83 | 248 | 784 | 519 |
| Ia | 253 | 510 | 15 | 57 | 276 | 396 | 259 |
| Ib | 112 | 227 | 5 | 57 | 386 | 444 | 90 |
| Ib | 196 | 397 | 10 | 116 | 407 | 1054 | 240 |
| Ib | 281 | 567 | 15 | 93 | 562 | 719 | 164 |
| II | 275 | 556 | 20 | 40 | 401 | 1376 | 307 |
| III | 275 | 556 | 20 | 75 | 323 | 736 | 189 |
| IV | 189 | 381 | 15 | 71 | 263 | 747 | 195 |
| | | ---\$/ha--- | -----\$/ha/año----- | | | | |
| Promedio | | 430 | 13 | 74 | 381 | 772 | 288 |
| D.S. ⁵ | | 117 | 5 | 21 | 111 | 280 | 165 |
| % | | | 1% | 5% | 25% | 51% | 19% |

¹Pérdidas promedio de \$ para cada sistema establecido según las pérdidas de N en cada mecanismo.

²Ia-cebolla, Ib-calabaza, II-pimiento, III-tomate, IV-cebolla.

³Costo de la fertilización para cada nivel de aplicación de N.

⁴Absorción de N planta+fruto.

⁵Desviación estándar

5.11. Prácticas de manejo sugeridas para reducir las pérdidas de nitrógeno.

Prácticas de manejo tradicionales en las cuales se sobre fertiliza incrementan el potencial de pérdidas de N mediante la lixiviación (Delgado y Bausch, 2005). El uso de prácticas tradicionales en los sistemas de producción agrícolas pueden resultar en pérdidas mayores a 350 kg N/ha (De Paz et al., 2009). Mediante la incorporación de mejores prácticas de manejo (MPM) como mantener un buen itinerario de riego, rotar los cultivos con otros que su sistema radicular sea más profundo, el uso de planas cobertoras y ajustando los planes de fertilización creando presupuestos adecuados (N_{min}), pueden incrementar la eficiencia de uso de N en los sistemas de producción, reduciendo el potencial a pérdidas (De Paz et al., 2009). La tasa de aplicación puede ser ajustada utilizando el método N_{min} calculada como; $N_{min} = N_{targ} - N_{irr} - N_{rsd}$, donde N_{min} = aplicación de fertilizante recomendada, N_{targ} = absorción de N específico del cultivo, N_{irr} = N aplicado en el agua de riego, N_{rsd} = N inorgánico residual antes de la siembra. Delgado et al. (2001) reportó que las pérdidas por lixiviación de la zona radicular de los vegetales fueron alrededor de 94 kg N/ha, utilizando estas prácticas. Mientras que De Paz et al. reportó pérdidas estimadas de lixiviación de 449, 248 y 149 kg N/ha utilizando prácticas convencionales, MPM y N_{min} , respectivamente.

6. Conclusiones

En este trabajo se presentan distintos casos de estudio en la aplicación del N-Index para evaluar cuantitativamente y cualitativamente las pérdidas de N al medio ambiente en una localidad del Valle de Lajas. El N-Index debe ser utilizado tomando en consideración sus limitaciones potenciales, es decir se recomienda que los usuarios validen el modelo específicamente para su región, para mejorar el desempeño del modelo.

La evaluación del modelo en los distintos casos establecidos demuestra que el modelo en general es efectivo estimando los mecanismos de pérdida de N mediante las variables evaluadas, N residual y N absorbido en cebolla, calabaza, pimiento y tomate, de los cuales la variable N absorbido por el cultivo fue el mejor estimado por el modelo. Se encontraron correlaciones significativas entre los valores analizados en campo y los simulados por el modelo al evaluar el N residual y el N absorbido luego de la cosecha de los cultivos establecidos en la localidad.

Este trabajo demuestra que el modelo N-Index puede ser usado como una nueva tecnología para preservar la calidad de los cuerpos de agua en la región del Valle de Lajas. El mismo puede ser utilizado con confianza por los usuarios para distinguir entre las prácticas de manejo que resultan en poco impacto ambiental de aquellas que si causan un gran impacto aumentando el potencial de pérdidas de N en los sistemas de producción. Existe la necesidad de probar el desempeño del modelo para los demás mecanismos de pérdidas en la localidad para evaluar la efectividad del modelo a estimar otros mecanismos de pérdidas tales como; desnitrificación, volatilización y lixiviación de N. El N-Index es una herramienta que puede ser usada de forma rápida y efectiva por los agricultores, agrónomos y consultores en el manejo de nutrientes. Se espera que este trabajo contribuya al uso adecuado de este tipo de herramientas para evaluar los sistemas de producción agrícola, y al establecimiento de los mismos por parte de

los agricultores como una forma de evaluar sus prácticas de manejo. El modelo puede ser útil en el proceso de toma de decisiones para operar en un modo más sustentable en cuanto al manejo adecuado de

7. Literatura Citada

- Adeuya, R.K., K.J. Lim, B.A. Engel y M.A. Thomas. 2005. Modeling the average annual nutrient losses of two watersheds in Indiana using GLEAMS-NAPRA. Trans. American Society of Agricultural Engineers 48: 1739-1749.
- Anderson, P.C., F.M. Rhoads, S.M. Olson y K.D. Hill. 1999. Carbon and nitrogen budgets in spring and fall tomato crops. HortScience 34:648-652.
- Antweiler, R.C., D.A. Goolsby y H.E. Taylor. 1996. Nutrients in the Mississippi River. En: Meade, R.H. (Editores), Contaminants in the Mississippi River, 1133. U.S. Geological Survey, pp. 73-85.
- Bartolo, M.E., F.C. Schweissing, J.C. Valliant, D.B. Bosley y R.M. Waskom. 1997. Nutrient management of onions: A Colorado perspective. p. 114-118. En T. Tindall y D. Westerman (editores) Proc. Western nutrient manage. Conf., Vol. 2, Salt Lake City, UT. 6-7 Mar. 1997. Univ. of Idaho, Moscow.
- Bonnet, J.A. y P. Tirado-Sulsona. 1950. Soil studies in Lajas Valley. University of Puerto Rico, Agricultural Experiment Station Bulletin 86. Río Piedras, PR. 64 pp.
- Cepilecha, Z.L., R.M. Waskom, T.A. Bauder, J.L. Sharkoff y R. Khosla. 2004. Vulnerability assessments of Colorado groundwater to nitrate contamination. J. Water, Air and Soil Pollution 159:373-394.
- Chung, C.C. 2004. Simulation Modeling Handbook. A Practical Approach. Capítulo 8: 178-187.
- Chung, S.W., P.W. Gassman, L.A. Kramer, J.R. Williams y R. Gu. 1999. Validation of EPIC for two watersheds en southwest Iowa. J. Environmental Quality 28: 971-979.

- Chung, S.W., P.W. Gassman, R. Gu y R.S. Kanwar. 2002. Evaluation of EPIC for assessing tile flow and nitrogen losses for alternative agricultural management systems. Trans. American Society of Agricultural and Biological Engineers 45:1135-1146.
- Colberg, O. y A. Beale. 1991. Cuatro niveles de nitrógeno en dos variedades de cebolla (*Allium cepa*). J. Agric. of the Univ. of Puerto Rico 75: 1-9.
- Comly, H. 1945. Cyanosis in infants caused by nitrates in well water. J. American Medical Association 129:112.
- Csizinsky, A.A. y D.J. Schuster. 1982. Yield response of staked, fresh-market tomatoes to reduce use of fertilizers and insecticides. J. American Society Horticultural Science 107:648-652.
- David, M.B., L.E. Gentry, D.A. Kovacic y K.M. Smith. 1997. Nitrogen balance in and export from agricultural watershed. J. Environmental Quality 26:1038-1048.
- Delgado, J.A. 1998. Sequential NLEAP simulations to examine effect of early and late planted winter cover crops on nitrogen dynamics. J. Soil Water Conservation 53: 241-244.
- Delgado, J.A. 2001. Use of simulations for evaluation of best management practices on irrigated cropping systems. In: Shaffer, M.J., L. Ma, S. Hansen, (Editores). Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 355-381.
- Delgado, J.A. 2002. Quantifying the loss mechanisms of nitrogen. J. Soil Water Conservation 57:389-398.

- Delgado, J.A., R.F. Follet y M.J. Shaffer. 2000. Simulation of NO_3^- -N dynamics for cropping systems with different rooting depths. J. SSSA 64: 1050-1054.
- Delgado, J. A, M. Shaffer, C. Hu, R.S. Lavado, J.C. Wong, P. Joosse, X. Li, H. Rimski Korsakov, R. Follett y W. Colon, D. Sotomayor. 2006. A Decade of Change in Nutrient Management: A New Nitrogen Index. J. of Soil and Water Conservation 61: 62A-71A.
- Delgado J.A., M. Shaffer, C. Hu, R. Lavado, J. Cueto-Wong, P. Joosse, D. Sotomayor, W. Colon, R. Follet, S. DelGrosso, X. Li y H. Rimski-Korsakov. 2008. An index approach to assess nitrogen losses to the environment. Agriculture, Ecosystems and Environment 32:108-120
- Delgado, J.A., P.M. Gagliardi, E.J. Rau, R. Fry, U. Figueroa, C. Gross, J. Cueto-Wong, M.J. Shaffer, K. Kowalski y D. Neer. 2010. Nitrogen Index 4.3.2. User Manual. Aug. 4, 2010.
- Delgado, J.A., P.M. Gagliardi, E.J. Rau, R. Fry, U. Figueroa, C. Gross, J. Cueto-Wong, M.J. Shaffer, K. Kowalski, D. Neer, D. Sotomayor-Ramirez, J. Alwang, C. Monar, L. Escudero y AK. Saavedra. 2011. Nitrogen Index 4.4 User Manual Aug. 4, 2011.
- Departamento de Agricultura de Puerto Rico. 2011a. Ingreso Bruto de la Agricultura de Puerto Rico, cifras revisadas 2009/2010 y preliminares 2010/2011. Oficina de Estadísticas Agrícolas. Departamento de Agricultura de Puerto Rico.
- Departamento de Agricultura de Puerto Rico. 2011b. Compendio estadístico 2011. Disponible en www.agricultura.gobierno.pr

- De Paz, J.M., J.A. Delgado, C. Ramos, M.J. Shaffer y K.K. Barbarick. 2009. Use of a new nitrogen index assessment tool for evaluation of nitrate leaching across a Mediterranean region. *J. Hydrology* 365:183-194.
- Dorsch, M.M., R.K.R. Scrag, A.J. Michael, P.A. Baghurst y K.F. Dyer. 1984. Congenital malformations and maternal drinking water supply in rural South Australia: A case-control study. *American J. of Epidemiology* 119:473-486.
- Doss, D.B., C.E. Evans y W.A. Johnson. 1975. Rates of nitrogen and irrigation for tomatoes. *J. American Society of Horticultural Science* 100:435-437.
- EEA-UPR (Estación Experimental Agrícola-Universidad de Puerto Rico). 2012. Conjunto tecnológico para la producción de calabaza. Publicación 155 Cap. 6 pág. 4.
- EEA-UPR (Estación Experimental Agrícola-Universidad de Puerto Rico). 2012. Conjunto tecnológico para la producción de cebolla. Publicación 156 Cap. 6 pág. 4.
- EPA-SAB. 2011. Reactive Nitrogen in the United States: An analysis of inputs, flows, consequences and management options. Science Advisory Board. pag. 1-172.
Disponible en www.epa.gov
- Figueroa-Viramontes U., J.A. Delgado, J.A. Cueto-Wong, G. Núñez-Hernandez, D.G. Retasánchez y K.A. Barbarick. 2011. A new Nitrogen Index to evaluate nitrogen losses in intensive forage systems in Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 142: 352-364.
- Follet, J.R., R. F. Follet y W.C. Herz. 2010. Environmental and human impacts of reactive nitrogen. P. 1-37. *En* J.A. Delgado and R.F. Follet (editores). *Advances in nitrogen management for water quality*. Soil and Water Conservation Society, IA, USA.

- Follet, R.F. y D.J. Walker. 1989. Ground water quality concerns about nitrogen. En: Follet, R.F. (Editor), Nitrogen management and ground water protection. Agriculture, Ecosystems and Environment Sci. Pub., pp.1-22.
- Follet, R.F. y J.A. Delgado. 2002. Nitrogen fate and transport in agricultural systems. J. Soil Water Conservation 57:402-408.
- González, C. 2013. Comunicación personal.
- Gupta, H. V., S. Sorooshian y P.O. Yapo. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. J. Hydrologic Engineer. 4: 135-142.
- Halvorson, A.D., R.F. Follett, M.E. Bartolo y F.C. Schweissing. 2002. Nitrogen fertilizer use efficiency of furrow-irrigated onion and corn. Agronomy J. 94:442-449.
- Halvorson, A.D., M.E. Bartolo, C.A. Reule y A. Berrada. 2008. Nitrogen effects on onion yield under drip and furrow irrigation. Agronomy J. 100:1062-1069.
- Hartz, T.K., M. LeStrang, y D.M. May. 1993. Nitrogen requirements of Drip-irrigated Peppers. HortScience 28:1097-1099.
- Hartz, T.K. y T.G. Bottoms. 2009. Nitrogen requirements of drip-irrigated processing tomatoes. HortScience 44:1988-1993.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tilsdale y W.L. Nelson. 2005. Soil Fertility and Fertilizers-An Introduction to Nutrient Management, 7ma edición, publicado por Pearson Education, Inc., Capítulo 4:97-131.
- Hutchinson, G.L., A.R. Moiser y C.E. Andre. 1982. Ammonia and amine emissions from a large cattle feedlot. J. Environmental Quality 11:288-293.

- Iserman, K. 1983. The extent to which agriculture is involved in environmental problems in modern industrial society. *Fertilizer Agriculture* 83: 3-25.
- Johnson, R.A., J.E. Freund y I. Miller. 1999. *Miller and Freund's Probability and Statistics for Engineers*, Pearson Education, New York.
- Keating, J.P., M.E. Lell, A.W. Straus, H. Zarkowsky y G.E. Smith. 1973. Infantile methemoglobinemia caused by carrot juice. *New England Journal of Medicine* 288: 825.
- Lúgo-López, M.A. 1995. El Valle de Lajas: 50 años después. *Acta Científica*. 9: 57-69.
- Lúgo-López, M.A. y R. Pérez-Escolar. 1959. Hydraulic conductivity of subsoils of Lajas Valley. *J. Agric. of the Univ. of Puerto Rico* 43: 273-277.
- Lugo-López, M.A., R. Pérez-Escolar, G. Acevedo y J. Juárez, Jr. 1959. Nature and properties of major soils of Lajas Valley. *Bull. 86. University of Puerto Rico, Agric. Exp. Sta., Río Piedras, PR.* 60 pp.
- Malberg, J.W., E.P. Savage y J. Osteryoung. 1978. Nitrates in drinking water and the early onset of hypertension. *Environmental Pollution* 15:155-160.
- Meisinger, J.J. y G.W. Randall. 1991. Estimating N budgets for soil-crop systems. In: *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and farm Productivity*. R. F. Follet, D.R. Keeney, and R. M. Cruse (ed). ASA, Madison, WI, pp. 85-124.
- Meisinger, J.J. y J.A. Delgado. 2002. Principles for managing nitrogen leaching. *J. Soil Water Conservation* 57:485-498.
- Mitsch, W.J. y J.W. Day. 2006. Restoration of wetlands in the Mississippi-Ohio-Missouri (MOM) River Basin: experience and needed research. *Ecological Engineering* 26:55-69.

- Mosier, A.R., J.W. Doran y J.R. Freney. 2002. Managing soil denitrification. *J. Soil Water Conservation* 57: 505-513.
- Muir, J., E.C. Sein y R.A. Olsen. 1973. A study of factors influencing the nitrogen and phosphorous contents of Nebraska water. *J. Environmental Quality* 2:466-469.
- Nash, J.E. y J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A Discussion of Principles. *J. of Hydrology* 10: 282-290.
- Niu, X., W. Easterling, C.J. Hays, A. Jacobs y L. Mearns. 2009. Reliability and input data induced uncertainty of the EPIC model to estimate climate change impact on sorghum yields in the U.S. Great Plains. *Agriculture Ecosystems Environmental*. 129:268-276.
- Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (OMAFRA). 2003. NMAN software, www.omafra.gov.on.ca/english/nm/nman/default.htm. Created 10 Dec 2003. Accessed September 7 2010.
- Peoples, M.B., J.R. Freney y A.R. Moiser. 1995. Minimizing gaseous losses of nitrogen. In: *Nitrogen Fertilization in the Environment*. P. E. Bacon (editor). Marcel Dekker, Inc., New York, NY, pp. 565-601.
- Ramanarayanan, T.S., J.R. Williams, W.A. Dugas, L.M. Hauck y A.M.S. McFarland. 1997. Using APEX to identify Alternative Practices for Animal Waste Management. ASAE Paper No. 972209. ASAE, St. Joseph, MI.
- Randall, G.W., J.A. Delgado y J.S. Schepers. 2008. Nitrogen management to protect water resources. pp. 907-941. *En Nitrogen in Agricultural Systems Agronomy Monograph* 49. ASA, CSA, SSSA, Madison, WI.

- Ribaudo M., J. A. Delgado, L. Hansen, M. Livingston, R. Mosheim y J. Williamson. 2011. Nitrogen in agricultural systems: Implications for conservation policy. United States Department of Agriculture Economic Research Service Report Number 127.
- Román-Paoli, E., S. Martínez-Garrastazu, L. Flores y L. Almodóvar. 2012. Pumpkin response to microirrigation in two agro-ecological regions in Puerto Rico. *J. Agric. Univ. P.R.* 96:139-153.
- Sammis, T. 1997. Nutrient management of onions: A New Mexico perspective. p. 49-53. In T. Tindall y D. Westerman (editores) *Proc. Western Nutrient Manage. Conf.*, Vol. 2, Salt Lake City, UT. 6-7 Mar. 1997. Univ. of Idaho, Moscow.
- Santhi, C., J. G. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan y L. M. Hauck. 2011. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc.* 37: 1169-1188.
- Saul, R.L., Kabir, S.H., Cohen, Z., Bruce, W.R. y Archer, M.C. 1981. Reevaluation of nitrate and nitrite levels in human intestine. *Cancer Res.* 41:2280-2283.
- Schneider, N.R., A. Hogg y B.A. Britton. 1990. Excessive nitrate/nitrite exposure: Nitrate poisoning and related animal health effects. En "*Perspectives in Nitrates*" pp. 23-27. Neb. Coop. Ext. EC 90-2502.
- Schwartz, H.F. y M.E. Bartolo. 1995. Colorado onion production and integrated pest management. *Ext. Bull.* 547A. Colorado State Univ., Fort Collins.
- Shaffer, M.J. y J.A. Delgado. 2002. Essentials of a national nitrate leaching index assessment tool. *J. Soil Water Conservation* 57:327-411.

- Sharpley, A.N., T. Daniel, T. Stms, J. Lemunyon, R. Stevens y R. Parry. 1999. Agricultural phosphorous and eutrophication. USDA-ARS, 149. 37 pp.
- Shumway, C., J.A. Delgado, T. Bunch, L. Hansen y M. Ribaudó. 2012. Best nitrogen management practices can reduce the potential flux of nitrogen out of the Arkansas delta. Technical Article, Soil Science 177: 198-209.
- Sotomayor-Ramirez, D., E. Roman-Paoli, L.E. Rivera, Y. Li y P.J. Stoffella. 2010. Tomato (Solanum lycopersicum L.) response to fertilizer nitrogen and compost. J. Agriculture Univ. of Puerto Rico 94:79-103.
- Sotomayor-Ramírez, D. y L. Pérez-Alegría. 2012. Nutrient management and sediment source identification in Lajas Valley Agricultural Reserve and Guánica Watershed. Final Progress Report of Project. National Fish and Wildlife Foundation. Performed under contract number 2010-0069-017. 67 p. w/ appendices.
- Sotomayor-Ramirez, D., M. Oliveras-Berrocales, R. Rodriguez y L. Wessel-Beaver. 2014. Fertilizer-nitrogen management in onion-tropical pumpkin rotation in Puerto Rico. HortTechnology (In preparation).
- Super, M., H. Heese, D. Mackenzie, W.S. Dempster, J. duPless y J.J. Ferreria. 1981. An epidemiologic study of well-water nitrates in a group of South West African Nambian infants. Wat. Res. 15:1265-1270.
- Swiader, J.M., J.G. Sullivan, F.G. Freiji y J.A. Grunau. 1988. Nitrate monitoring for pumpkin production on dryland and irrigated soil. J. American Society Horticultural Science 113:684-689.

- Swiader, J.M., S.K. Sipp y R.E. Brown. 1994. Pumpkin growth, flowering and fruiting response to nitrogen and potassium sprinkler fertigation in sandy loam. *J. American Society Horticultural Science* 119:414-419.
- Tan, C.S., C.F. Drury, D. Reynolds, P.H. Groenevelt y H. Dadfar. 2002. Water and nitrate loss through tiles under a clay loam soil in Ontario after 42 years of consistent fertilization and crop rotation. *Agriculture Ecosystems Environment* 93:121-130.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2002. National Water Quality Inventory: 2000 Report. EPA-841-R-02-001, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC. Disponible en: www.epa.gov
- USDA-SCS (United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service). 1965. Soil Survey, Lajas Valley Area, Puerto Rico. USDA-SCS, Series 1961, no. 23.
- USDA-NRCS (United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service). 2008. Soil Survey of San Germán Area, Puerto Rico, Series 2008.
- U.S. Department of Commerce. 1986. Climatological data annual summary – Puerto Rico and Virgin Islands: National Oceanic and Atmospheric Administration. 32, 23 pp.
- Van Es, H.M. K.J. Czymmek y Q.M. Ketterings. 2002. Management Effects on Nitrogen Leaching and Guidance for a Nitrogen Leaching Index in New York. *J. Soil Water Conservation* 57:499-504.
- Van Liew, M. W., J. G. Arnold y J. D. Garbrecht. 2003. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Trans. American Society of Agricultural Engineers* 46: 1539-1551.
- Weisenburger, D.D. 1991. Potential health consequences of ground water contamination by nitrates in Nebraska. En "Nitrate contamination: exposure, consequence and control" (I.

Bogardi y R. D. Kuzelka, editores.), pp. 309-315. NATO ASI Ser. G: Ecological Sciences 30, Springer-Verlag, Berlin.

Wilmott, C. J. 1981. On the validation of models. *Physical Geography* 2:184-194.

Wu, L., J. Letey, C. Fench, Y. Wood y D. Bikie. 2005. Nitrate leaching hazard index developed for irrigated agriculture. *J. Soil Water Conservation* 60: 90A-95A.

Anejos:

Anejo 1: Parámetros de entrada necesarios para hacer las simulaciones en el modelo N-Index.

| Ventanas del modelo | Datos requeridos |
|------------------------------|--|
| Información del Suelo | <ol style="list-style-type: none">1. Profundidad del suelo (ft)2. Porcentaje de materia orgánica (%)3. Concentraciones de amonio y nitrato (ppm)4. Densidad aparente (g/cm^3)5. pH del suelo |
| Cultivo | <ol style="list-style-type: none">1. Cultivo actual y cultivo previo2. Profundidad del sistema radicular3. Rendimiento (ton/ha)4. Cantidad de residuos incorporados del cultivo anterior |
| Fertilizante | <ol style="list-style-type: none">1. Tipo de fertilizante/método de aplicación2. Dosis de nitrógeno (lbs N/ac) |
| Estiércol | <ol style="list-style-type: none">1. Tipo de estiércol o composta2. Cantidad de estiércol o composta (Dosis) (lbs N/ac)3. Método de aplicación |
| Riego | <ol style="list-style-type: none">1. Tipo de riego2. Riego pre-siembra (in)3. Riego post-siembra (in)4. Concentración de nitratos (ppm) |

Hidrología

La ventana de hidrología consiste mayormente de selecciones sobre el clima, tipo de hidrología del suelo y características de drenaje del suelo. Los usuarios pueden entrar:

1. Precipitación mientras crece el cultivo
2. Precipitación sin cultivo en crecimiento

Factores "Off-site"

Los factores fuera de sitio consisten mayormente de selecciones desplegables que describen las características del acuífero. Usuarios pueden entrar:

1. Tasa de deposición atmosférica de N húmedo y seco anual.

Factores cualitativos

La ventana de factores cualitativos consiste de un menú de selecciones que describen el manejo y las características del predio.

Anejo 2: Diagnóstico de fertilidad (0-15cm) previo al establecimiento de los cultivos en la localidad seleccionada Finca González en Guánica.

| pH | Materia Orgánica | NO ₃ - N | Olsen- P | Ca | Mg | K | Na | CIC | S | Fe | Mn | Zn | Cu | B |
|------------------|---------------------|------------------------|-------------|---------------------------------|-----|-----|-----|------|------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| | g/kg | mg/kg | mg/kg | -----cmol _c /kg----- | | | | | | -----mg/kg----- | | | | |
| 8.2 ² | 23.3 | 45.3 | 28.0 | 20.8 | 9.4 | 1.1 | 0.5 | 31.8 | 20.0 | 6.5 | 2.0 | 1.8 | 6.5 | 1.4 |
| 0.1 ³ | 1.0 | 47.3 | 22.0 | 1.1 | 1.1 | 0.1 | 0.0 | 2.3 | 3.6 | 1.0 | 0.8 | 0.3 | 2.1 | 0.1 |

1 - pH – 1:1suelo:agua; materia orgánica (OM) – pérdida de peso por ignición; NO₃-N – extraíble con agua; P – Olsen-bicarbonato; Ca, Mg, K, Na – extraíble con acetato de amonio; SO₄-S – K₂HPO₄ extraíble; Fe, Mn, Zn, Cu – DTPA-TEA extracción; B – extraíble con agua caliente.

2 –Promedio

3 – Desviación estándar

Anejo 3: Porcentaje de N en el tejido vegetal de los cultivos establecidos en la localidad seleccionada para la validación del N-Index.

Cuadro 11. Datos producidos para la ventana “Custom Crop values” del modelo.

| Cultivo | Planta | Fruto | % Agua |
|----------|---|-------------------|-------------------|
| | -----% N----- | | |
| Cebolla | 2.18-2.69 ¹ 2.39 ² | 1.66-2.75 2.14 | 91.9 ² |
| Calabaza | 2.16-3.04 2.80 | 2.03-3.60 2.71 | 81.1 |
| Pimiento | 3.26-3.74 3.52 | 1.68-1.90 1.78 | 92.5 |
| Tomate | 2.49-3.05 2.70 | 1.87-2.54 2.20 | 94.0 |

1-rango obtenido en las muestras analizadas

2-promedio obtenido en las muestras analizadas

Anejo 4: Coeficientes de correlación Pearson (r) para las predicciones del N-Index y los valores medidos en campo.

| | Nabs Analizado | Nabs Estimado | Nres Analizado | Nres Estimado |
|-----------------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Nabs Analizado ¹ | 1.00 | | | |
| Nabs Estimado | 0.99 | 1.00 | | |
| Nres Analizado ² | -0.59 | -0.53 | 1.00 | |
| Nres Estimado | -0.34 | -0.30 | 0.88 | 1.00 |

¹NO₃⁻ absorbido por los cultivos.

²NO₃⁻ residual después de la cosecha de los cultivos.

Anejo 5: Prueba de normalidad para el conjunto de datos predichos por el N-Index y medidos en campo para los parámetros a validar.

A) Prueba Shapiro-Wilks (modificado)

| Variable | n | Media | D.E. | W | p-valor |
|-----------------|----------|--------------|-------------|----------|----------------|
| Nres Analizado | 12 | 171.98 | 97.9 | 0.72 | 0.0008 |
| Nres Estimado | 12 | 142.72 | 76.8 | 0.80 | 0.0107 |
| Nabs Analizado | 12 | 154.82 | 45.33 | 0.91 | 0.3553 |
| Nabs Estimado | 12 | 166.35 | 48.66 | 0.90 | 0.2467 |

Anejo 6: Análisis de regresión lineal

Análisis de regresión lineal

| Variable | N | R | R Aj | ECMP | AIC | BIC |
|-----------------|----------|----------|-------------|-------------|------------|------------|
| N absorbido | | | | | | |
| Analizado | 12 | 0.97 | 0.97 | 107.55 | 86.42 | 87.87 |

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

| Coefficiente | Est. | E.E. | LI (95%) | LS(95%) | T | p-valor | CpMallovs |
|---------------------|-------------|-------------|-----------------|----------------|----------|----------------|------------------|
| Constante | 1.82 | 8.09 | -16.22 | 19.85 | 0.22 | 0.827 | |
| Nabs Estimado | 0.92 | 0.05 | 0.82 | 1.02 | 19.64 | <0.0001 | 351.6 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 22036.18 | 1 | 22036.18 | 385.56 | <0.0001 |
| Nabs estimado | 22036.18 | 1 | 22036.18 | 385.56 | <0.0001 |
| Error | 571.53 | 10 | 57.15 | | |
| Total | 22607.71 | 11 | | | |

Análisis de regresión lineal

| Variable | N | R | R Aj | ECMP | AIC | BIC |
|-----------------|----------|----------|-------------|-------------|------------|------------|
| N Residual | | | | | | |
| Analizado | 12 | 0.77 | 0.74 | 3444.74 | 125.69 | 127.14 |

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

| Coefficiente | Est. | E.E. | LI (95%) | LS(95%) | T | p-valor | CpMallovs |
|---------------------|-------------|-------------|-----------------|----------------|----------|----------------|------------------|
| Constante | 26.77 | 23.43 | -25.42 | 78.97 | 1.14 | 0.2797 | |
| Nabs Estimado | 0.68 | 0.12 | 0.42 | 0.95 | 5.71 | 0.0002 | 30.76 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|
| Modelo | 49226.68 | 1 | 49226.8 | 32.64 | 0.0002 |
| Nabs estimado | 49226.68 | 1 | 49226.68 | 32.64 | 0.0002 |
| Error | 15081.14 | 10 | 1508.11 | | |
| Total | 64307.82 | 11 | | | |

Anejo 7: Prueba no paramétrica para diferenciar las medias de los datos medidos y simulados en ambos parámetros evaluados.

Prueba U:

$$U1 = W1 - n1(n1+1)/2$$

$$U2 = W2 - n2(n2+1)/2$$

1. $U = \min(U1, U2)$
2. $\text{mean} = n1 * n2 / 2$
3. $\text{var} = n1 * n2 (n1 + n2 + 1) / 12$
4. $Z = (U - \text{mean}) / \text{std}$

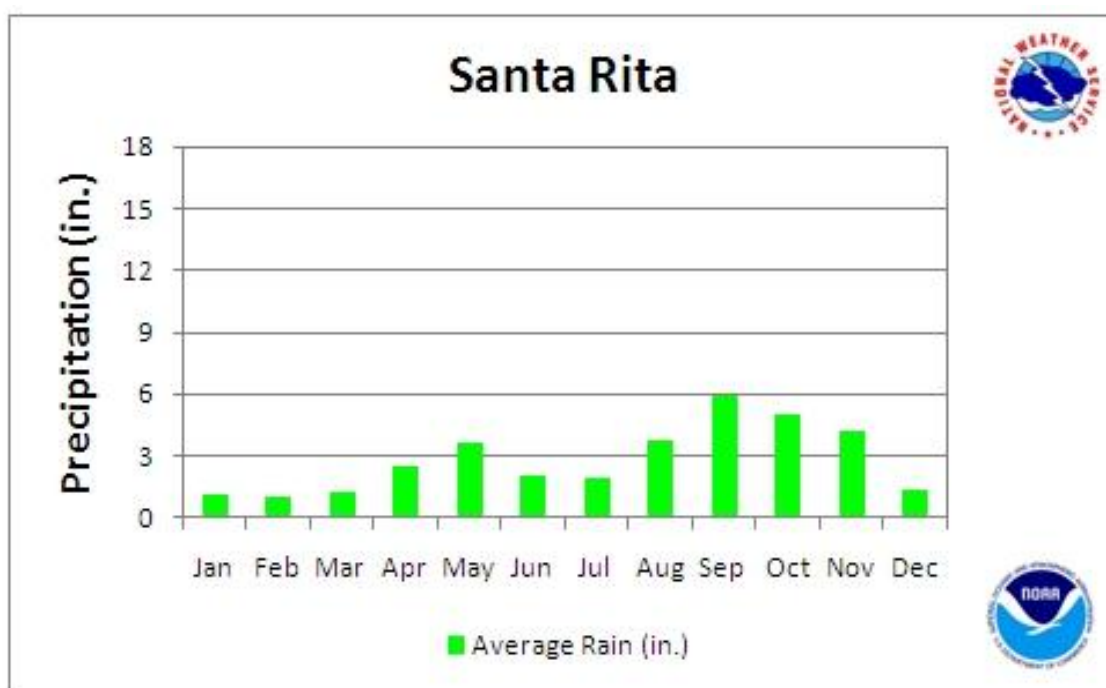
| Prueba U | N residual | N absorbido |
|-----------------|-------------------|--------------------|
| W1 | 153 | 137 |
| W2 | 147 | 163 |
| U | 69 | 59 |
| Mean | 72 | 72 |
| var | 300 | 300 |
| Z | -0.17 | -0.75 |

*El valor de Z tabular correspondiente a un nivel de significancia $\alpha=0.05$ es de +/- 1.96.

Anejo 8: Datos Históricos precipitación Estación Santa Rita (1971-2000).



Left: Estación Meteorológica en Santa Rita, PR.



| <i>NCDC 1971-2000</i> | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec | Annual |
|------------------------------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|--------|
| Average Rain (in.) | 1.11 | 1.05 | 1.28 | 2.55 | 3.62 | 2.1 | 1.91 | 3.75 | 5.89 | 5.05 | 4.26 | 1.35 | 33.92 |

Fuente: <http://www.srh.noaa.gov>

Anejo 9: Descripción oficial de las series de suelo en los predios del estudio.

LOCATION GUAYACAN

PR

Established Series

Rev. JLL; GRB

02/2008

GUAYACAN SERIES

The Guayacan series consists of very deep, well drained, moderately slowly permeable soils on alluvial fans, ridge tops and side slopes of the Semiarid Mountains and Valleys MLRA. They formed in material that weathered from limestone. Near the type location, the mean annual temperature is about 80 degrees F., and the mean annual precipitation is about 32 inches. Slopes range from 2 to 20 percent.

TAXONOMIC CLASS: Fine-loamy, mixed, superactive, isohyperthermic Typic Haplocalcids

TYPICAL PEDON: Guayacan clay--pastureland (Colors are for moist soil unless otherwise indicated).

Ap--0 to 8 inches; dark brown (7.5YR 3/3) clay, dark brown (10YR 3/3) dry; strong medium granular structure; firm; slightly sticky, slightly plastic; many very fine, fine, and medium roots; many very fine interstitial pores; about 2 percent, by volume, pebbles; slightly effervescent; moderately alkaline; clear wavy boundary. (4 to 15 inches thick)

Bw--8 to 12 inches; very dark grayish brown (10YR 3/2) clay, dark brown (10YR 3/3) dry; strong medium angular blocky structure; firm; slightly sticky, moderately plastic; many very fine and fine roots, few medium roots; many very fine and few fine tubular and vesicular pores; about 3 percent, by volume, pebbles; moderately effervescent; moderately alkaline; clear wavy boundary. (4 to 12 inches thick)

Bk1--12 to 25 inches; dark yellowish brown (10YR 4/4) clay, brown (10YR 4/3) dry; moderate medium subangular blocky structure; firm; slightly sticky, moderately plastic; many very fine roots, few fine roots; many very fine and few fine tubular and vesicular pores; common filaments of calcium carbonate; about 10 percent, by volume, pebbles; moderately effervescent; moderately alkaline; abrupt wavy boundary.

Bk2--25 to 45 inches; yellowish brown (10YR 5/4) gravelly loam, brown (10YR 5/3) dry; weak medium subangular blocky structure; friable; slightly sticky, slightly plastic; many very fine roots, common fine roots; many very fine and common fine tubular and vesicular pores; many prominent soft masses of calcium carbonate; about 15 percent, by volume, pebbles; strongly effervescent; moderately alkaline; clear wavy boundary. (Combined thickness of the Bk horizons ranges from 27 to 35 inches)

C--45 to 59 inches; brown (10YR 4/3) loam, brown (10YR 5/3) dry; massive; friable; slightly sticky, nonplastic; many very fine roots, common fine roots; many very fine and few fine tubular and vesicular pores; common prominent soft masses of calcium carbonate; about 5 percent, by volume, pebbles; strongly effervescent; moderately alkaline; clear wavy boundary.

2C--59 to 76 inches; very pale brown (10YR 7/3) very gravelly silt loam, very pale brown (10YR 8/2) dry; massive; friable; slightly sticky, nonplastic; few very fine roots; many very fine tubular and vesicular pores; many distinct very dark grayish brown (10YR 3/2) masses; many prominent soft masses of calcium carbonate; about 45 percent, by volume, pebbles; strongly effervescent; strongly alkaline; gradual wavy boundary.

3C--76 to 90 inches; very dark grayish brown (10YR 3/2) gravelly clay loam, very dark gray (10YR 3/1) dry; massive; friable; slightly sticky, slightly plastic; few fine and medium roots; few very fine tubular and vesicular pores; many distinct very pale brown (10YR 7/3) masses; common prominent soft masses of calcium carbonate; about 5 percent, by volume, pebbles; strongly effervescent; moderately alkaline.

TYPE LOCATION: Lajas, Puerto Rico. Approximately 2.9 miles southwest of La Parguera community, about 2.2 miles southeast of Rancho Cabassa and about 100 feet east of dirt road in pastureland. USGS Parguera topographic quadrangle (1966); lat. 17 degrees 57 minutes 58 seconds N.; long. 67 degrees 05 minutes 30 seconds W.

RANGE IN CHARACTERISTICS: Solum thickness ranges from 35 to 60 inches. Reaction is slightly alkaline or moderately alkaline in the A and Bw horizons and moderately alkaline in the Bk and C horizons.

The A or Ap horizon has hue of 7.5YR or 10YR, value of 2 or 3, and chroma of 1 to 3. Content of pebbles ranges from 0 to 10 percent, by volume. Texture is loam, clay loam, or clay.

The Bw horizon, where present, has hue of 7.5YR or 10YR, value of 3 or 4, and chroma of 2 to 4. Content of pebbles range from 0 to 25 percent, by volume. Texture is loam, clay loam, clay, or their gravelly analogs.

The Bk horizon has hue of 10YR, value of 4 to 6, and chroma of 4 to 6. Filaments and soft masses of calcium carbonate range from common to many. Content of pebbles range from 5 to 25 percent, by volume. Texture is loam, clay loam, clay, or their gravelly analogs.

The C horizon has hue of 10YR to 5Y, value of 3 to 7, and chroma of 2 to 6. Content of pebbles and cobbles range from 0 to 60 percent, by volume. Texture ranges from silt loam to clay loam or their gravelly and very gravelly analogs.

COMPETING SERIES: These are no known series in the same family.

GEOGRAPHIC SETTING: Guayacan soils are on alluvial fans, ridge tops, and side slopes of the Semiarid Mountains and Valleys MLRA of southern Puerto Rico. Slopes range from 2 to 20 percent. They formed in material that weathered from limestone. The climate is tropical

semiarid. The average annual precipitation ranges from 28 to 36 inches and the average annual temperature ranges from 78 to 82 degrees F.

GEOGRAPHICALLY ASSOCIATED SOILS: These are the [Duey](#), Esteli (T), [Jacana](#), [Parguera](#), and [San German](#) series. All of these soils except Parguera soils are on higher positions. In addition, Duey and San German soils are shallow to soft limestone bedrock, Esteli (T) soils are deep to soft limestone bedrock and have coarse-loamy control sections, and Jacana soils are moderately deep to saprolite of volcanic origin. Parguera soils are on similar positions and have clayey-skeletal control sections.

DRAINAGE AND PERMEABILITY: Well drained; moderately slowly permeability.

USE AND VEGETATION: Most areas of Guayacan soils are on pastureland and hayland. A few areas are in wildlife refuges. The vegetation consists mainly of Hurricane grass, raboraton, Mesquite and Holywood lignumvitae trees. Other vegetation consists of xerophytic grasses and shrubs.

DISTRIBUTION AND EXTENT: Alluvial fans, ridge tops, and side slopes of the semiarid mountains and valleys of southern Puerto Rico. The series is small extent.

MLRA SOIL SURVEY REGIONAL OFFICE (MO) RESPONSIBLE: Raleigh, North Carolina.

SERIES ESTABLISHED: Puerto Rico; 2007. The name is from the Guayacan offshore island nearby where it was originally recognized.

REMARKS: Diagnostic horizons and features recognized in this pedon:

Ochric epipedon - the zone from 0 to 8 inches (Ap horizon).

Cambic horizon - the zone from 8 to 12 inches (Bw horizon).

Calcic horizon - the zone from 12 to 45 inches (Bk1 and Bk2 horizons).

Guayacan soils were formerly included in the Pozo Blanco series. A soil moisture study conducted in the San Germn Area Soil Survey Update recognizes the Aridic Soil Moisture Regime in southern Puerto Rico.

ADDITIONAL DATA: Characterization pedon - Lajas Municipality, Puerto Rico; S97PR-079-001. Sample by NSSL, Lincoln, NE., 06/97.

Guayacan soils are in MLRA 271.

Established Series

JLL; GRB

02/2008

MELONES SERIES

The Melones series consists of very deep, well drained, slowly permeable soils on alluvial fans of the Semiarid Coastal Plains MLRA. They formed in loamy and clayey fluvial and marine sediments. Near the type location, the mean annual temperature is about 80 degrees F., and the mean annual precipitation is about 32 inches. Slopes range from 0 to 12 percent.

TAXONOMIC CLASS: Fine, smectitic, isohyperthermic Chromic Calcitorrerts

TYPICAL PEDON: Melones clay--wildlife refuge (Colors for moist soil).

A--0 to 7 inches; dark brown (10YR 3/3) clay; strong medium granular structure; hard, firm; moderately sticky, moderately plastic; many very fine and fine roots; many very fine interstitial pores; about 7 percent, by volume, pebbles; slightly alkaline; clear wavy boundary. (6 to 12 inches thick)

Btss--7 to 18 inches; brown (10YR 4/3) clay; strong medium angular blocky structure; hard, firm; moderately sticky, moderately plastic; many fine roots, common medium roots; many very fine, few fine tubular and vesicular pores; common faint intersecting slickensides having polished and grooved surfaces; about 1 percent, by volume, pebbles; slightly alkaline; clear wavy boundary. (6 to 18 inches thick)

Btk1--18 to 37 inches; dark brown (7.5YR 3/4) clay; moderate medium angular blocky structure; hard, firm; sticky, plastic; many fine roots, common medium roots; many very fine and common fine tubular and vesicular pores; many prominent soft masses of calcium carbonate; about 5 percent, by volume, pebbles; moderately alkaline; gradual wavy boundary.

Btk2--37 to 46 inches; brown (7.5YR 4/4) clay; strong medium subangular blocky structure; hard, firm; sticky, plastic; few medium roots; many very fine and common fine medium tubular and vesicular pores; common distinct soft masses of calcium carbonate; about 5 percent, by volume, pebbles; moderately alkaline; clear wavy boundary. (Combined thickness of the Btk horizons ranges from 10 to 30 inches)

B't1--46 to 66 inches; brown (7.5YR 4/4) clay; moderate medium subangular blocky structure; hard, firm; sticky, plastic; few fine and medium roots; many very fine and common fine tubular and vesicular pores; few faint nonintersecting slickensides having polished and grooved surfaces; about 3 percent, by volume, pebbles; moderately alkaline; clear wavy boundary.

B't2--66 to 70 inches; strong brown (7.5YR 4/6) gravelly clay loam; weak medium subangular blocky structure; friable; slightly sticky, slightly plastic; few fine and medium roots; many very fine and common fine tubular and vesicular pores; about 30 percent, by volume, pebbles; moderately alkaline; abrupt wavy boundary. (Combined thickness of the B't horizons is 15 to 31 inches).

2C--70 to 80 inches; yellowish brown (10YR 5/6) clay; massive; slightly hard, firm; slightly sticky, slightly plastic; many very fine and few fine tubular and vesicular pores; about 3 percent, by volume, pebbles; moderately alkaline.

TYPE LOCATION: Cabo Rojo Municipio, Puerto Rico. Approximately 2.7 miles east of El Combate community on P.R. Hwy. 301 at the Cabo Rojo National Wildlife Refuge facilities at Boqueron; about 1.2 miles southwest from the intersection of P.R. Hwy. 301 and P.R. Hwy. 303, about 100 feet east in a hay field. Cabo Rojo topographic quadrangle; lat. 17 degrees 58 minutes 45 seconds N.; long. 67 degrees 10 minutes 16 seconds W.; PRD 1940.

RANGE IN CHARACTERISTICS: Solum thickness is more than 60 inches. Reaction ranges from slightly alkaline to moderately alkaline in the A and Bt horizons, and moderately alkaline in the Btk, B't, and C horizons.

The A or Ap horizon has hue of 7.5YR or 10YR, value of 3 or 4, and chroma of 3 or 4. Texture is clay loam or clay.

The Bt horizon has hue of 10YR, value of 3 to 5, and chroma of 3 to 6. Content of pebbles is less than 10 percent, by volume. Texture is clay loam or clay.

The Btk horizon has hue of 7.5YR to 2.5Y, value of 3 To 5, and chroma of 3 To 6. Content of pebbles range from 15 to 60 percent, by volume, but weighted average is below 35 percent for the control section. Filaments and soft masses of calcium carbonate range from common to many. Texture is clay loam or clay in the fine-earth fraction.

The B't horizons have hue of 7.5YR or 10YR, value of 3 or 4, and chroma of 3 to 7. Content of pebbles range from 0 to 30 percent, by volume. Texture is sandy clay loam, clay loam, clay, or their gravelly analogues.

The BCk horizon, where present, has hue of 10YR, value of 4 to 6, and chroma of 3 to 6. Content of pebbles and cobbles range from 35 to 75 percent, by volume. Texture is sandy clay loam or clay loam in the fine-earth fraction.

The C horizon has hue of 7.5YR or 10YR, value of 4 or 6, and chroma of 4 to 8. Content of pebbles is less than 15 percent, by volume. Texture is clay loam or clay.

COMPETING SERIES: There are no other known series in the same family.

GEOGRAPHIC SETTING: Melones soils are on alluvial fans of the Semiarid Coastal Plains MLRA. Slopes range from 0 to 12 percent. They formed in clayey and loamy fluvial and marine

sediments. The climate is semiarid tropical. The average annual air temperature ranges from 78 to 82 degrees F., and the average annual precipitation ranges from 30 to 40 inches.

GEOGRAPHICALLY ASSOCIATED SOILS: These include the Amelia, Maguayo, Pozo Blanco, and Sosa soils. Amelia soils are on slightly higher positions, have a mixed mineralogy, and are loamy-skeletal. Maguayo soils are on similar positions and have a mixed mineralogy. Pozo Blanco soils are on similar positions, have mixed mineralogy, and are fine-loamy. Sosa soils are on slightly lower positions and are kaolinitic.

DRAINAGE AND PERMEABILITY: Well drained; slow permeability.

USE AND VEGETATION: Most areas of Melones soils are used for hayland and native pasture. A few areas are used for cropland and wildlife habitat. The vegetation consists primarily of kleberg bluestemgrass, huracan, mesquite, and other xerophytic grasses, shrubs, and trees.

DISTRIBUTION AND EXTENT: Semiarid coastal plains of southern Puerto Rico. The series is not extensive.

MLRA SOIL SURVEY REGIONAL OFFICE (MO) RESPONSIBLE: Raleigh, North Carolina.

SERIES ESTABLISHED: Cabo Rojo Municipio, Puerto Rico; 2007.

REMARKS: Diagnostic horizons and other features recognized in this pedon:

Ochric epipedon - the zone from 0 to 7 inches.

Argillic horizon - the zone from 7 to 70 inches (Bt, Btk1, Btk2, B't1, B't2 horizons).

Calcic horizon - the zone from 18 to 46 inches (Btk1 and Btk2 horizons).

Slickensides and vertic features - the zone from 7 to 18 inches and from 46 to 66 inches (Bt, B't1, and B't2 horizons).

These soils were formerly mapped as a gravelly clay substratum phase of the Fraternidad series.

ADDITIONAL DATA: Characterization pedon - Cabo Rojo Municipio, Puerto Rico; SPR97-023-003. Sample by the NSSL, Lincoln, NE.

National Cooperative Soil Survey

U.S.A.

Anejo 10: Fotos del estudio

Cultivo Cebolla: sembrada Octubre 22, 2012





Cultivo Calabaza: sembrada Abril 15, 2013





Cultivo Pimiento: sembrado Octubre 11, 2013





Cultivo Tomate: sembrado octubre 15, 2013

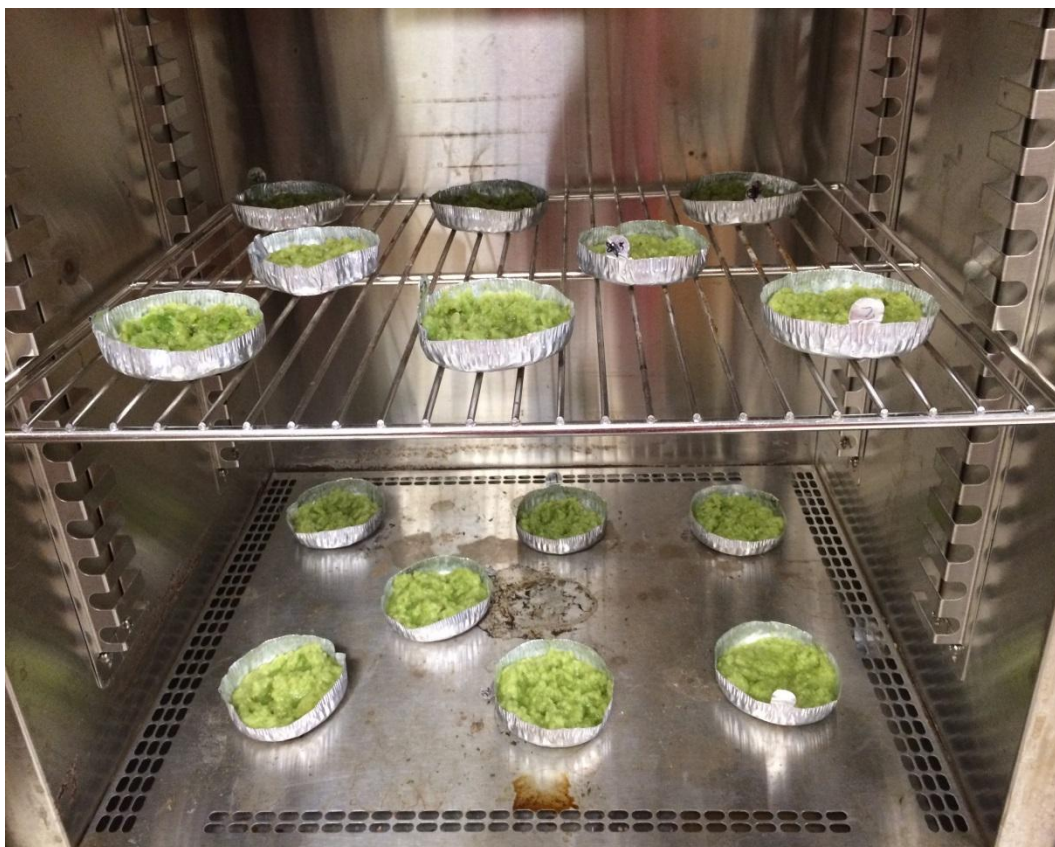


Muestreo de suelo en los replicados establecidos

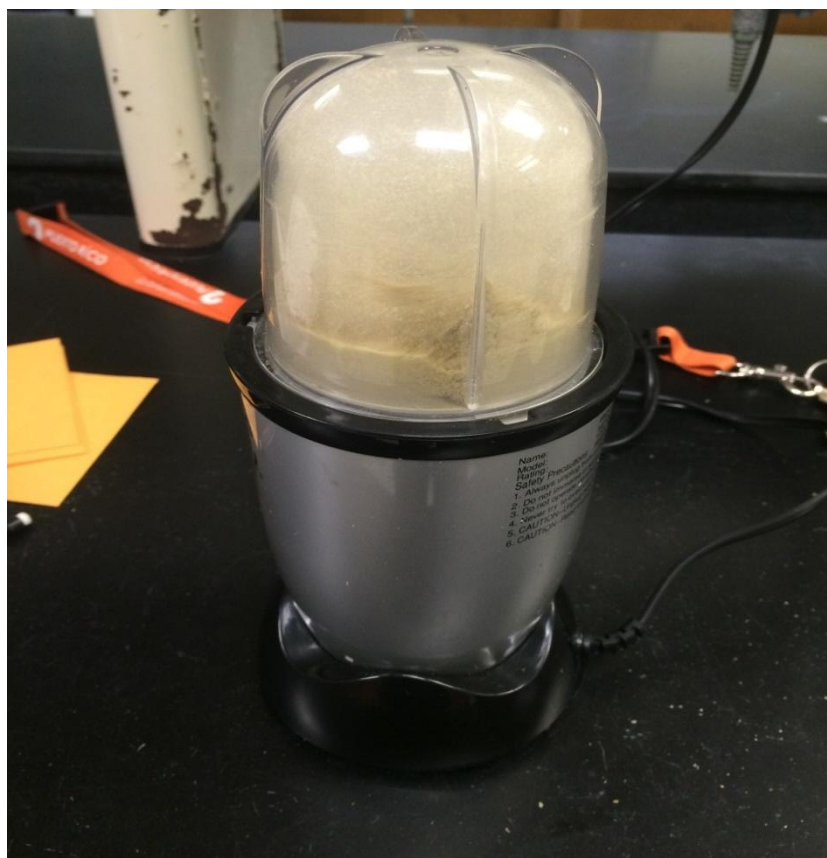


Preparación Muestras de Tejido de fruto para análisis





Secado de Muestras vegetales para análisis de contenido de N.



Muestras vegetales luego de secado a 60°C por 24 hrs.

Anejo 11: Contactos

Miguel Oliveras Berrocales

Email: miguel.oliveras@upr.edu

Dr. David R. Sotomayor Ramírez

Email: david.sotomayor@upr.edu