

**TRANSPORTE DE SEDIMENTOS Y FÓSFORO EN ESCORRENTÍA BAJO  
SIMULACIÓN DE LLUVIA**

**Por**

**JOHN JAIRO RAMÍREZ AVILA**

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

**MAESTRO EN CIENCIAS**

en

**SUELOS**

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO  
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ  
2005

Aprobado por:

\_\_\_\_\_  
Gustavo A. Martínez Rodríguez, Ph D.  
Miembro Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Luis R. Pérez Alegría, Ph D.  
Miembro Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
David Sotomayor Ramírez, Ph D.  
Presidente Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Rafael Segarra García, Ph D.  
Representante de Escuela Graduada

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Miguel A. Muñoz Muñoz, Ph D.  
Director del Departamento

\_\_\_\_\_  
Fecha

## ABSTRACT

Phosphorus (P) in runoff from agricultural soils is an important contributor to surface water eutrophication. To quantify P losses from organic (poultry litter [PL]) and inorganic (triple superphosphate [TSP]) P amended soils, the relationship between runoff P and Olsen and Bray I soil test P (STP) in two geographic zones in Puerto Rico was evaluated, using simulated rainfall. The soils were an Ultisol-Oxisol complex with nativized pastures in Mayagüez and an Ultisol with grass cover (*Brachiaria Decumbens*) in Corozal. The dissolved P fraction (DP) corresponded to 80% of total P (TP) concentrations in runoff Mayagüez, while in Corozal DP represented between 32 and 35% of TP concentrations in runoff in TSP and PL amended soils, respectively. Topography and groundcover variability between two areas was an incidental factor on the DP/TP ratios observed. The TP and DP concentrations in runoff increased with STP following an exponential model. Organic residues in surface soil and plant material increased P losses and concentrations in PL amended soils. Runoff P fractions and concentrations were reduced with increases in runoff volume and antecedent soil moisture. Environmental critical STP levels under inorganic amended soils, calculated based on a  $1 \text{ mg L}^{-1}$  DP threshold were between 176 and  $184 \text{ mg kg}^{-1}$  Olsen P and  $206 \text{ mg kg}^{-1}$  for Bray I P, respectively. In organic amended soils it threshold values were 88 and  $111 \text{ mg kg}^{-1}$  Olsen and Bray I, respectively.

## RESUMEN

El fósforo (P) en la escorrentía proveniente de áreas agrícolas es un contribuyente importante de la eutroficación de cuerpos de agua superficial. Para determinar la pérdida de P de suelos enmendados con fuentes orgánicas (gallinaza [GL]) e inorgánicas (superfosfato triple [SFT]) de P, se evaluó la relación entre la prueba de P en el suelo (STP) y la concentración de P disuelto (DP) en la escorrentía en dos zonas geográficas, mediante aplicación de lluvia simulada. Los suelos pertenecían a un complejo Ultisol-Oxisol con gramíneas nativizadas en Mayagüez y al orden Ultisol con pastos (*Brachiaria Decumbens*) en Corozal. La fracción DP representó el 80% de la concentración de P total (TP) en la escorrentía en Mayagüez y en Corozal representó el 32 y 35% para los predios enmendados con SFT y GL, respectivamente. La variabilidad en la topografía y grado de cobertura de la superficie del suelo, incidió en la fracción DP/TP observada. Las concentraciones de DP y TP en la escorrentía se incrementaron con el aumento en la STP de la superficie del suelo, siguiendo un modelo exponencial. La presencia de material orgánico en la superficie del suelo incidió en la mayor pérdida de P en la escorrentía desde predios con enmienda GL. Las fracciones y concentraciones de P en la escorrentía se redujeron por el aumento en el volumen de escorrentía y de la humedad antecedente del suelo. El nivel crítico ambiental de P en la STP bajo enmienda SFT calculado para la concentración máxima permisible de  $1 \text{ mg L}^{-1}$  de DP en la escorrentía, estuvo entre  $176$  y  $184 \text{ mg kg}^{-1}$  para Olsen y  $206 \text{ mg kg}^{-1}$  Bray I. Bajo la enmienda GL este valor fue de  $88$  y  $111 \text{ mg kg}^{-1}$  Olsen y Bray I, respectivamente.

A Dios. Fortaleza espiritual de mi  
vida y mi familia

A mis padres Hernán y Amparo, por  
todo el amor que nos han ofrecido.

A mis hermanos Wily y Judy,  
seguimos creciendo juntos

A Christian y Juan, un par de ángeles  
que desde el cielo cuidan a mi  
familia.

A mi sobrino Miguel Ángel, alegría y  
picardía.

A ti mi chiquita Sandra. Son muchos  
los bellos momentos que hemos  
compartido.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por ser mi guía y mi apoyo. A toda mi familia por su presencia.

Al doctor David Sotomayor Ramírez por la oportunidad brindada y la confianza depositada en esta importante etapa.

A los doctores Gustavo Martínez, Miguel Muñoz, Edwin Mas Victor Snyder y Eric Harmsen por la orientación, el apoyo y la confianza ofrecidas para hacer un mejor desempeño académico y técnico.

Al doctor Luis Pérez Alegría, a los agrónomos William Lozada y Ramón Ortíz y demás miembros del departamento de Ingeniería Agrícola y Biosistemas, por el apoyo logístico y técnico ofrecidos.

Al doctor Gary Lemunyon por el apoyo brindado para la ejecución de este proyecto.

A los agrónomos Jaime Reyes, Juan Ortiz y Rafael Ramos y a cada uno de los miembros de la Finca Laboratorio de Alzamora y de la Estación Experimental Agrícola de Corozal, por el apoyo brindado en el desarrollo de la investigación.

A Evelyn, Gloria, Zulma, Olga y Madeleine. A Onilda, Miguel y José Luis en el Laboratorio de química de suelos y aguas de Río Piedras. Se que no fue un trabajo fácil.

A los equipos técnicos de NRCS de Puerto Rico y Nebraska.

A Kathy, José Carlos, Joel, Carmen, Juan Valle, Rocío y Jairo Díaz, por la desinteresada amistad que nos han ofrecido a Sandra y a mi. A don Ulises y la señora Vanessa, más que apoyo y confianza, una familia.

A Hector “Pino”, Pedro, Victor, Jaime, Eduardo y Oscar, excelentes trabajadores y compañeros en Mayagüez. A Leandro, José y Juan por el esfuerzo ofrecido en el trabajo de campo.

A todos aquellos compañeros, profesores y personas que de una u otra forma hicieron parte de mi trabajo y de mi vida en la UPR.

A mi Universidad Nacional de Colombia, porque en verdad fueron muchos los valores y enseñanzas que en ella obtuve.

A la Universidad de Puerto Rico por ser la guía en un nuevo sendero de mi camino.

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                                                                 |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| LISTA DE FIGURAS.....                                                                           | viii |
| LISTA DE TABLAS.....                                                                            | xii  |
| LISTA DE ANEXOS.....                                                                            | xv   |
| INTRODUCCIÓN.....                                                                               | 1    |
| 1. REVISIÓN DE LITERATURA .....                                                                 | 5    |
| 1.1. GENERALIDADES.....                                                                         | 5    |
| 1.2. CICLO DEL P EN EL SUELO .....                                                              | 6    |
| 1.2.1. Efecto de la materia orgánica sobre la disponibilidad de P<br>en el suelo .....          | 7    |
| 1.3. MANEJO PARA MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS DE P EN LA<br>AGRICULTURA .....                         | 7    |
| 1.4. RELACIÓN ENTRE LA PRUEBA DE SUELO Y LA<br>CONCENTRACIÓN DE P EN LA ESCORRENTÍA.....        | 10   |
| 1.4.1. Susceptibilidad del suelo a la pérdida de P.....                                         | 15   |
| 1.5. RELACIÓN ENTRE EL NIVEL Y TIEMPO DE APLICACIÓN DE<br>ENMIENDAS CON LAS PÉRDIDAS DE P ..... | 16   |
| 1.6. ÍNDICE DE P.....                                                                           | 17   |
| 2. PÉRDIDAS DE P Y SEDIMENTOS EN LA ESCORRENTÍA EN UN<br>COMPLEJO ULTISOL-OXISOL .....          | 19   |
| 2.1. MATERIALES Y MÉTODOS .....                                                                 | 19   |
| 2.1.1. Establecimiento de parcelas y desarrollo de pruebas de<br>simulación .....               | 20   |
| 2.1.2. Métodos estadísticos .....                                                               | 23   |
| 2.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                                                                | 26   |
| 2.2.1. Generalidades.....                                                                       | 26   |
| 2.2.2. Caracterización del suelo .....                                                          | 26   |
| 2.2.3. Comportamiento del flujo superficial .....                                               | 31   |
| 2.2.4. Movimiento de fósforo .....                                                              | 34   |
| 2.2.5. Masa de sedimentos y de fósforo en el flujo superficial .....                            | 41   |

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.2.6. Relación entre la prueba de P en el suelo y la concentración de P en el flujo. ....             | 43  |
| 2.2.7. Determinación del valor crítico ambiental de P .....                                            | 56  |
| 2.3. CONCLUSIONES .....                                                                                | 58  |
| 3. PÉRDIDAS DE P Y SEDIMENTOS EN LA ESCORRENTÍA EN UN ULTISOL BAJO DIFERENTES FUENTES DE ENMIENDA..... | 60  |
| 3.1. MATERIALES Y MÉTODOS .....                                                                        | 60  |
| 3.1.1. Establecimiento de parcelas y desarrollo de pruebas de simulación .....                         | 61  |
| 3.1.2. Métodos estadísticos .....                                                                      | 64  |
| 3.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                                                                       | 67  |
| 3.2.1. Generalidades .....                                                                             | 67  |
| 3.2.2. Caracterización del suelo .....                                                                 | 67  |
| 3.2.3. Comportamiento del flujo superficial .....                                                      | 73  |
| 3.2.4. Movimiento de fósforo .....                                                                     | 76  |
| 3.2.5. Masa de sedimentos y de fósforo en el flujo superficial .....                                   | 87  |
| 3.2.6. Relación entre la prueba de P en el suelo y la concentración de P en la escorrentía. ....       | 90  |
| 3.2.7. Determinación del valor crítico ambiental de P .....                                            | 104 |
| 3.3. CONCLUSIONES .....                                                                                | 106 |
| 4. RECOMENDACIONES .....                                                                               | 108 |
| LITERATURA CITADA .....                                                                                | 110 |
| ANEXOS.....                                                                                            | 120 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1. Relación entre la prueba de P del suelo y la concentración de DP en la esorrentía para estudios en cajas de suelo y parcelas en pasturas (A) y estudios en parcelas con o sin mecanización (B), donde el coeficiente de extracción no presentó diferencia significativa (Adaptado de Vadas et al., 2005)..... | 14 |
| Figura 2.1. Curva de calibración presión - intensidad para el simulador de lluvia a una altura de boquilla de 3m.....                                                                                                                                                                                                     | 26 |
| Figura 2.2. Distribución relativa del valor de la prueba de P del suelo Olsen P, de acuerdo con su susceptibilidad a la pérdida de P en la esorrentía.....                                                                                                                                                                | 28 |
| Figura 2.3. Distribución relativa del valor de la prueba de P del suelo Bray I P, de acuerdo con su susceptibilidad a la pérdida de P en la esorrentía.....                                                                                                                                                               | 28 |
| Figura 2.4. Relación entre los métodos de extracción Olsen y Bray I, para determinar la prueba de P en el suelo.....                                                                                                                                                                                                      | 29 |
| Figura 2.5. Variación en el pH del suelo para diferentes niveles en las pruebas de P Olsen y Bray I.....                                                                                                                                                                                                                  | 31 |
| Figura 2.6. Relación entre el contenido de humedad antecedente del suelo y el tiempo de respuesta del flujo bajo una intensidad de 70 mm hr <sup>-1</sup> .....                                                                                                                                                           | 33 |
| Figura 2.7. Relación entre el contenido de humedad inicial y la respuesta hidrológica del suelo (E/P) bajo una simulación de lluvia de 70 mm hr <sup>-1</sup> .....                                                                                                                                                       | 33 |
| Figura 2.8. Hidrograma esorrentía en un Ultisol bajo 30 min de simulación de lluvia a una intensidad de 70 mm/hr.....                                                                                                                                                                                                     | 34 |
| Figura 2.9. Relación entre las concentraciones de DP y TP en la esorrentía .....                                                                                                                                                                                                                                          | 37 |
| Figura 2.10. Relación entre las concentraciones de DP, TP en la esorrentía y $\Theta_g$ en el suelo.....                                                                                                                                                                                                                  | 37 |

|                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.11. Relación entre la concentración de SS y la<br>escorrentía.....                                                                                                                                                    | 38 |
| Figura 2.12. Relación entre la concentración de SS y las fracciones<br>de P en el flujo.....                                                                                                                                   | 38 |
| Figura 2.13. Relación entre la concentración de TP y DP en la<br>escorrentía y el contenido de MO del suelo.....                                                                                                               | 45 |
| Figura 2.14. Relación entre la prueba de suelo, el contenido de MO<br>y la concentración de TP en la escorrentía.....                                                                                                          | 45 |
| Figura 2.15. Relación entre la prueba de suelo Olsen (A) y Bray I<br>(B) y la concentración de DP en la escorrentía para eventos con<br>diferente tiempo de escorrentía en dos días de simulación.....                         | 49 |
| Figura 2.16. Relación entre la prueba de suelo Olsen (A) y Bray I<br>(B) y la concentración de TP en la escorrentía para eventos con<br>diferente tiempo de escorrentía en dos días de simulación.....                         | 50 |
| Figura 2.17. Relación entre la prueba de suelo, el contenido de<br>humedad antecedente del suelo y la concentración de TP en la<br>escorrentía.....                                                                            | 51 |
| Figura 2.18. Relación entre la prueba de suelo, el contenido de<br>humedad antecedente del suelo y la concentración de DP en la<br>escorrentía.....                                                                            | 51 |
| Figura 2.19. Incremento de la lámina de flujo en un evento de<br>precipitación ( $I=70 \text{ mm hr}^{-1}$ ).....                                                                                                              | 53 |
| Figura 2.20. Relación entre la prueba de suelo, la lámina de<br>escorrentía y la concentración de DP en el flujo.....                                                                                                          | 53 |
| Figura 2.21. Comportamiento de la concentración de DP en la<br>escorrentía para eventos de lluvia de diferente duración en día 1<br>(A) y día 2 (B), en suelos con diferente susceptibilidad a la pérdida<br>de P (Olsen)..... | 54 |
| Figura 2.22. Comportamiento de la concentración de DP en la<br>escorrentía para eventos de lluvia de diferente duración en día 1<br>(A) y día 2 (B), en suelos con diferente susceptibilidad a la pérdida<br>de P (Bray).....  | 55 |

|                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.1. Curva de calibración presión - intensidad para el simulador de lluvia a una altura de boquilla de 3m.....                                                                             | 67 |
| Figura 3.2. Distribución relativa del valor de la prueba Olsen de P del suelo, para predios bajo dos tipos de enmienda de acuerdo con su susceptibilidad a la pérdida de P en la escorrentía..... | 70 |
| Figura 3.3. Distribución relativa del valor de la prueba de P del suelo Bray, para predios bajo dos tipos de enmienda de acuerdo con su susceptibilidad a la pérdida de P en la escorrentía.....  | 70 |
| Figura 3.4. Relación entre los métodos de extracción Olsen y Bray I, para determinar la prueba de P en predios enmendados con gallinaza y superfosfato triple.....                                | 72 |
| Figura 3.5. Variación en el pH del suelo para diferentes niveles en las pruebas de P Bray I bajo dos fuentes de enmienda de P.....                                                                | 73 |
| Figura 3.6. Variación en el pH del suelo para diferentes niveles en las pruebas de P Olsen bajo dos fuentes de enmienda de P.....                                                                 | 73 |
| Figura 3.7. Relación entre el contenido de humedad antecedente del suelo y el tiempo de respuesta del flujo bajo una intensidad de $70 \text{ mm hr}^{-1}$ .....                                  | 75 |
| Figura 3.8. Hidrograma de escorrentía en un Ultisol bajo 30 min de simulación de lluvia a una intensidad de $70 \text{ mm/hr}$ en el día 1 (A) y en el Día 2 (B).....                             | 76 |
| Figura 3.9. Relación entre la concentración de DP y TP en la escorrentía.....                                                                                                                     | 85 |
| Figura 3.10. Relación entre la concentración de PP* y TP en la escorrentía.....                                                                                                                   | 85 |
| Figura 3.11. Correlación entre DP, TP y $\Theta$ .....                                                                                                                                            | 86 |
| Figura 3.12. Correlación entre PP*, TP y $\Theta$ .....                                                                                                                                           | 86 |
| Figura 3.13. Relación entre la concentración de SS y la REP en la escorrentía.....                                                                                                                | 87 |

|                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.14. Relación entre la descarga de sedimentos y la escorrentía para predios bajo diferente enmienda.....                                                                                                                 | 90  |
| Figura 3.15. Relación entre la concentración de TP en la escorrentía y el contenido de MO del suelo.....                                                                                                                         | 95  |
| Figura 3.16. Relación entre la prueba de suelo Olsen (A) y Bray I (B) y la concentración de TP en la escorrentía para eventos con diferentes tiempos de escorrentía en dos días de simulación en predios GL.....                 | 98  |
| Figura 3.17. Relación entre la prueba de suelo Olsen (A) y Bray I (B) y la concentración de TP en la escorrentía para eventos con diferentes tiempos de escorrentía en dos días de simulación en predios SFT.....                | 99  |
| Figura 3.18. Relación entre la prueba de suelo Olsen (A) y Bray I (B) y la concentración de DP en la escorrentía para eventos con diferentes tiempos de escorrentía en dos días de simulación en predios GL.....                 | 100 |
| Figura 3.19. Relación entre la prueba de suelo Olsen (A) y Bray I (B) y la concentración de DP en la escorrentía para eventos con diferentes tiempos de escorrentía en dos días de simulación en predios SFT.....                | 101 |
| Figura 3.20. Comportamiento de la concentración de DP en la escorrentía para eventos de lluvia de diferente duración en día 1 (A) y día 2 (B), en suelos con diferente susceptibilidad a la pérdida de P enmendados con SFT..... | 102 |
| Figura 3.21. Comportamiento de la concentración de DP en la escorrentía para eventos de lluvia de diferente duración en día 1 (A) y día 2 (B), en suelos con diferente susceptibilidad a la pérdida de P enmendados con GL.....  | 103 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1.1. Índice categórico ambiental de la prueba de P del suelo para Puerto Rico.....                                                                             | 16 |
| Tabla 2.1. Caracterización de las muestras de suelo agrupadas por su nivel de susceptibilidad a la pérdida de fósforo.....                                           | 27 |
| Tabla 2.2. Parámetros hidrológicos generados a una intensidad de 70 mm h <sup>-1</sup> .....                                                                         | 32 |
| Tabla 2.3. Valores promedio de la concentración de P y sedimentos en la escorrentía.....                                                                             | 35 |
| Tabla 2.4. Concentración promedio de DP y TP en la escorrentía tras 30 minutos de flujo, para cada nivel de susceptibilidad a la pérdida de P en la escorrentía..... | 39 |
| Tabla 2.5. Relación DP/TP para un suelo con diferentes niveles de susceptibilidad a la pérdida de P en escorrentía de 30 minutos.....                                | 39 |
| Tabla 2.6. Concentración promedio de SS y PP* en la escorrentía para cada nivel de susceptibilidad a la pérdida de P en 30 minutos de escorrentía.....               | 40 |
| Tabla 2.7. Valor promedio descarga de P y de sedimentos suspendidos en la escorrentía.....                                                                           | 41 |
| Tabla 2.8. Descarga promedio de DP y TP en la escorrentía para cada nivel de susceptibilidad a la pérdida de P en la escorrentía.....                                | 42 |
| Tabla 2.9. Descarga promedio de SS y PP* en la escorrentía para cada nivel de susceptibilidad a la pérdida de P en la escorrentía.....                               | 42 |
| Tabla 2.10. Parámetros de regresión entre la concentración de DP en la escorrentía y la prueba de suelo Olsen.....                                                   | 46 |
| Tabla 2.11. Parámetros de regresión entre la concentración de DP en la escorrentía y la prueba de suelo Bray I.....                                                  | 46 |
| Tabla 2.12. Parámetros de regresión entre la concentración de TP en la escorrentía y la prueba de suelo Olsen.....                                                   | 46 |

|                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2.13. Parámetros de regresión entre la concentración de TP en la escorrentía y la prueba de suelo Bray I.....                                                                                                | 47 |
| Tabla 2.14. Coeficiente de extracción de P por la escorrentía para las pruebas de suelo Olsen y Bray I en dos días de simulación y diferentes tiempos de escorrentía.....                                          | 48 |
| Tabla 2.15. Valor crítico ambiental de la prueba de P en el suelo bajo diferente duración de eventos de lluvia.....                                                                                                | 57 |
| Tabla 3.1. Caracterización de las muestras de suelo agrupadas por su nivel de susceptibilidad Olsen a la pérdida de fósforo.....                                                                                   | 68 |
| Tabla 3.2. Caracterización de las muestras de suelo agrupadas por su nivel de susceptibilidad Bray a la pérdida de fósforo.....                                                                                    | 69 |
| Tabla 3.3. Parámetros hidrológicos generados a una intensidad de $70 \text{ mm h}^{-1}$ .....                                                                                                                      | 75 |
| Tabla 3.4. Valor promedio de la concentración de P y descarga de sedimentos en la escorrentía.....                                                                                                                 | 77 |
| Tabla 3.5. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Olsen, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la concentración de DP y TP en la escorrentía.....   | 79 |
| Tabla 3.6. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Olsen, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la concentración de PP* y SS en la escorrentía.....  | 80 |
| Tabla 3.7. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Bray I, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la concentración de DP y TP en la escorrentía.....  | 81 |
| Tabla 3.8. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Bray I, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la concentración de PP* y SS en la escorrentía..... | 82 |

|                                                                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 3.9. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Olsen, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la concentración de DP/TP y PP*/TP en la escorrentía.....   | 83  |
| Tabla 3.10. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Bray I, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la concentración de DP/TP y PP*/TP en la escorrentía..... | 84  |
| Tabla 3.11. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Olsen, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la descarga de DP y TP en la escorrentía.....              | 88  |
| Tabla 3.12. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Bray I, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la descarga de DP y TP en la escorrentía.....             | 89  |
| Tabla 3.13. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorizaciones Olsen y Bray I y efecto de la fuente de enmienda sobre la descarga de SS en la escorrentía.....                        | 90  |
| Tabla 3.14. Parámetros de regresión entre la concentración de DP en la escorrentía y la prueba de suelo en predios GL.....                                                                                                | 91  |
| Tabla 3.15. Parámetros de regresión entre la concentración de DP en la escorrentía y la prueba de suelo en predios SFT.....                                                                                               | 92  |
| Tabla 3.16. Coeficiente de extracción de P por la escorrentía en predios bajo enmienda GL, para las pruebas de suelo Olsen y Bray I en dos días de simulación y diferentes tiempos de escorrentía.....                    | 97  |
| Tabla 3.17. Coeficiente de extracción de P por la escorrentía en predios bajo enmienda SFT, para las pruebas de suelo Olsen y Bray I en dos días de simulación y diferentes tiempos de escorrentía.....                   | 97  |
| Tabla 3.18. Valor crítico ambiental de la prueba de P en el suelo bajo diferente duración de eventos de lluvia.....                                                                                                       | 105 |

## LISTA DE ANEXOS

|                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ANEXO A. LOCALIZACIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO.....                                                                                                          | 120 |
| ANEXO A.1. DISTRIBUCIÓN DE LA PRUEBA DE SUELO POR<br>APLICACIÓN DE ENMIENDAS.....                                                                           | 121 |
| ANEXO B. CALIBRACIÓN DEL SIMULADOR DE LLUVIA.....                                                                                                           | 130 |
| ANEXO C. PRESENCIA DE Ca EN EL SUELO ENMENDADO<br>CON SFT.....                                                                                              | 135 |
| ANEXO D. EFECTO DE VARIABLES TOPOGRÁFICAS SOBRE<br>RELACIÓN DP/TP EN ESCORRENTÍA.....                                                                       | 138 |
| ANEXO E. PÉRDIDA DE P EN PREDIOS CON ENMIENDA<br>RECIÉN APLICADA.....                                                                                       | 143 |
| ANEXO F. FORMATOS.....                                                                                                                                      | 146 |
| ANEXO G. PARÁMETROS DE CORRELACIÓN LINEAL ENTRE<br>DP Y LA PRUEBA DE SUELO OLSEN Y BRAY I<br>SERIE HUMATAS-CONSUMO-DAGUEY (COMPLEJO<br>ULTISOL-OXISOL)..... | 148 |
| ANEXO H. FOTOGRAFÍAS.....                                                                                                                                   | 151 |
| ANEXO I. DESCRIPCIÓN TAXONÓMICA DEL COMPLEJO<br>OXISOL-ULTISOL.....                                                                                         | 159 |
| ANEXO J. DESCRIPCIÓN TAXONÓMICA DEL ULTISOL.....                                                                                                            | 163 |

## INTRODUCCIÓN

Una gran parte del fósforo (P) total en los suelos con mineralogía oxídica y caolinítica está fijado por mecanismos de adsorción y precipitación, por lo que una fracción relativamente pequeña está disponible (en solución) para la absorción por parte de las plantas. Frecuentemente hay que suplementar el suelo con este nutrimento a través de fertilizantes inorgánicos y orgánicos, para alcanzar niveles favorables de producción agrícola y pecuaria (Sharpley et al., 2003). La aplicación de enmiendas orgánicas se realiza principalmente con base en las necesidades de nitrógeno (N) por parte del cultivo, en ocasiones supliendo cantidades excesivas de P. En Puerto Rico, las prácticas intensivas de producción pecuaria (vaquerías y avícolas) generan sobreabundancia de desechos orgánicos en forma de estiércol y gallinaza, los cuales se disponen principalmente mediante su aplicación directa al terreno (Martínez et al., 2002). Estas aplicaciones conducen a la eventual acumulación de P en los suelos (Martínez et al., 1999) y a una potencial pérdida a través de la escorrentía superficial (McDowell et al., 2001).

El incremento en las concentraciones de P en los cuerpos de agua superficial estimula la productividad primaria, acelera su proceso de eutroficación, reduce la concentración de oxígeno disuelto y aumenta la conversión de compuestos disueltos a formas potencialmente tóxicas que deterioran sus características físicas, químicas y biológicas. La fracción disuelta de P (DP) es la porción de P inmediatamente disponible para la biota acuática y

una fuente secundaria es la fracción particulada (PP) (Sharpley, 1993). La concentración de DP en el flujo se origina por la liberación de P de una delgada zona de la superficie del suelo y del material vegetativo (hojarasca) presente en la misma (Sharpley, 1985). Las pérdidas totales de P de un terreno dependen de la concentración de P en la escorrentía y del volumen del flujo superficial (Sotomayor et al., 2003).

La cantidad máxima de P que puede asimilar un cuerpo de agua sin presentar procesos de eutroficación, depende entre otros factores del contenido de P en el suelo (Daniels et al., 2000). La prueba de P en el suelo es usada para guiar la recomendación de fertilización a cultivos agrícolas, buscando mejorar sus niveles de producción (Sharpley et al., 1994). La Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha establecido para Estados Unidos un valor de  $1 \text{ mg L}^{-1}$  para definir la descarga límite de DP de las fuentes puntuales sobre cuerpos de agua superficial (US EPA, 1986). Este valor ha sido sugerido como el límite en la concentración de DP para la escorrentía agrícola. El nivel de la prueba de P en el suelo que correlacione una concentración de  $1 \text{ mg L}^{-1}$  de DP en la escorrentía, ha sido sugerido por Sharpley et al. (1996) como el valor crítico ambiental de la prueba de P en el suelo. Algunos investigadores han sugerido valores críticos ambientales de P superiores al valor crítico de P agronómico para las plantas (desde dos hasta diez veces el valor agronómico) (Wood et al., 1998, McDowell y Sharpley, 2001). Para Puerto Rico el valor crítico ambiental sugerido por Sotomayor et al. (1994) para las pruebas Olsen y Bray I exceden en 3.8 y 6.2 veces respectivamente, los niveles críticos agronómicos sugeridos.

Las pérdidas de P en la escorrentía agrícola aparentemente son mayores en áreas donde la aplicación de P proveniente de estiércol generado en operaciones de manejo de animales confinados, es mayor a los requerimientos nutricionales de un cultivo. Algunos sistemas de producción agropecuaria reciben aplicaciones continuas de estiércol, debido a que es una alternativa económicamente viable para la disposición de estos residuos (Sharpley et al., 1996). En Puerto Rico, un estudio desarrollado por Martínez et al. (1999) para determinar el impacto en la aplicación de gallinaza en el estado nutricional de los suelos, demostró que el 67% de las muestras analizadas tenían niveles de P mayores de lo considerado óptimo para propósitos agrícolas y un 56% de las mismas, sobrepasaron los límites considerados críticos para la calidad del agua, acorde con los lineamientos propuestos en algunas áreas de los Estados Unidos.

Una forma de determinar la pérdida potencial de P del suelo es a través de la relación entre la prueba de P en el suelo y la concentración de P en la escorrentía. Como parte del “National Phosphorus Research Project” (NPRP) en Puerto Rico, esta relación se determinó mediante simulaciones de lluvia para dos suelos con predominio de series representativas del orden Ultisol, bajo previa aplicación de enmiendas orgánicas (gallinaza) e inorgánicas (superfosfato triple) en diferentes dosis.

El presente estudio pretende generar resultados que proveerán nueva e importante información para investigadores y conservacionistas que trabajan en la formulación de planes de manejo de prácticas agropecuarias, encaminadas a

mantener altos niveles de producción, minimizando a su vez las pérdidas de nutrientes y el impacto al medio ambiente, mediante el logro de los siguientes objetivos:

1. Cuantificar el aporte de las concentraciones de P y de sedimentos en la escorrentía de suelos agrícolas con diferentes niveles de P provenientes de enmiendas orgánicas e inorgánicas.
2. Validar bajo condiciones de campo el valor crítico ambiental de la prueba de P en un complejo Ultisol-Oxisol y en un Ultisol de Puerto Rico.

Para facilitar la presentación de los resultados generados en el presente estudio, se ha dividido el mismo en dos capítulos específicos. En el primero se presentan los resultados obtenidos para el complejo Ultisol-Oxisol conformado por tres (3) series de suelos, establecido en predios de la Finca Alzamora de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez. El segundo capítulo presenta la información obtenida de la evaluación de un Ultisol, ubicado en predios en los que se realiza pastoreo de ganado en la Estación Experimental Agrícola de Corozal, perteneciente también a la Universidad de Puerto Rico.

## **1. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **1.1. GENERALIDADES**

El fósforo (P) es un elemento esencial para las plantas, necesario para mantener niveles favorables de producción agrícola y animal. Las funciones más importantes de este nutrimento en las plantas son el almacenamiento y transferencia de energía y el favorecer la división celular (Troeh y Thompson, 1993). También, el P es el mineral con el mayor número de funciones biológicas conocidas en animales (Zaimes y Schultz, 2002). Este nutrimento se considera relativamente estable en los suelos, por no presentar formas que se volatilicen, ni que sean altamente lixiviabiles. Esta gran estabilidad se debe a una baja solubilidad de los minerales y a las reacciones de adsorción a los coloides minerales, condición que puede causar deficiencias para las plantas, a pesar de la continua mineralización de compuestos orgánicos del suelo. Los contenidos de P en suelos de áreas tropicales son muy variables, debido a la heterogeneidad de las rocas parentales, al desarrollo de los suelos y a otras condiciones edafológicas y ecológicas (Fassbender y Bornemisza, 1994). La concentración de P en suelos tropicales está ligada al contenido de materia orgánica y a su evolución pedológica. Los suelos desarrollados de ceniza volcánica presentan un mayor contenido de P que los desarrollados de sedimentos meteorizados y redepositados en las áreas tropicales bajas. Los Oxisoles y Ultisoles alcanzan valores muy bajos de P disponible, debido a que presentan una alta capacidad de fijación de P.

## 1.2. CICLO DEL P EN EL SUELO

Las interacciones del ciclo de P en la naturaleza no solo se limitan al suelo con las plantas, también participan la hidrosfera y la litosfera (Fassbender y Bornemisza, 1994). El ciclo del P no presenta proceso de remoción por parte de la atmósfera como ocurre en el ciclo del N. La remoción de P en el suelo puede ocurrir asociado a la erosión de sedimentos enriquecidos, lixiviación a través del perfil del suelo, escorrentía, o por la extracción de cultivos. Las entradas principales provienen de aportes de fertilizantes, residuos agrícolas y de plantas, por deposición atmosférica, aplicación de residuos municipales o industriales. Algunos procesos de transformación dentro del ciclo del P en el suelo, ocurren por disolución de minerales, desorción de arcillas y superficies de minerales y por efecto de la mineralización.

La escorrentía mueve el P desde terrenos agrícolas hasta cuerpos de agua superficial y en esta forma está inmediatamente disponible para la absorción por parte de la biota acuática. Las formas biodisponibles incluyen DP y una porción de P particulado (PP), las cuales contribuyen a la eutroficación de los cuerpos de agua receptores. Otro mecanismo considerado menos importante que la escorrentía, es la lixiviación de P seguida de un flujo subsuperficial lateral que contribuye a los cuerpos de agua superficial a través del interflujo del nivel freático (Sharpley et al., 1994). El P asociado al sedimento es una fuente potencial de este nutrimento, cuando el transporte se debe a procesos erosivos.

### **1.2.1. Efecto de la materia orgánica sobre la disponibilidad de P en el suelo**

La disponibilidad de P en los suelos está ligada a su movilidad. Los compuestos orgánicos de P son más móviles que el fósforo inorgánico. La aplicación de enmiendas orgánicas incrementa la disponibilidad de P, debido al reemplazo aniónico de fosfato monovalente en los sitios de adsorción. También debido a la cobertura de partículas de Fe y Al por humus, reduciendo la adsorción de P. Los aniones orgánicos que resultan también pueden formar complejos estables con el Fe y el Al, impidiendo su reacción con el fosfato monovalente. Estos complejos además pueden liberar el P previamente fijado por el Fe y el Al.

En algunos casos, cuando se adiciona materia orgánica al suelo no hay liberación de P debido a la actividad microbiana del suelo que inmoviliza el P y a la formación de complejos metalo-orgánicos retenedores de P.

### **1.3. MANEJO PARA MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS DE P EN LA AGRICULTURA**

En áreas de producción agrícola intensiva, los aportes continuos de P por fertilizaciones y aplicaciones de enmiendas orgánicas al suelo, aunque esenciales, frecuentemente exceden las salidas en la productividad agrícola y pecuaria (Gburek y Sharpley, 1998). Esta condición puede resultar en un incremento en el contenido de P en el suelo y en las pérdidas de este nutrimento a través de la escorrentía, acelerando el proceso de eutroficación de los cuerpos de agua superficial receptores (Sharpley et al. 1993, Sharpley et al. 1994, Pote et al. 1999a, Gaston et al. 2003). La descomposición de la productividad primaria

de un cuerpo de agua disminuye la concentración de oxígeno disuelto y a su vez, promueve la conversión de compuestos disueltos a formas potencialmente tóxicas que deterioran las características físicas, químicas y biológicas del cuerpo de agua, limitando con ello potenciales usos de potabilización y consumo y su manejo ambiental, recreacional e industrial (Wood et al., 1998).

La cantidad o concentración de P en el suelo, la persistencia, la ubicación en el perfil del suelo y el grado de interacción del suelo (adsorción) son los factores más importantes que determinan la concentración de P en la escorrentía o adherida a los sedimentos en suspensión (Baker y Laflen, 1983). La concentración de P disuelto en la lámina de flujo superficial, cambia con la intensidad y la duración de cada evento de precipitación. Sharpley (1985) determinó que la interacción entre el suelo y la escorrentía, varía con la intensidad de la lluvia y la pendiente del terreno. Este efecto es atribuido al incremento en la energía del impacto de la gota de lluvia y su efecto de desagregación y dispersión de las partículas del suelo, y por un incremento en la energía del flujo superficial, el cual aumenta el efecto de mezcla en la superficie del terreno.

Las pérdidas de P desde áreas agrícolas hacia los cuerpos de agua, son controladas inicialmente por la interacción entre los factores de fuente (factores de origen) y los factores de transporte de P. El suelo, el cultivo, el manejo del terreno, las aplicaciones de enmiendas, son categorizados dentro del primer conjunto de factores. La escorrentía, la infiltración y la erosión forman parte del segundo de los grupos (Gburek et al. 2000). En determinados casos, el flujo

subsuperficial a través de texturas gruesas o suelos superficiales con estratos poco profundos, pueden ser también una ruta importante para el movimiento de P disuelto (Gburek y Sharpley, 1998). Los mecanismos que relacionan las fuentes y el transporte de P, incluyen parámetros como la solubilidad del P y/o el desprendimiento de partículas P presentes en la solución del suelo (McDowell et al., 2001). Para identificar las opciones de manejo y mitigación del impacto ambiental ocasionado a los cuerpos de agua receptores, es necesario entender la importancia relativa de los factores antes mencionados (Whiters, 2000).

Las prácticas realizadas para reducir la pérdida de P en la escorrentía, están ligadas a aquellas que buscan controlar el flujo superficial y la erosión, tales como el desarrollo de labranza conservacionista, establecimiento de franjas de cultivos amortiguadores o retenedores de sedimentos y nutrientes, siembras en contorno, terraceo y uso de cobertura permanente sobre la superficie del suelo (Sharpley, 1995; Sharpley et al., 2003). El control de las fuentes de P incluye la minimización de la acumulación de P en la superficie del suelo, siguiendo las recomendaciones de aplicación basadas en los resultados de la prueba de P en el suelo. Estas medidas de control pueden reducir la pérdida de P significativamente, especialmente si se implementan en áreas críticas tales como cuencas vulnerables a la pérdida de P con la escorrentía o asociada a la erosión (Sharpley, 2001). Sitios altamente vulnerables a la pérdida de P pueden ser identificados para decidir estrategias de control y manejo que sean efectivas y económicamente viables (Sharpley et al., 2003).

#### **1.4. RELACIÓN ENTRE LA PRUEBA DE SUELO Y LA CONCENTRACIÓN DE P EN LA ESCORRENTÍA**

El contenido de P en el suelo evaluado a través de una prueba de P del suelo, se relaciona cuantitativamente a la concentración de DP en la escorrentía, sin embargo, no indica la masa total de P ni el volumen de escorrentía que se puede generar para un conjunto de condiciones específicas. La cantidad total de P que se pierde de un terreno, depende de la concentración de P en la escorrentía y del volumen de agua que fluye (Sotomayor et al., 2003). Sharpley et al., (1996) describen que la prueba de suelo incide entre un 58 a un 98% en la variación de DP en el flujo. El incremento en la prueba de suelo representa un enriquecimiento en la concentración de P en la escorrentía, sin embargo, la relación entre la prueba de suelo y P en solución varía de acuerdo a las condiciones de manejo y tipo de suelo. El aporte del suelo al enriquecimiento de P en el flujo es menor bajo pasturas que para terrenos con otros cultivos establecidos. Esta diferencia puede resultar por la menor interacción de la escorrentía con la superficie del suelo, debido a la mayor cobertura y protección de la superficie que ofrecen los predios bajo pasturas (Sharpley, 1985). Sin embargo, aplicaciones recientes de fertilizante inorgánico o estiércol tienen una tendencia opuesta, particularmente cuando la aplicación se realiza sobre la superficie sin incorporación alguna. Para un nivel de P en el suelo, la concentración de P en el flujo puede ser influenciada por el tipo de suelo, ya que las diferencias en la capacidad de retención de P en el suelo pueden variar con

los niveles de arcilla, óxidos de Fe y Al, carbonatos y el contenido de materia orgánica (Schroeder et al. 2004).

Investigaciones de campo con el establecimiento de parcelas bajo condiciones de lluvia natural y otras bajo la aplicación de lluvia simulada, así como mediante el empleo de cajas con suelo “soil boxes”, han encontrado relaciones entre la concentración de P en la escorrentía y la tasa y método de aplicación de este nutrimento al suelo. Se han demostrado altas correlaciones entre la prueba de suelo y la concentración de DP y TP en la escorrentía, incluso entre metodologías de extracción diferentes (Bray I, Olsen, Mehlich 3) (Pote et al., 1996; Aase et al., 2001; Mullins y Tech, 2001; Sharpley et al., 2001; McDowell and Sharpley, 2001; Fang et al., 2002; Kleinman et al., 2002; Sharpley y Kleinman, 2002; Daverde et al., 2003; Andraski y Bundy, 2003; Gaston et al., 2003). Este conjunto de postulados ha permitido sugerir a investigadores y extensionistas, diferentes opciones para el manejo sostenible del P, precisando en la necesidad de seguir las recomendaciones de aplicación basadas en los resultados de análisis de suelos, el establecimiento de niveles críticos ambientales de P en el suelo y el uso del Índice de P para limitar las aplicaciones de este nutrimento sobre terrenos categorizados como de gran riesgo o altamente vulnerables para la pérdida de P (Sharpley et al., 2001).

El Proyecto Nacional de Investigación en Fósforo (National Phosphorus Research Project [NPRP]) fue implementado en respuesta a la preocupación creciente que generaban las pérdidas no puntuales de P. El primer objetivo del NPRP es el coordinar la investigación ambiental de P. Como parte de este

proyecto, estudios bajo aplicación de lluvia simulada buscan caracterizar la relación entre la prueba de P del suelo y la concentración de P en la escorrentía para diferentes series de suelo.

Diferentes estudios de lluvia simulada aplicada con intensidades de 70 y 75 mm/hr, presentan una alta correlación entre la concentración de P disuelto en la escorrentía y el nivel de la prueba de P en el suelo (Mehlich 3, Olsen P y Bray I P), para diferentes series de suelos dentro de una cuenca donde el volumen total de la escorrentía varía entre 18 y 45 mm bajo similares condiciones de flujo pico. La escorrentía acumulada es siempre menor cuando se cuantifica en el primer día de simulación, en el cual también es menor el contenido de humedad en la superficie del suelo, mientras que la concentración de TP (entre 0.63 y 2.5 mg/L), DP (entre 0.095 y 0.776 mg/L) y SS (entre 0.68 y 2.96 g/L) es menor cuando aumenta el volumen total de la escorrentía (Sharpley et al., 2001; Sharpley y Kleinman, 2002). En suelos de textura media la fracción que predomina en la escorrentía es de P particulado, mientras que en suelos de textura fina es de DP (Andraski et al., 2003; Sharpley y Kleiman, 2003).

Relaciones lineales entre la prueba de P del suelo y la concentración de DP en la escorrentía son comúnmente reportadas. Sin embargo, algunos estudios reportan correlaciones de tipo exponencial (Sharpley et al., 2001; Guidry et al., 2004). El coeficiente de extracción de P del suelo por la escorrentía, es determinado como la pendiente de la regresión lineal entre la prueba de P del suelo y la concentración de DP en la escorrentía (Sharpley et al., 1996; Vadas et al. (2005)). Este parámetro presenta cierta variación en

algunos estudios debido a las diferencias en las propiedades del suelo tales como el contenido de arcilla (Cox y Hendricks, 2000) (Figura 1.1), la capacidad de adsorción de P (Sharpley, 1995), el contenido de  $\text{CaCO}_3$  (Torbert et al., 2002 y Fang et al., 2002), la variabilidad de la respuesta hidrológica (Pote et al., 1999a; Andraski y Bundy, 2003 y Sharpley y Kleiman, 2003), la humedad antecedente del suelo (Pote et al., 1999b y Sharpley y Kleinman, 2003) y diferencias entre prácticas de manejo, así como entre sistemas de producción establecidos (pasturas o sistemas bajo mecanización) (Sharpley et al., 2002, Tarkalson y Mikkelsen, 2004) (Figura 1.1).

Vadas et al. (2005) realizaron una evaluación de 17 estudios independientes que reportaron coeficientes de extracción de P del suelo por la escorrentía, determinados para pruebas de suelo Mehlich 3 y Bray I (Figura 1.1). Estos estudios presentaron una amplia variación de tipos de suelo, condiciones de manejo y respuesta hidrológica y revelaron que en 26 de los 31 suelos no se evidenció diferencia significativa en el valor del coeficiente de extracción determinado. Para 10 estudios y 20 suelos en los que se determinó el coeficiente de extracción usando la prueba de P ambiental, cuyo extractor de P del suelo es agua, no se observó diferencia significativa en 17 suelos. El valor del coeficiente para las pruebas de suelo Mehlich 3 y Bray I es tan o más efectivo para evaluar la susceptibilidad de un suelo a perder P en la escorrentía, reflejado en la concentración de DP en la lámina, como la prueba ambiental. La prueba Mehlich 3 fue más efectiva que la prueba de suelo Bray I en suelos

calcáreos (Fang et al, 2002), mientras que en suelos no calcáreos, las dos pruebas extraen cantidades muy similares de P (Kleinman et al., 2001).

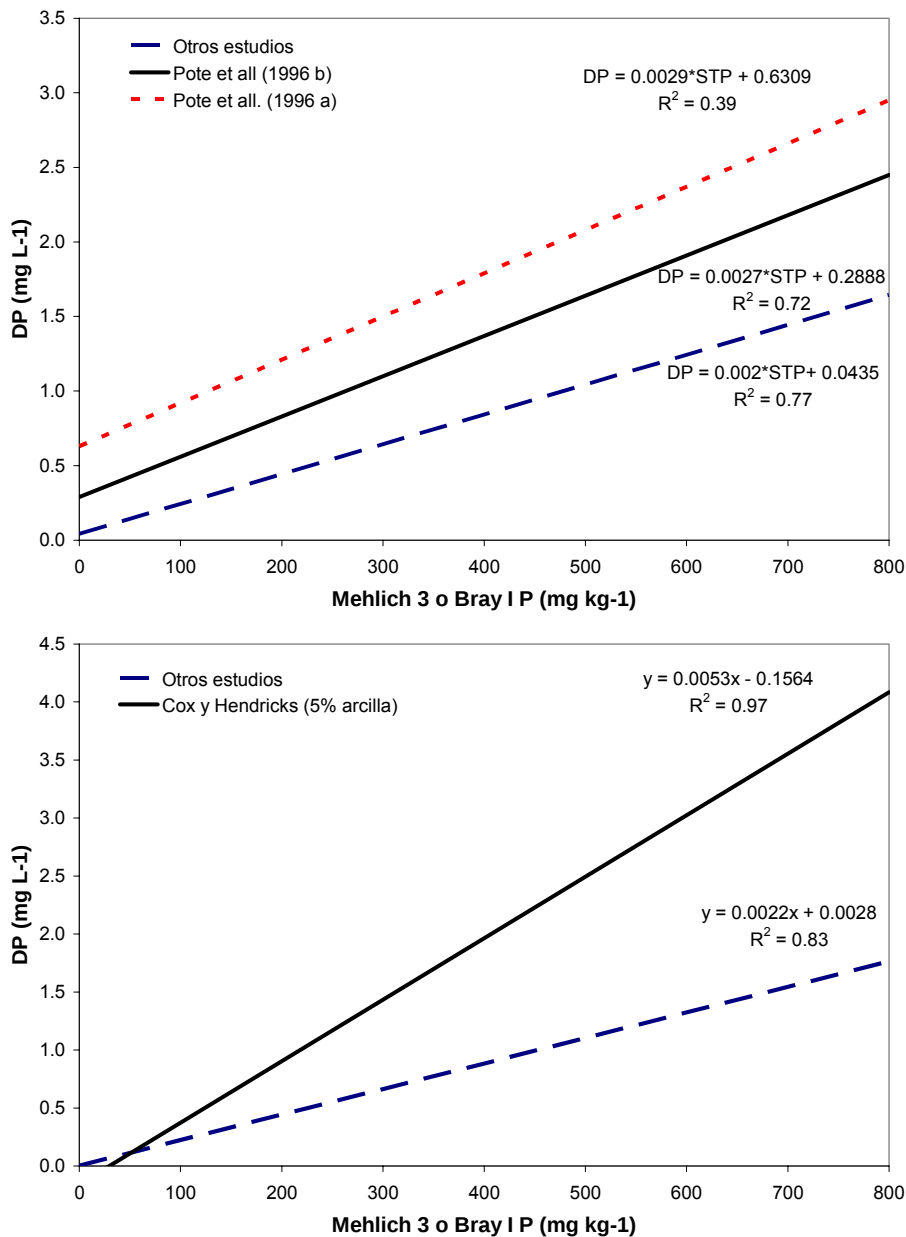


Figura 1.1. Relación entre la prueba de P del suelo y la concentración de DP en la escorrentía para estudios en cajas de suelo y parcelas en pasturas (A) y estudios en parcelas con o sin mecanización (B), donde el coeficiente de extracción no presentó diferencia significativa (Adaptado de Vadas et al., 2005).

#### **1.4.1. Susceptibilidad del suelo a la pérdida de P**

Sotomayor et al. (2004) desarrollaron una categorización ambiental de la prueba de P para suelos de Puerto Rico. Cinco categorías ambientales han sido obtenidas tanto para la prueba de suelo Olsen P como Bray I P y Mehlich 3 (Tabla 1.1). La categoría de alta susceptibilidad del suelo a la pérdida de P, describe el rango de la prueba de P del suelo en el cual la aplicación en exceso de una enmienda puede no presentar respuesta agronómica. El valor mínimo de esta categoría corresponde al nivel crítico agronómico sugeridos por Muñiz (1992) y el valor máximo, al nivel de P en el suelo que aporta a la esorrentía una concentración de DP de  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$ . Un suelo categorizado como de muy alta susceptibilidad a la pérdida de P, se halla en un rango de valores de la prueba de P del suelo en el cual, de ser requerida la adición de P, esta debe realizarse con precaución. El valor mínimo y el máximo de esta categoría corresponden a niveles de P en el suelo que aportan a la esorrentía concentraciones de  $0.5$  y  $1 \text{ mg L}^{-1}$ , respectivamente. Suelos con una susceptibilidad a la pérdida de P extremadamente alta, presentan valores de la prueba de P en los cuales no debe aplicarse enmienda orgánica o inorgánica de P y la concentración de DP en la esorrentía supera el valor de  $1 \text{ mg L}^{-1}$ .

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha establecido para Estados Unidos un valor de  $1 \text{ mg L}^{-1}$  para definir la descarga límite de P de las fuentes puntuales sobre cuerpos de agua superficial (US EPA, 1986). Este valor ha sido sugerido como el límite en la concentración de P para la esorrentía agrícola. Sharpley et al. (1996) sugiere como una aproximación para determinar el valor

crítico ambiental de P en el suelo, el nivel de la prueba de P que se correlaciona con una concentración de  $1 \text{ mg L}^{-1}$  de P en la escorrentía. Fundamentada en esta propuesta, la categorización ambiental de la prueba de P propuesta para Puerto Rico por Sotomayor et al. (2004), define un valor de  $179 \text{ mg kg}^{-1}$  ( $\pm 6 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y  $197 \text{ mg kg}^{-1}$  ( $\pm 7 \text{ mg kg}^{-1}$ ) como las concentraciones críticas en la prueba de suelo Olsen y Bray I, respectivamente.

Tabla 1.1. Índice categórico ambiental de la prueba de P del suelo para Puerto Rico.

| <b>Susceptibilidad a<br/>la pérdida de P</b> | <b>Olsen P<br/>(<math>\text{mg kg}^{-1}</math>)</b> | <b>Bray 1 P<br/>(<math>\text{mg kg}^{-1}</math>)</b> |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Baja                                         | < 12                                                | < 10                                                 |
| Media                                        | 12 – 35                                             | 10 – 20                                              |
| Alta                                         | 36 – 123                                            | 21 – 131                                             |
| Muy Alta                                     | 124 – 179                                           | 131 – 197                                            |
| Extrem. Alta                                 | > 179                                               | > 197                                                |

### **1.5. RELACIÓN ENTRE EL NIVEL Y TIEMPO DE APLICACIÓN DE ENMIENDAS CON LAS PÉRDIDAS DE P**

La concentración de P en el flujo depende menos de la concentración de P en el suelo y más en el nivel, el método de aplicación y la intensidad de la lluvia, si el evento de precipitación ocurre muy prontamente tras la aplicación de una enmienda (Tabbara, 2003). Sotomayor et al. (2003) encontraron las mayores concentraciones de P en la escorrentía, para eventos de precipitación ocurridos dentro de los 10 días posteriores a la aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas. Preedy et al. (2001) reporta el riesgo que generan las

altas pérdidas de P en el flujo superficial y a través del perfil del suelo, cuando el estiércol o el fertilizante inorgánico es aplicado sobre pasturas y es sucedido por eventos de lluvia intermitentes. Kleinman y Sharpley (2003) encontraron una relación positiva entre el nivel de aplicación de una enmienda orgánica y la concentración de DP y TP en la escorrentía, con la contribución de DP incrementando con la tasa de aplicación del estiércol. Esta condición es atribuida a la alta concentración de P soluble en el estiércol (DeLaune et al. 2004). También confirman estos autores sobre el efecto del tiempo y la secuencia de eventos de precipitación, relativos al tiempo de aplicación de la enmienda. La diferencia en el método de aplicación ha permitido encontrar que la concentración de DP en la escorrentía llega a ser hasta 100 veces mayor, cuando el flujo superficial proviene de áreas con aplicación directa de P sobre la superficie del suelo, en comparación con las áreas en donde la aplicación se hace en el subsuelo a una profundidad de hasta 5 cm. Tarkalson y Mikkelsen (2004) no encontraron diferencia significativa en las pérdidas de DP, entre predios no enmendados y predios con la incorporación al suelo de las enmiendas orgánicas e inorgánicas. No fue similar el resultado cuando la evaluación se hizo para predios con enmienda aplicada sobre la superficie del terreno.

## **1.6. ÍNDICE DE P**

El Índice de P (Phosphorus Index) ha sido desarrollado como una herramienta que permite caracterizar terrenos agrícolas, en cuanto a su vulnerabilidad a las pérdidas de P y permite desarrollar opciones de manejo de

enmiendas orgánicas e inorgánicas (Lemunyon y Gilbert, 1991; Sharpley et al., 2001). Los efectos de la prueba de P en el suelo, las características de manejo del terreno y las pérdidas de P a través del flujo superficial para una grupo representativo de suelos agrícolas en los Estados Unidos, han sido y están siendo estudiados como parte del NPRP, el cual tiene como objetivo caracterizar las pruebas de P en el suelo y relacionarlas con las concentraciones de P en la escorrentía generada en estos suelos como efecto por la ocurrencia de un evento estandarizado de precipitación. También se pretende evaluar esta relación tomando en cuenta otros factores como la aplicación de fertilizantes inorgánicos y desechos orgánicos animales (Martínez et al. 2002). Suelos que en el pasado fueron sujetos a la adición de enmiendas orgánicas procedentes de desechos animales (gallinaza, estiércol de ganado, etc.), también forman parte del conjunto estudiado.

## **2. PÉRDIDAS DE P Y SEDIMENTOS EN LA ESCORRENTÍA EN UN COMPLEJO ULTISOL-OXISOL**

### **2.1. MATERIALES Y MÉTODOS**

El experimento fue realizado dentro de un predio con vegetación de gramíneas nativizadas presente entre árboles de mango (*mangifera indica*) en la Finca Laboratorio Alzamora en Mayagüez, perteneciente al Recinto Universitario de Mayagüez de la Universidad de Puerto Rico. Esta área no había recibido aplicación alguna de enmienda orgánica o inorgánica en un período superior a tres años. El suelo forma parte de un complejo Ultisol-Oxisol conformado por las series Humatas (Very-fine, parasequic, isohyperthermic Typic Haplohumults) y Consumo (Fine, mixed, semiactive, isohyperthermic Typic Haplohumults) y en menor proporción por la serie Daguey (Very-fine, kaolinitic isohyperthermic Inceptic Hapludox) (Beinroth et al., 2003). La caracterización taxonómica del suelo en el predio fue confirmada con la ayuda de miembros del Servicio Nacional de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) de Mayagüez.

Inicialmente se realizó un muestreo en grillas (2.74 m × 2.74m) para determinar el estatus de fósforo (P) en el suelo mediante las pruebas Olsen y Bray I. En abril de 2003 se enmendaron algunas parcelas con superfosfato triple (SFT), para aumentar el nivel de P en el suelo en algunas parcelas con valores inferiores a 100 ppm. Cuatro meses después se determinó el valor de la prueba de suelo para las parcelas enmendadas y una segunda enmienda fue realizada para algunas de ellas, buscando niveles de P superiores a 150 ppm. Una tercera y última enmienda fue realizada en junio de 2004 para tres parcelas, buscando

niveles de P superiores a 250 ppm (Anexo A). Las parcelas enmendadas permanecieron al menos 5 meses bajo condiciones naturales de crecimiento, recibiendo un corte periódico cada 2 o 3 meses por parte del personal de mantenimiento de la Finca Alzamora.

### **2.1.1. Establecimiento de parcelas y desarrollo de pruebas de simulación**

El establecimiento de las parcelas y las aplicaciones de la lluvia simulada fueron realizadas conforme al protocolo propuesto por el “National Phosphorus Research Project (NPRP) for Simulated Rainfall - Surface Runoff Studies” (USDA – NRCS, 2001). Se establecieron parcelas pareadas cada una con diferente nivel de P en el suelo. Cada subparcela representó una unidad experimental. Las dos subparcelas juntas son descritas en el texto como una parcela. El área de las subparcelas era de 1 m de ancho por 2 m de largo con el eje longitudinal orientado en el sentido de la pendiente y la canaleta de colección del flujo en la parte inferior de la misma. El borde de las parcelas se elaboró con láminas de acero de 0.32 cm de espesor y 15 cm de altura, de las cuales entre 3 y 5 cm de cada lámina de acero fueron enterrados en el suelo. Los predios presentaron cobertura de gramíneas nativizadas (Bahía, Bermuda, Pangola) cuya altura fue homogeneizada a un máximo de 5 cm previo a la simulación de lluvia.

Se realizaron aplicaciones de lluvia simulada con una intensidad de 70 mm hr<sup>-1</sup>. Este valor fue sugerido por el protocolo NPRP (USDA – NRCS, 2001) y corresponde a la intensidad máxima en 1 hora para un período de retorno de 10 años en el área de estudio. Esta intensidad fue determinada a partir de las

curvas de Intensidad - Frecuencia - Duración generadas por la Junta de Planificación de Puerto Rico (1975). Se empleó un simulador TLALOC 3000 (Joern's Inc., West Lafayette, IN) y una boquilla FullJet ½HHSS50WSQ (Spraying Systems Co., Wheaton, IL) ubicada en el centro de la parcela a 3.05 m de altura sobre la superficie del suelo para permitir velocidad terminal en las gotas. Se realizaron calibraciones previas para determinar la presión de flujo que generaba dicha lámina de lluvia y la uniformidad de aplicación de la misma por parte de la boquilla siguiendo el procedimiento sugerido en el protocolo del NPRP. Las pruebas de simulación se iniciaron en septiembre de 2003 y culminaron en octubre de 2004.

Un total de cincuenta simulaciones de lluvia fueron realizadas en este estudio (25 parcelas pareadas × 2 eventos de lluvia simulada). El esquema de trabajo consistió de dos simulaciones de lluvia a intervalos de veinticuatro horas en cada parcela. El intervalo de tiempo influyó en las condiciones de humedad volumétrica antecedente del suelo ( $\Theta$ ). La primera simulación presentó valores de  $\Theta$  inferiores a la capacidad de campo ( $\approx 40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) y en la segunda simulación, valores entre la capacidad de campo y el punto de saturación. Antes de cada prueba de simulación se determinó el grado de cobertura de la superficie del suelo y  $\Theta$  en tres puntos de cada subparcela (parte alta, media y baja), usando el medidor de humedad Theta probe (Dynamax Inc., TX). Mediante calibración previa se correlacionó la medida del instrumento y el valor para el contenido de humedad gravimétrica antecedente del suelo ( $\Theta_g$ ) en la misma muestra, para muestras de suelo con diferentes condiciones de humedad. En

cada subparcela se obtuvo una muestra superficial de suelo compuesta (0 - 5 cm) dentro y en el borde de cada subparcela, evitando al máximo disturbar la superficie. En el laboratorio se cuantificó el contenido de P en el suelo mediante los métodos de Olsen (Sims, 2000a) y Bray I (Sims, 2000b), el valor del pH (1:1), la conductividad eléctrica, la textura mediante el método de Bouyucuos (Montenegro y Malagón, 1990) y la concentración de materia orgánica (MO) mediante el método de Nelson y Sommers (1982).

Una vez iniciada la lluvia, el tiempo de inicio del flujo superficial fue registrado. Se cuantificó la escorrentía desde su inicio a intervalos de un minuto, durante un tiempo de 30 minutos para obtener el hidrograma de escorrentía. Una muestra de 500 ml del volumen de escorrentía acumulado se tomó cada 10 minutos para determinar la variabilidad en la concentración de sedimentos suspendidos (SS), P total (TP) y P disuelto (DP). Se tomó muestra de la fuente de agua en cada prueba de simulación, para determinar la concentración de P total (TP), P disuelto (DP) y sedimentos suspendidos (SS), encontrando valores promedio de 0.14 y 0.12 mg L<sup>-1</sup> y de 0.002 g L<sup>-1</sup> respectivamente. Para eliminar esta variabilidad en el análisis de la información, las concentraciones de DP, TP y SS de la fuente fueron sustraídas del valor de las concentraciones en la escorrentía. El pH de estas muestras tuvo un valor promedio de 7.02.

La concentración de DP se determinó por medición directa (Murphy y Riley, 1962) para una submuestra filtrada usando papel filtro con un diámetro de poro de 0.45 µm (Whatman, UK), la masa de solutos retenidos en el filtro permitió estimar la concentración de SS. La concentración de TP se determinó

para una muestra no filtrada mediante el procedimiento de digestión con persulfato (Pote y Daniel, 2000).

Los análisis de laboratorio fueron realizados en el Laboratorio de Química de Suelos del Recinto Universitario de Mayagüez y el Laboratorio de Química de Suelos y Aguas de la Estación Experimental Agrícola de Río Piedras, ambos pertenecientes a la Universidad de Puerto Rico.

### **2.1.2. Métodos estadísticos**

Se establecieron veinticinco parcelas pareadas cada una con diferente nivel de P en el suelo. Cada subparcela representó una unidad experimental. Los resultados de cada subparcela para Olsen P, Bray I P, pendiente, cobertura,  $\Theta$ , MO y textura fueron analizados con su respectiva pareja mediante una prueba t student pareada ( $\alpha = 0.05$ ), para determinar la homogeneidad en cada parcela. Similar procedimiento se realizó para la escorrentía acumulada, TP, DP y SS, para determinar si existió incidencia en la uniformidad del simulador sobre la variabilidad de las subparcelas.

Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza fueron evaluados para cada grupo de observaciones, antes de evaluar efectos y correlaciones.

#### **2.1.2.1. Efectos de variables pedológicas**

Se agruparon las parcelas por su nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P sugerido por Sotomayor et al (1994), para evaluar el cambio en la MO, el pH y la textura en cada nivel evaluado. El efecto de la MO y el pH sobre

la concentración de DP y TP y el efecto del contenido de P en el suelo sobre la acidez del suelo fueron determinados.

#### **2.1.2.2. Efectos de variables hidrológicas y día de simulación**

Se evaluó el efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P y el efecto de día de simulación, sobre la concentración y descarga promedio diaria de DP, TP, PP\* (fracción acumulada de P particulado (PP) más la fracción de P orgánico disuelto (DOP)) y SS, el tiempo de respuesta del flujo, el contenido de humedad volumétrica antecedente del suelo ( $\Theta$ ), la lámina de escorrentía (E), el flujo promedio (Q), la precipitación total (P) y la razón entre la escorrentía y la precipitación (E/P).

#### **2.1.2.3. Efectos de la prueba de suelo en la concentración de P en la escorrentía**

Para los métodos de extracción Olsen y Bray I, los valores de la prueba de P del suelo fueron correlacionados con la concentración de TP y DP en la escorrentía. El mejor ajuste de regresión fue determinado para cada intervalo de tiempo de escorrentía (10, 20 y 30 minutos) y para cada día de simulación, obteniendo una regresión curvilínea. Se determinaron diferencias estadísticas ( $\alpha = 0.05$ ) entre los parámetros de las regresiones (incremento e intercepto) de cada intervalo de tiempo en cada día y entre días. Se determinó el efecto de la MO y su interacción con la prueba de suelo, sobre la concentración de DP y TP en la escorrentía.

Las diferencias estadísticas o análisis de varianza (ANAVA) fueron determinadas empleando el método de comparación de Tukey para un nivel de

significancia ( $\alpha$ ) de 0.05. Se empleó para este procedimiento el software INFOSTAT 2.0 (Universidad de Córdoba, Argentina). La correlación entre variables fue estimada usando los modelos Curve Expert 1.3. (Microsoft Corporation, USA) y SigmaPlot 6.1. (SPSS,USA). El coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la prueba estadística de significancia ( $\alpha = 0.01$ ) fueron determinados para cada variable dentro de cada regresión.

Los anteriores procedimientos estadísticos se desarrollan partiendo de las siguientes hipótesis:

- La concentración de P en la escorrentía aumenta con el incremento en la concentración de P en el suelo.
- El incremento en la humedad antecedente del suelo y en la duración de un evento de escorrentía son factores que reducen la concentración de P en la escorrentía desde un suelo con un nivel específico de P.
- El contenido de materia orgánica del suelo incide en la concentración de P en la escorrentía desde un suelo con un nivel específico de P.

## 2.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.2.1. Generalidades

La fuente de agua para cada simulación fue una línea con flujo y presión aproximados de  $24 \text{ L min}^{-1}$  y  $1.02 \text{ kg cm}^{-2}$  ( $15 \text{ lbf pg}^{-2}$ ), respectivamente. De acuerdo con la regresión cuadrática ( $R^2=0.99$ ) generada en la calibración del equipo de simulación, una intensidad promedio de  $70 \text{ mm hr}^{-1}$  se obtuvo bajo una presión de  $0.24 \text{ kg cm}^{-2}$  ( $3.55 \text{ lbf pg}^{-2}$ ) (Figura 2.1). La distribución del agua sobre las parcelas por parte de la boquilla presentó una uniformidad promedio del 83% (Anexo B).

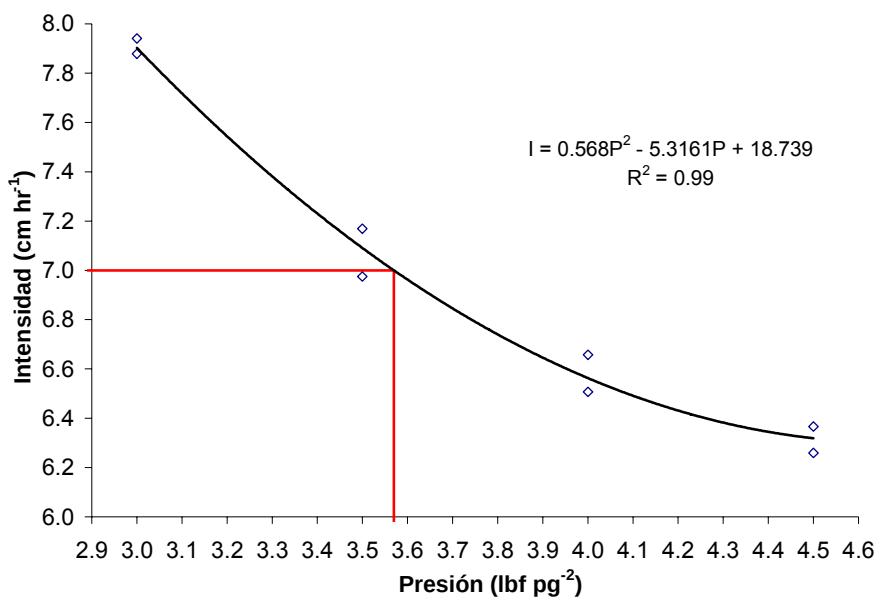


Figura 2.1. Curva de calibración presión - intensidad para el simulador de lluvia a una altura de boquilla de 3m.

### 2.2.2. Caracterización del suelo

Las muestras de suelo presentaron textura arcillosa. Al comparar las muestras agrupadas por su nivel de susceptibilidad a la pérdida de P, no existió diferencia en el valor determinado de las fracciones texturales (Tabla 2.1). El

contenido de materia orgánica (MO) de las muestras en general fue alto, fluctuó entre 2.3 y 6.5% presentando un valor promedio de 4.5% (CV = 20%). Estadísticamente se observó un efecto aditivo levemente significativo del contenido de MO y el nivel de la prueba de P del suelo.

Tabla 2.1. Caracterización de las muestras de suelo agrupadas por su nivel de susceptibilidad a la pérdida de fósforo.

| Nivel de<br>susceptibilidad<br>a la pérdida de<br>P* | Olsen                |    |    |           |        |           | Bray I    |        |           |
|------------------------------------------------------|----------------------|----|----|-----------|--------|-----------|-----------|--------|-----------|
|                                                      | Textura <sup>1</sup> |    |    | MO<br>(%) | pH     | CO<br>(%) | MO<br>(%) | pH     | CO<br>(%) |
|                                                      | A                    | L  | Ar |           |        |           |           |        |           |
| Bajo                                                 | 20                   | 28 | 52 | 4.32 ab   | 5.54 a | 1.92 ab   | 4.38      | 5.52 a | 1.95      |
| Medio                                                | 23                   | 29 | 48 | 3.84 a    | 5.52 a | 1.71 a    | 4.42      | 6.62 b | 1.97      |
| Alto                                                 | 20                   | 28 | 52 | 4.26 ab   | 6.72 b | 1.90 ab   | 4.39      | 6.93 b | 1.96      |
| Muy Alto                                             | 23                   | 26 | 52 | 5.15 b    | 7.64 c | 2.30 b    | 5.25      | 7.14 c | 2.34      |
| Ext. Alto                                            | 26                   | 27 | 47 | 5.22 b    | 6.44 a | 2.33 b    | 4.97      | 5.52 a | 2.22      |

\* Referenciado con la categorización descrita en la Tabla 1.1. Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre niveles de susceptibilidad a la pérdida de P. <sup>1</sup>La diferencia presentada en el pH del suelo corresponde a la categorización de acidez. (A) arena, (L) Limo, (Ar) Arcilla, (MO) materia orgánica, (CO) carbono orgánico.

La prueba de suelo Olsen presentó valores entre 6.9 y 352 mg kg<sup>-1</sup> y la prueba de suelo Bray I entre 2.8 y 337 mg kg<sup>-1</sup>. El 82% y el 72% de los valores de las pruebas Olsen y Bray I respectivamente, presentaron un alto potencial de pérdida de P a través de la escorrentía de acuerdo con la categorización propuesta por Sotomayor et al. (2004) (Figuras 2.2 y 2.3).

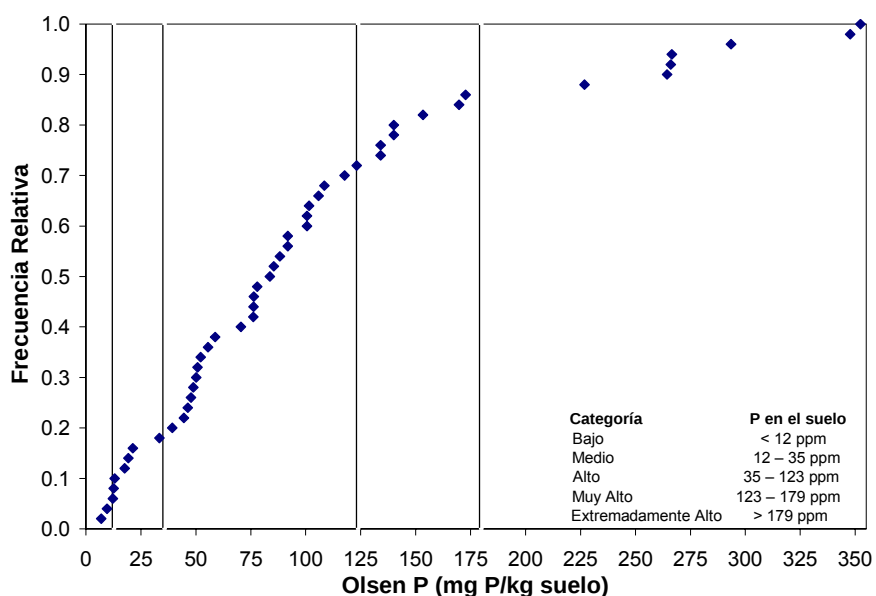


Figura 2.2. Distribución relativa del valor de la prueba de suelo Olsen P, de acuerdo con su susceptibilidad a la pérdida de P en la escorrentía.

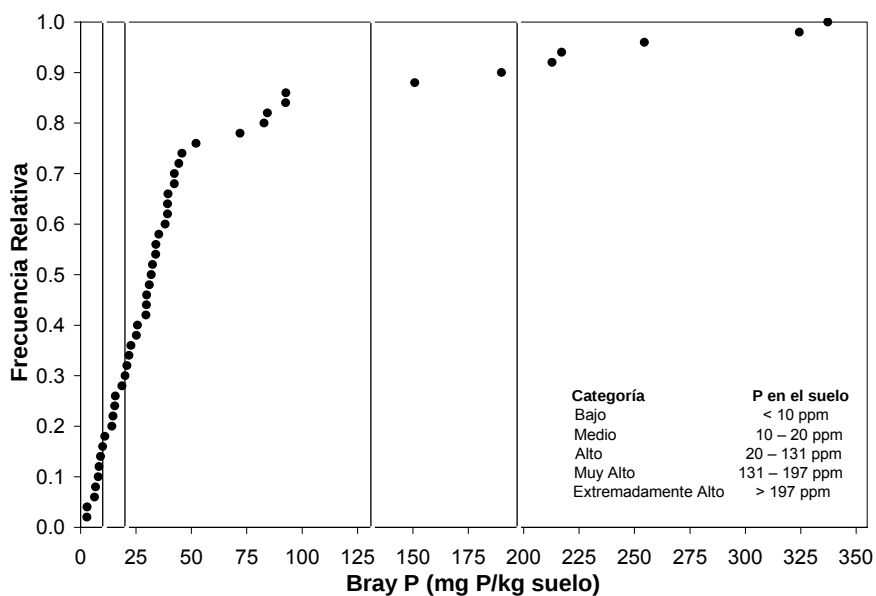


Figura 2.3. Distribución relativa del valor de la prueba de suelo Bray I P, de acuerdo con su susceptibilidad a la pérdida de P en la escorrentía.

Se observaron correlaciones lineales entre la extracción de P del suelo por el método Olsen y la extracción de P del suelo por el método Bray I (Figura

2.4), para los grupos de parcelas sin aplicación de enmienda ( $R^2 = 0.67$ ) y para las parcelas enmendadas ( $R^2 = 0.95$ ).

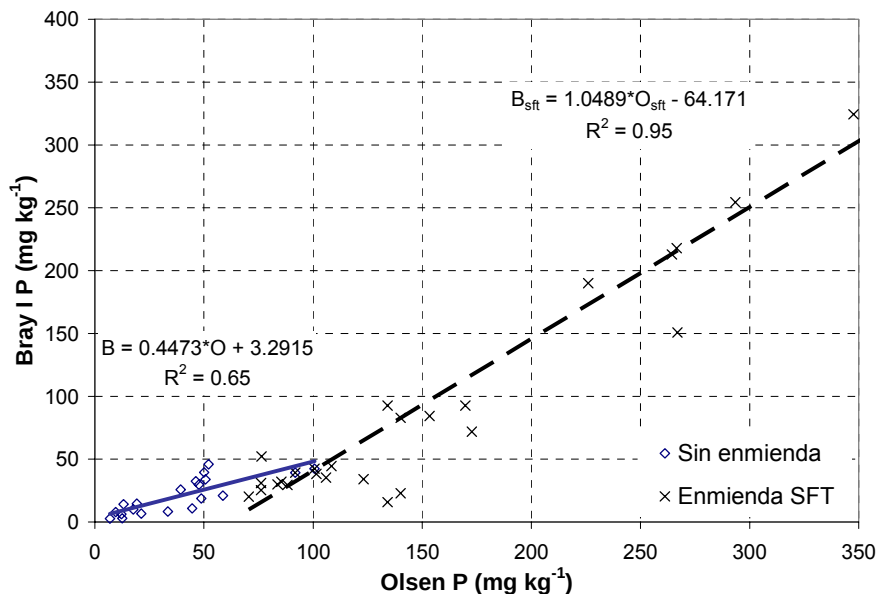


Figura 2.4. Relación entre los métodos de extracción Olsen y Bray I, para determinar la prueba de P en el suelo.

Las muestras con bajo nivel en la prueba de P en el suelo presentaron una acidez moderada, la cual se redujo hasta alcanzar una alcalinidad débil para las muestras con muy alto nivel en la prueba de P en el suelo. El cambio en la reacción del suelo con el aumento en el nivel de P en el suelo, se debe al aporte de calcio (Ca) por la aplicación del SFT (fosfato monocálcico). A medida que aumenta la concentración de Ca y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  en la solución del suelo, se favorece la formación de minerales de fosfatos cálcicos y carbonato de calcio, incrementando el pH del suelo hasta un valor cercano a 8 para un nivel de P disponible mayor a  $180 \text{ mg P kg}^{-1}$ . Cuando la prueba de P del suelo supera este nivel, el pH (Figura 2.5) y la concentración de Ca intercambiable (Anexo C) disminuyeron. Posiblemente la alta cantidad de Ca y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  aplicado con la

enmienda para alcanzar altos niveles de P disponible en el suelo, permitieron la formación y precipitación de fosfato cálcico y la liberación de iones de  $H^+$  a la solución del suelo reduciendo el pH.

La razón entre la prueba de suelo P determinada por el método Olsen y la prueba de suelo P determinada por el método Bray I (O/B), fue mayor mientras se incrementó el pH. Aunque O/B no fue significativamente diferente entre niveles de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P ( $\alpha=0.05$ ), hizo evidente que la prueba Bray I perdió capacidad de extracción mientras aumentó el pH del suelo. De acuerdo a lo sugerido por Kuo (1996), posiblemente la solución ácida Bray I P (0.03 M  $NH_4F$  and 0.025 M HCl) fue neutralizada en el suelo debido a la formación de  $CaF_2$  en el medio, originados por el aporte cálcico de la enmienda, formación que favorece la inmovilización y subestimación de la concentración de P disponible en el suelo. Fang et al. (2002) y Mallarino (1997), mostraron un similar fenómeno en suelos de origen calcáreo y un fenómeno similar no ocurre con el uso del extractante usado en la prueba Olsen y Mehlich 3.

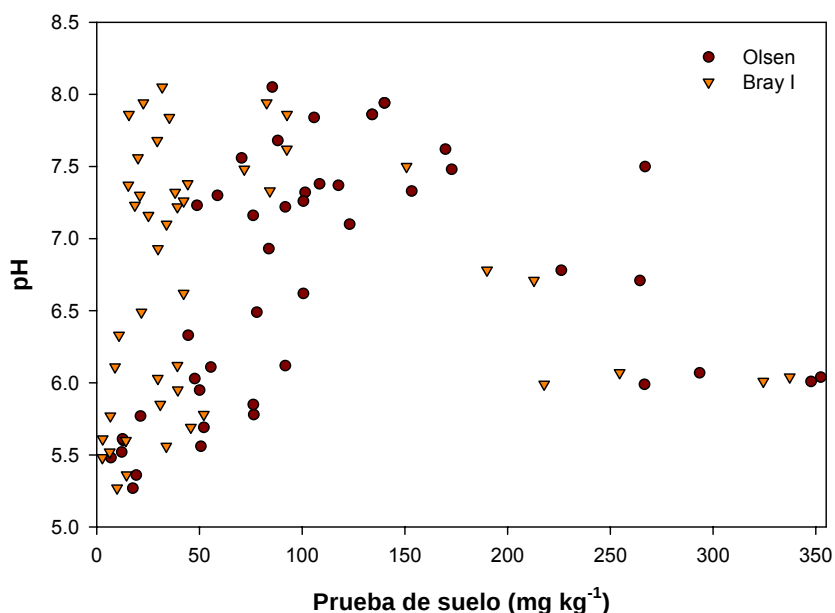


Figura 2.5. Variación en el pH del suelo para diferentes niveles en las pruebas de P Olsen y Bray I.

### 2.2.3. Comportamiento del flujo superficial

La pendiente del terreno (9%) y la cobertura de la superficie del suelo de cada parcela (82%) se mantuvieron homogéneos y no presentaron diferencia alguna entre parcelas agrupadas por grado de susceptibilidad a la pérdida de P. El valor promedio del contenido de humedad volumétrica del suelo ( $\Theta$ ) se incrementó de 32.3% (CV=25.5%) a 39.5% (CV=9.1) del primer al segundo día. El tiempo de respuesta del flujo superficial tras iniciar la precipitación siempre fue menor cuando  $\Theta$  fue mayor. El volumen total de escorrentía (E), el flujo (Q) y la respuesta hidrológica del suelo (E/P), presentaron diferencia significativa entre las dos pruebas y están directamente correlacionadas con  $\Theta$  (Tabla 2.2). Similares condiciones son descritas por Sharpley y Kleinman (2003).

Se observó en una parcela una condición de  $\Theta$  en el primer día de simulación con un valor significativamente bajo (10%) y un tiempo de respuesta de la escorrentía de 106 minutos. Al analizar el grupo de datos sin incluir esta condición, el valor promedio para el tiempo de respuesta de la escorrentía se redujo en el primer día a 10.8 min. Aun bajo éstas condiciones el promedio en el contenido de humedad y el volumen de escorrentía no presentaron un importante cambio. Una relación exponencial decreciente ( $R^2 = 0.59$ ) entre  $\Theta$  y el tiempo de respuesta de la escorrentía fue encontrada (Figura 2.6).

Tabla 2.2. Parámetros hidrológicos generados a una intensidad de  $70 \text{ mm h}^{-1}$

| Parámetro                                   | Día 1  | Día 2  |
|---------------------------------------------|--------|--------|
| Tiempo de respuesta de la esc. (min)        | 15.0 a | 5.6 b  |
| Duración de la precipitación (min)*         | 45.0   | 35.6   |
| Escorrentía (E) (mm)*                       | 15.1 b | 25.5 a |
| Flujo promedio (Q) ( $\text{mm min}^{-1}$ ) | 0.52 b | 0.85 a |
| Humedad Vol. Antecedente (%)                | 32.3 b | 39.5 a |
| Precipitación total (P) (mm)*               | 53.0 a | 41.8 b |
| Relación E/P (%)*                           | 34.1 b | 62.9 a |

Valores seguidos de la misma letra en una fila no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre días de simulación. \*Valores obtenidos para un tiempo de escorrentía de 30 minutos.

El valor de  $\Theta$  influye sobre la respuesta hidrológica (E/P) del suelo (Figura 2.7), la lámina de escorrentía y el flujo (Figura 2.8) que ocurren en un evento de lluvia específico. Los valores observados para el flujo superficial, el tiempo de inicio de escorrentía y la relación E/P fueron consistentes a los registrados bajo

condiciones de lluvia natural en el mismo predio (Ramírez et al., 2003), bajo condiciones de lluvia simulada en Ultisoles (Pote et al., 1999a) y en pasturas (Sauer et al., 2000).

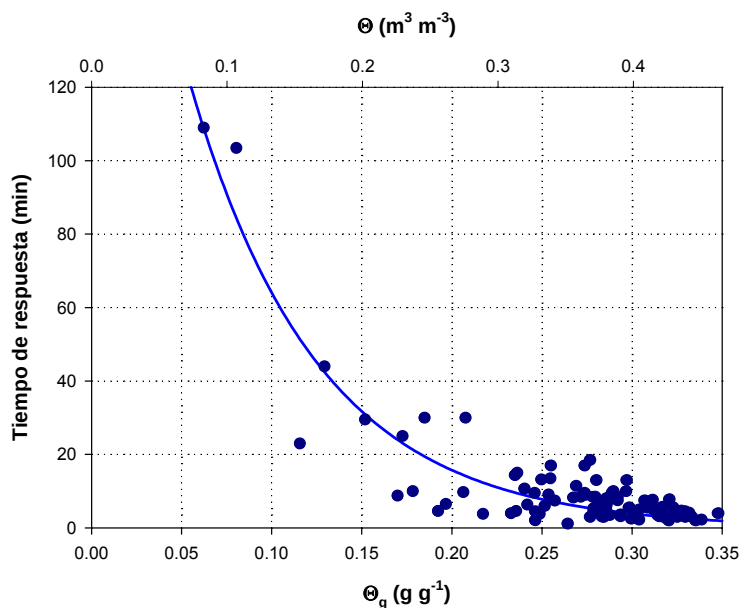


Figura 2.6. Relación entre el contenido de humedad antecedente del suelo y el tiempo de respuesta del flujo bajo una intensidad de  $70 \text{ mm hr}^{-1}$ .

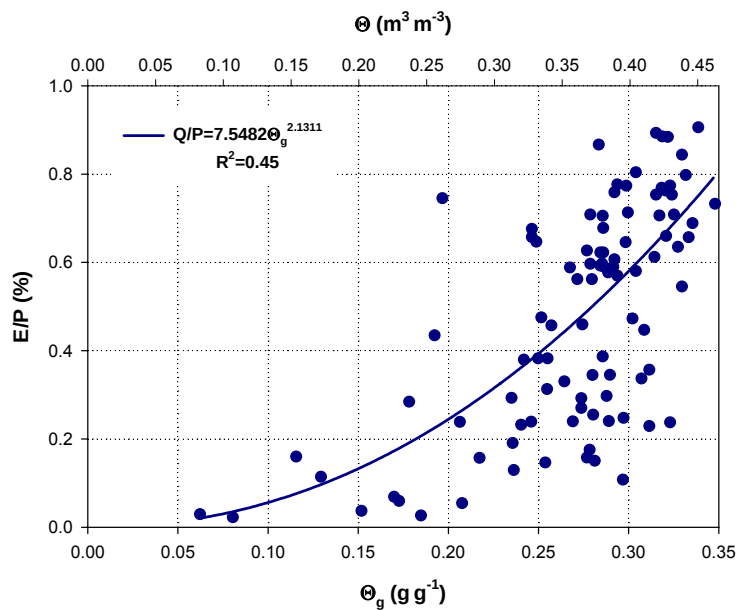


Figura 2.7. Relación entre el contenido de humedad inicial y la respuesta hidrológica del suelo ( $E/P$ ) bajo una simulación de lluvia de  $70 \text{ mm hr}^{-1}$ .

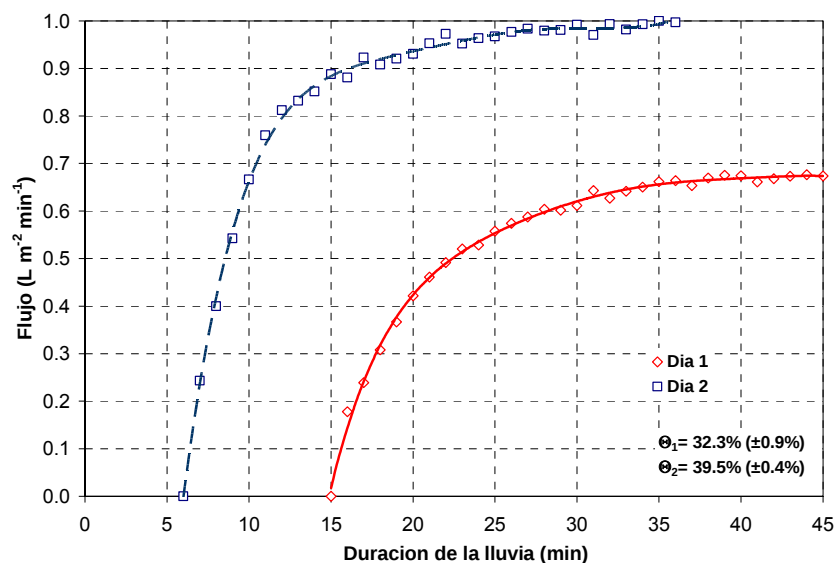


Figura 2.8. Hidrograma escorrentía en un Ultisol bajo 30 min de escorrentía a una intensidad de 70 mm/hr.

#### 2.2.4. Movimiento de fósforo

La concentración de TP en la escorrentía presentó valores entre 0.15 y 2.74 mg L<sup>-1</sup> el primer día y entre 0.15 y 2.13 mg L<sup>-1</sup> en el segundo. La concentración de DP presentó valores entre 0.21 y 2.25 mg L<sup>-1</sup> y entre 0.13 y 1.63 mg L<sup>-1</sup> para el primer y segundo día, respectivamente. Estos valores fueron obtenidos con muestras correspondientes a tiempos de escorrentía de 30 minutos. Las concentraciones promedio de TP y DP (Tabla 2.3) fueron significativamente menores en el segundo día, condición similar a la encontrada por Sharpley y Kleinman (2003). Las concentraciones de SS, DP, TP y la relación DP/TP observadas fueron consistentes con las obtenidas por Ramírez et al. (2003) para el mismo suelo bajo condiciones de lluvia natural.

Tabla 2.3. Valor promedio de la concentración de P y sedimentos en la escorrentía para muestras correspondientes a tiempos de escorrentía de 30 minutos.

| Parámetro                 | Día 1  | Día 2  |
|---------------------------|--------|--------|
| DP (mg L <sup>-1</sup> )  | 0.65 a | 0.44 b |
| TP (mg L <sup>-1</sup> )  | 0.79 a | 0.62 b |
| PP* (mg L <sup>-1</sup> ) | 0.15   | 0.15   |
| SS (g L <sup>-1</sup> )   | 0.17   | 0.18   |

Valores seguidos de la misma letra en una fila no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre días de simulación. PP\* es la fracción acumulada de P particulado (PP) más la fracción de P orgánico disuelto (DOP).

El valor promedio de la concentración de DP y TP en la escorrentía tras 30 minutos de flujo, fue significativamente diferente entre niveles de susceptibilidad (Olsen y Bray I) a la pérdida de P y fue diferente entre días en algunas de las categorías (Tabla 2.4). La fracción DP predominó en la escorrentía representando en promedio el 80% de la concentración de TP, con una variación de entre 43% y 100% para las muestras obtenidas en el tiempo de escorrentía de 30 minutos en los dos días de simulación (Figura 2.9). La proporción DP/TP se redujo (aunque no de forma estadísticamente significativa) mientras aumentó el nivel de P en el suelo (Tabla 2.5), el valor de  $\Theta$  y la lámina de escorrentía, factores hidrológicos que favorecen el incremento en la concentración de SS y PP\*. De forma contraria, Schroeder et al. (2004) citaron para diferentes series de suelo, que la relación DP/TP cambia entre 10 y 77% e incrementa con la prueba de suelo, alcanzando un valor promedio de 52%. En este estudio la tendencia observada de decrecimiento fue más evidente en el segundo día y el promedio de la relación DP/TP decreció en la segunda

simulación desde un 82% hasta un 72%. Esta condición se explica por una correlación ( $P < 0.01$ ) inversa entre DP y  $\Theta$  (Figura 2.10) y al incremento en factores como la esorrentía, la concentración de SS y por ende de PP\* (Tabla 2.6). Pote et al. (1999b) y Sharpley y Kleinman (2003) evidenciaron que la precipitación extrae menores cantidades de P en suelos húmedos que en suelos secos. Investigaciones preliminares realizadas por Pote et al. (1999a) enunciaron sin embargo, que la dilución no es el único efecto causante de bajas concentraciones de P en la esorrentía bajo condiciones de alta humedad, cuando otros efectos son controlados.

En el presente estudio, la readsorción de P por las partículas suspendidas probablemente fue limitada por la baja descarga de SS, siendo también un factor que permitió la alta relación DP/TP. Sharpley et al. (1981), McDowell y Sharpley (2002) y Sharpley y Kleinman (2003) describieron que la baja capacidad de readsorción de SS se refleja en la baja concentración de PP. La Figura 2.11 muestra el leve incremento en la concentración de SS debido al aumento en la lámina de esorrentía. La razón de enriquecimiento de P (REP) fue definida en el presente estudio como la proporción de PP\* de la concentración de TP ( $PP^*/TP$ ). Contrario a lo encontrado por Sharpley y Kleinman (2003) para suelos cubiertos con pasturas, en este estudio la REP se incrementó con la descarga de SS, debido a la relación entre la descarga de SS, PP\* y DP con la esorrentía. La Figura 2.12 describe como decrece la fracción DP y aumenta la fracción PP\*, con el aumento en la concentración de SS.

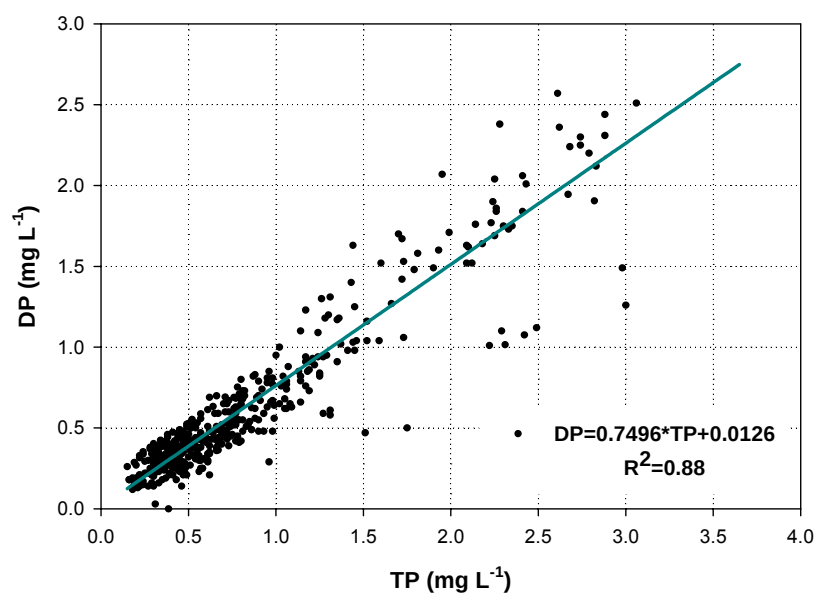


Figura 2.9. Relación entre las concentraciones de DP, TP en la escorrentía.

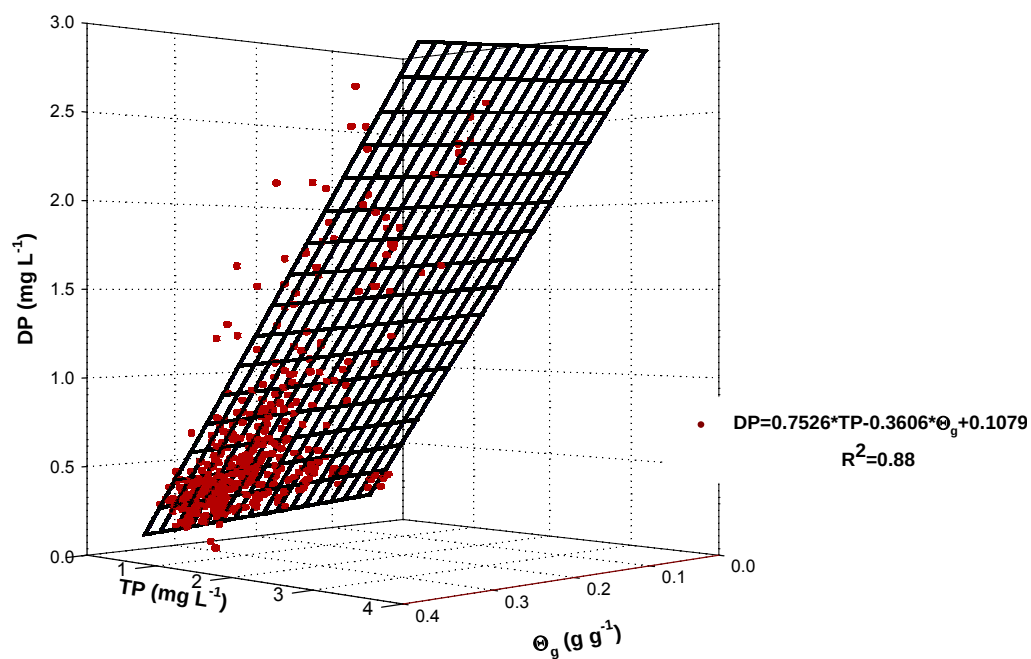


Figura 2.10. Relación entre las concentraciones de DP, TP en la escorrentía y  $\Theta_g$  en el suelo.

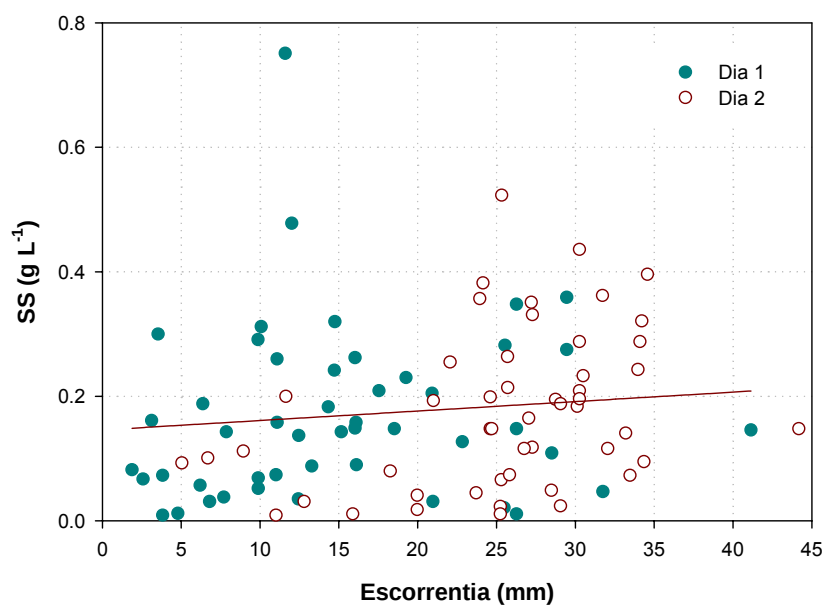


Figura 2.11. Relación entre la concentración de SS y la escorrentía.

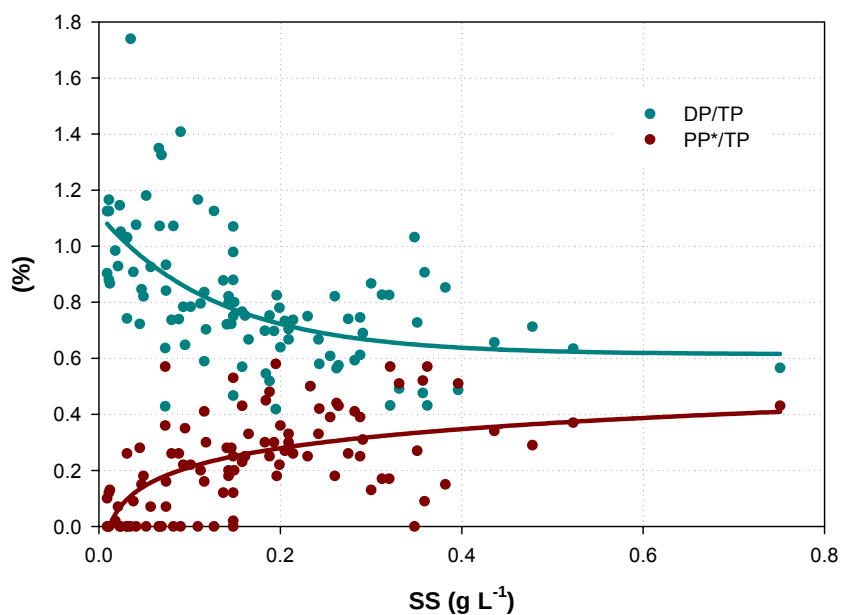


Figura 2.12. Relación entre la concentración de SS y las fracciones de P en el flujo.

Tabla 2.4. Concentración promedio de DP y TP en la escorrentía tras 30 minutos de flujo, para cada nivel de susceptibilidad a la pérdida de P en la escorrentía.

| Susceptibilidad<br>del suelo a la<br>pérdida de P en<br>la escorrentía | Olsen                    |         |                          |         | Bray I                   |         |                          |         |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|---------|
|                                                                        | DP (mg L <sup>-1</sup> ) |         | TP (mg L <sup>-1</sup> ) |         | DP (mg L <sup>-1</sup> ) |         | TP (mg L <sup>-1</sup> ) |         |
|                                                                        | Día 1                    | Día 2   | Día 1                    | Día 2   | Día 1                    | Día 2   | Día 1                    | Día 2   |
| Baja                                                                   | 0.31 a                   | 0.30 a  | 0.31 a                   | 0.30 a  | 0.31 a                   | 0.22 a  | 0.33 a                   | 0.26 a  |
| Media                                                                  | 0.37 a                   | 0.19 a* | 0.34 a                   | 0.24 a  | 0.39 a                   | 0.31 a  | 0.50 a                   | 0.43 a  |
| Alta                                                                   | 0.60 ab                  | 0.36 a* | 0.73 ab                  | 0.48 a* | 0.64 a                   | 0.36 a* | 0.80 a                   | 0.56 a* |
| Muy Alta                                                               | 0.83 ab                  | 0.45 a  | 1.13 b                   | 0.69 a* | 1.44 b                   | 0.41 a* | 1.61 b                   | 0.58 a* |
| Ext. Alta                                                              | 1.08 b                   | 0.95 b  | 1.57 b                   | 1.27 b  | 1.73 b                   | 1.12 b  | 2.06 b                   | 1.81 b  |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) por efecto de categorización. Valores seguidos de \* en una fila presentan diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) por efecto de día de simulación.

Tabla 2.5. Relación DP/TP para un suelo con diferentes niveles de susceptibilidad a la pérdida de P en escorrentía de 30 minutos.

| Susceptibilidad<br>del suelo a la<br>pérdida de P en<br>la escorrentía | Olsen |         | Bray I |       |
|------------------------------------------------------------------------|-------|---------|--------|-------|
|                                                                        | Día 1 | Día 2   | Día 1  | Día 2 |
| Baja                                                                   | 0.93  | 0.99 b  | 0.88   | 0.82  |
| Media                                                                  | 0.95  | 0.79 ab | 0.80   | 0.73  |
| Alta                                                                   | 0.81  | 0.74 a  | 0.81   | 0.72* |
| Muy Alta                                                               | 0.71  | 0.65 a  | 0.90   | 0.63  |
| Ext. Alta                                                              | 0.84  | 0.62 a* | 0.86   | 0.62  |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) por efecto de categorización. Valores seguidos de \* en una fila presentan diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) por efecto de día de simulación.

Tabla 2.6. Concentración promedio de SS y PP\* en la escorrentía para cada nivel de susceptibilidad a la pérdida de P en 30 minutos de escorrentía.

| Susceptibilidad<br>del suelo a la<br>pérdida de P en<br>la escorrentía | Olsen                   |         |                                        |         | Bray I                  |         |                                        |         |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------|----------------------------------------|---------|-------------------------|---------|----------------------------------------|---------|
|                                                                        | SS (g L <sup>-1</sup> ) |         | PP* : TP – DP<br>(mg L <sup>-1</sup> ) |         | SS (g L <sup>-1</sup> ) |         | PP* : TP – DP<br>(mg L <sup>-1</sup> ) |         |
|                                                                        | Día 1                   | Día 2   | Día 1                                  | Día 2   | Día 1                   | Día 2   | Día 1                                  | Día 2   |
| Baja                                                                   | 0.07 a                  | 0.02 a  | 0.017 a                                | 0.003 a | 0.11                    | 0.08 a  | 0.054 a                                | 0.051 a |
| Media                                                                  | 0.04 a                  | 0.07 ab | 0.020a                                 | 0.051 a | 0.10                    | 0.12 ab | 0.127 ab                               | 0.118 a |
| Alta                                                                   | 0.15 a                  | 0.14 b  | 0.142 ab                               | 0.130 a | 0.19                    | 0.18 ab | 0.166 ab                               | 0.160 a |
| Muy Alta                                                               | 0.35 b                  | 0.30 c  | 0.306 b                                | 0.231 a | 0.23                    | 0.28 bc | 0.17 ab                                | 0.215 a |
| Ext. Alta                                                              | 0.19 ab                 | 0.34 c* | 0.203 ab                               | 0.579 b | 0.26                    | 0.35 c  | 0.343 b                                | 0.690 b |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) por efecto de categorización. Valores seguidos de \* en una fila presentan diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) por efecto de día de simulación.

### 2.2.5. Masa de sedimentos y de fósforo en el flujo superficial

La masa total de SS y PP\* aumentó con el valor de  $\Theta$  y de la lámina de escorrentía acumulada, con SS presentando valores promedio de  $27.4 \text{ kg ha}^{-1}$  en el primer día y  $50.7 \text{ kg ha}^{-1}$  en el segundo, tras una escorrentía de 30 minutos. Se encontró diferencia significativa entre días debido al incremento en la escorrentía acumulada en el segundo día (Tabla 2.7).

Tabla 2.7. Valor promedio de la descarga de P y de sedimentos suspendidos en la escorrentía.

| Parámetro                   | Día 1  | Día 2  |
|-----------------------------|--------|--------|
| DP ( $\text{kg ha}^{-1}$ )  | 1.13   | 1.22   |
| TP ( $\text{kg ha}^{-1}$ )  | 1.35   | 1.71   |
| PP* ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) | 0.25 a | 0.51 b |
| SS ( $\text{kg ha}^{-1}$ )  | 27.4 a | 50.7 b |

Valores seguidos de la misma letra no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre días de simulación.

La descarga promedio de DP y TP no presentó diferencia significativa entre días de simulación debido al incremento en el volumen de escorrentía. La descarga de DP y TP aumentó con el nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P, sin embargo, para un mismo nivel no se observó diferencia significativa entre días (Tablas 2.8 y 2.9). La concentración de PP\* presentó una proporcionalidad con la descarga de SS. Excepto para la prueba de suelo Bray I en el día 1, la descarga de SS y PP\* aumentó con el nivel de susceptibilidad a la pérdida de P.

Tabla 2.8. Descarga promedio de DP y TP en la escorrentía para cada nivel de susceptibilidad a la pérdida de P en la escorrentía.

| Susceptibilidad<br>del suelo a la<br>pérdida de P en<br>la escorrentía | Olsen                     |         |                           |         | Bray I                    |         |                           |        |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------|---------------------------|---------|---------------------------|---------|---------------------------|--------|
|                                                                        | DP (kg ha <sup>-1</sup> ) |         | TP (kg ha <sup>-1</sup> ) |         | DP (kg ha <sup>-1</sup> ) |         | TP (kg ha <sup>-1</sup> ) |        |
|                                                                        | Día 1                     | Día 2   | Día 1                     | Día 2   | Día 1                     | Día 2   | Día 1                     | Día 2  |
| Baja                                                                   | 0.53 a                    | 0.60 a  | 0.54 a                    | 0.87 a  | 0.81 a                    | 0.69 a  | 0.84 a                    | 0.84 a |
| Media                                                                  | 0.89 a                    | 0.89 a  | 0.76 ab                   | 0.76 a  | 0.95 a                    | 0.97 a  | 1.26 ab                   | 1.35 a |
| Alta                                                                   | 1.00 a                    | 1.06 ab | 1.21 abc                  | 1.44 ab | 1.09 ab                   | 1.15 ab | 1.32 ab                   | 1.74 a |
| Muy Alta                                                               | 1.34 ab                   | 1.62 ab | 1.86 bc                   | 2.43 bc | 2.08 b                    | 1.24 ab | 2.40 b                    | 1.79 a |
| Ext. Alta                                                              | 2.02 b                    | 2.08 b  | 2.36 c                    | 3.09 c  | 2.13 b                    | 2.26 b  | 2.46 b                    | 3.32 b |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) por efecto de categorización. Valores seguidos de \* en una fila presentan diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) por efecto de día de simulación.

Tabla 2.9. Descarga promedio de SS y PP\* en la escorrentía para cada nivel de susceptibilidad a la pérdida de P en la escorrentía.

| Susceptibilidad<br>del suelo a la<br>pérdida de P en<br>la escorrentía | Olsen                     |           |                                         |          | Bray I                    |          |                                         |          |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------|-----------------------------------------|----------|---------------------------|----------|-----------------------------------------|----------|
|                                                                        | SS (kg ha <sup>-1</sup> ) |           | PP* : TP – DP<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) |          | SS (kg ha <sup>-1</sup> ) |          | PP* : TP – DP<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) |          |
|                                                                        | Día 1                     | Día 2     | Día 1                                   | Día 2    | Día 1                     | Día 2    | Día 1                                   | Día 2    |
| Baja                                                                   | 19.3 a                    | 3.8 a     | 0.03 a                                  | 0.01 a   | 31.71                     | 24.49 a  | 0.15                                    | 0.17 a   |
| Media                                                                  | 13.9 a                    | 23.0 ab   | 0.04 a                                  | 0.18 a   | 20.79                     | 21.07 a  | 0.35                                    | 0.38 a   |
| Alta                                                                   | 23.9 a                    | 40.6 ab*  | 0.23 ab                                 | 0.41 ab* | 26.47                     | 59.81 a* | 0.25                                    | 0.52 ab* |
| Muy Alta                                                               | 55.0 b                    | 117.9 c * | 0.52 b                                  | 0.80 bc  | 35.41                     | 87.21 a  | 0.28                                    | 0.67 ab  |
| Ext. Alta                                                              | 35.7 ab                   | 76.2 bc*  | 0.35 ab                                 | 1.02 c*  | 29.81                     | 64.03 a* | 0.40                                    | 1.06 b   |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) por efecto de categorización. Valores seguidos de \* en una fila presentan diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) por efecto de día de simulación.

### **2.2.6. Relación entre la prueba de P en el suelo y la concentración de P en el flujo.**

La concentración de DP y TP en la esorrentía se incrementó con la prueba de P en el suelo (Olsen y Bray I). Similares condiciones reportaron Sharpley y Smith (1989), Sharpley et al. (1996), Pote et al. (1996), Pote et al. (1999a), Pote et al. (1999b), Sharpley y Kleinman (2003), Andraski y Bundy (2003), Tabbara (2003), Schroeder et al. 2004 y Tarkalson y Mikkelsen (2004), entre otros autores. La tendencia encontrada entre estos parámetros es de tipo exponencial consistente con la expuesta por Sharpley et al. (2001) y por Guidry et al. (2004). El valor de  $R^2$  y la ecuación que describe las correlaciones son dadas en las Tablas 2.10 y 2.11 para DP y las Tablas 2.12 y 2.13 para TP. El incremento de DP y TP con la prueba de suelo, ocurre para los tres tiempos de esorrentía analizados (10, 20 y 30 minutos) y en los dos días de aplicación de lluvia.

El intercepto en las regresiones que correlacionan la concentración de DP y TP en la esorrentía con la prueba de suelo, describen el valor de DP y TP cuando la prueba de suelo sea cero y es positivo para todas las correlaciones. Los interceptos de las correlaciones entre DP y la prueba de suelo presentaron una pequeña diferencia significativa y fueron menores ( $\alpha=0.05$ ) que los interceptos de las correlaciones entre TP y la prueba de suelo. Los interceptos para las correlaciones entre DP y TP con la prueba de suelo fueron menores y significativamente diferentes en las regresiones determinadas para las pruebas de suelo Olsen. Un efecto de día se observó en el intercepto de las

correlaciones encontradas en el segundo día de simulación, para las dos pruebas de suelo. Schroeder et al. (2004) sugirieron que la razón para éstas diferencias y para que el valor sea positivo, radica en el efecto de factores específicos del suelo, que regulan la interacción entre la escorrentía y la superficie del suelo y por las contribuciones de P provenientes de lixiviados de materiales vegetales (pasturas y plantas) y residuos orgánicos sobre la superficie. Sharpley et al. (1981) reportaron que el P aportado como lixiviado por la parte aérea de la vegetación, alcanza valores entre 18 y 94% de la pérdida de P en la escorrentía, mientras que Timmons et al. (1970) mostraron que los residuos secos de pasturas pueden producir pérdidas de P que superan  $0.3 \text{ kg ha}^{-1}$ . Estos argumentos tienen gran relevancia para explicar el alto valor de los interceptos, e infieren que en este estudio, existió una fuente de P que no fue contabilizada por las pruebas de P del suelo, teniendo en cuenta que la mayor parte de las muestras presentaron altos contenidos de MO, factor que puede aportar P a la escorrentía e incide sobre las reacciones de adsorción de P en el suelo. Se encontró un efecto del contenido de MO sobre el valor de las concentraciones de P en la escorrentía. También se determinó un efecto de interacción entre el valor de la prueba de P del suelo, el contenido de MO y la concentración de DP y TP en la escorrentía (Figuras 2.13 y 2.14), condición que coincide con los resultados presentados por Good et al. (2004). El valor de los interceptos es mayor en las correlaciones con la prueba de suelo Bray I, debido a la menor capacidad de extracción que presenta la misma respecto de la prueba Olsen.

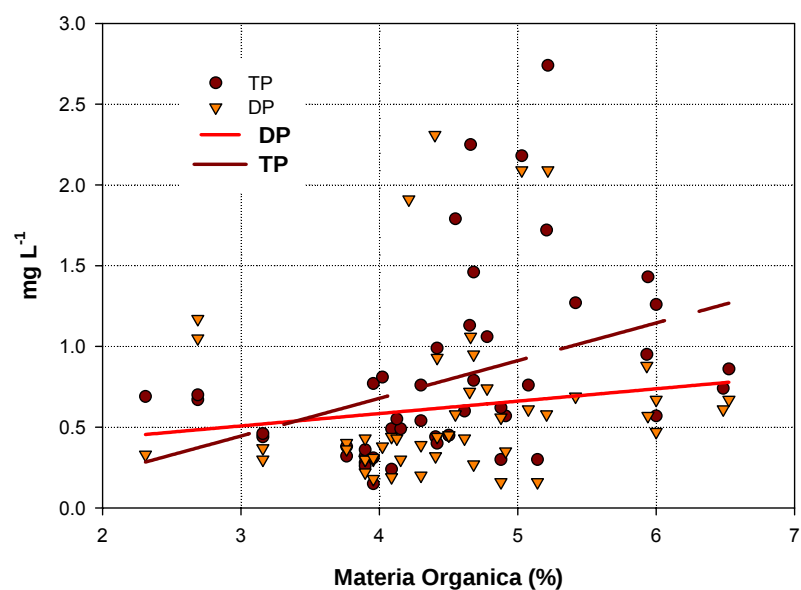


Figura 2.13. Relación entre la concentración de TP y DP en la escorrentía y el contenido de MO del suelo.

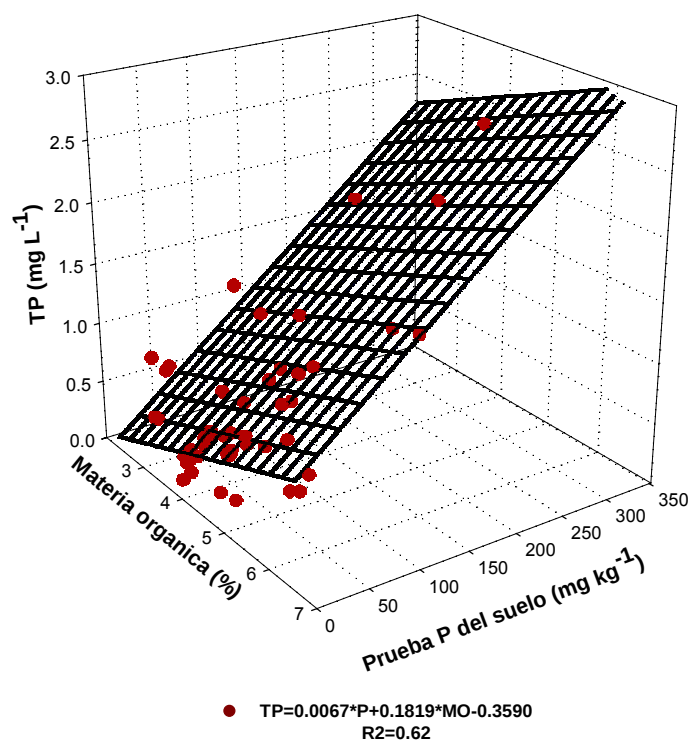


Figura 2.14. Relación entre la prueba de suelo, el contenido de MO y la concentración de TP en la escorrentía.

Tabla 2.10. Parámetros de regresión entre la concentración de DP en la escorrentía y la prueba de suelo Olsen.

| Día 1                       |                                     |                | Día 2                               |                |  |
|-----------------------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|--|
| Tiempo de escorrentía (min) | Ecuación                            | R <sup>2</sup> | Ecuación                            | R <sup>2</sup> |  |
| 10                          | DP = 0.3929*1.0073 <sup>Olsen</sup> | 0.83           | DP = 0.3163*1.0048 <sup>Olsen</sup> | 0.44           |  |
| 20                          | DP = 0.3077*1.0072 <sup>Olsen</sup> | 0.87           | DP = 0.2561*1.0051 <sup>Olsen</sup> | 0.57           |  |
| 30                          | DP = 0.2720*1.0071 <sup>Olsen</sup> | 0.92           | DP = 0.2288*1.0050 <sup>Olsen</sup> | 0.49           |  |

Tabla 2.11. Parámetros de regresión entre la concentración de DP en la escorrentía y la prueba de suelo Bray I.

| Día 1                       |                                    |                | Día 2                              |                |  |
|-----------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|--|
| Tiempo de escorrentía (min) | Ecuación                           | R <sup>2</sup> | Ecuación                           | R <sup>2</sup> |  |
| 10                          | DP = 0.5610*1.0068 <sup>Bray</sup> | 0.80           | DP = 0.4072*1.0043 <sup>Bray</sup> | 0.40           |  |
| 20                          | DP = 0.4461*1.0066 <sup>Bray</sup> | 0.85           | DP = 0.3386*1.0045 <sup>Bray</sup> | 0.50           |  |
| 30                          | DP = 0.3836*1.0067 <sup>Bray</sup> | 0.87           | DP = 0.2972*1.0044 <sup>Bray</sup> | 0.43           |  |

Tabla 2.12. Parámetros de regresión entre la concentración de TP en la escorrentía y la prueba de suelo Olsen.

| Día 1                       |                                     |                | Día 2                               |                |  |
|-----------------------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|--|
| Tiempo de escorrentía (min) | Ecuación                            | R <sup>2</sup> | Ecuación                            | R <sup>2</sup> |  |
| 10                          | TP = 0.4944*1.0068 <sup>Olsen</sup> | 0.89           | TP = 0.3792*1.0057 <sup>Olsen</sup> | 0.69           |  |
| 20                          | TP = 0.4178*1.0066 <sup>Olsen</sup> | 0.91           | TP = 0.3333*1.0056 <sup>Olsen</sup> | 0.66           |  |
| 30                          | TP = 0.3420*1.0069 <sup>Olsen</sup> | 0.91           | TP = 0.2809*1.0058 <sup>Olsen</sup> | 0.70           |  |

Tabla 2.13. Parámetros de regresión entre la concentración de TP en la escorrentía y la prueba de suelo Bray I.

| Día 1                       |                                    |                | Día 2                              |                |  |
|-----------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|--|
| Tiempo de escorrentía (min) | Ecuación                           | R <sup>2</sup> | Ecuación                           | R <sup>2</sup> |  |
| 10                          | TP = 0.6855*1.0063 <sup>Bray</sup> | 0.83           | TP = 0.5092*1.0051 <sup>Bray</sup> | 0.64           |  |
| 20                          | TP = 0.5884*1.0060 <sup>Bray</sup> | 0.81           | TP = 0.4425*1.0051 <sup>Bray</sup> | 0.64           |  |
| 30                          | TP = 0.4844*1.0063 <sup>Bray</sup> | 0.77           | TP = 0.3781*1.0052 <sup>Bray</sup> | 0.62           |  |

El incremento (pendiente) de cada correlación entre la concentración de DP y TP en la escorrentía y la prueba de P en el suelo no difiere significativamente ( $\alpha=0.05$ ) entre métodos para determinar la prueba de suelo, tampoco difiere al aumentar el tiempo de escorrentía en un mismo día. Existe un efecto de dilución aditivo de la concentración de P en la escorrentía, al aumentar el tiempo de escorrentía debido al incremento gradual de la humedad del suelo y de la lámina de escorrentía. Pote et al. (1996) y Cox y Hendricks (2000) encontraron una reducción en la concentración de DP durante un evento de escorrentía, atribuido al efecto de las gotas de lluvia que desplazan y diluyen la solución del suelo al incrementar la lámina de flujo mientras avanza el tiempo de duración de la escorrentía.

Se encontró diferencia significativa entre días para los valores de las pendientes en las correlaciones, evidenciando la presencia de un efecto de interacción generado por el incremento en el valor de  $\Theta$  y de la escorrentía para la segunda simulación (Figuras 2.15 y 2.16). Pote et al. (1999 b) enunció que el

cambio de las relaciones entre las fracciones de P en la escorrentía y la prueba de suelo, se deben a la variabilidad en las condiciones del terreno, especialmente de  $\Theta$ . Las Figuras 2.17 y 2.18 muestran la correlación ( $R^2=0.65$  y  $R^2=0.73$ ) entre la prueba de P del suelo, la variación de  $\Theta$  y la concentración de P en el flujo ( $P<0.01$ ).

El valor del coeficiente de extracción de P del suelo por la escorrentía corresponde a la pendiente de la correlación lineal entre la prueba de suelo y la concentración de DP en la escorrentía. Este valor se redujo en el segundo día con relación al primer día de aplicación de lluvia simulada y con el incremento en el tiempo de escorrentía en un evento (Tabla 2.14). El valor del coeficiente para la prueba Bray I en el primer día fue mayor y significativamente diferente que el de la prueba Olsen. El valor de dicho coeficiente fue similar para las dos pruebas en el segundo día de simulación (Anexo G) Estos valores fueron consistentes con los reportados por Vadas et al. (2005) y por otros estudios no revisados en la misma publicación.

Tabla 2.14. Coeficiente de extracción de P por la escorrentía para las pruebas de suelo Olsen y Bray I en dos días de simulación y diferentes tiempos de escorrentía.

| Tiempo de<br>escorrentía<br>(min) | Coeficiente de extracción de P |        |        |        |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|
|                                   | Día 1                          |        | Día 2  |        |
|                                   | Olsen                          | Bray I | Olsen  | Bray I |
| 10                                | 0.0092                         | 0.010  | 0.0035 | 0.0035 |
| 20                                | 0.0064                         | 0.0072 | 0.0032 | 0.0031 |
| 30                                | 0.0056                         | 0.0062 | 0.0027 | 0.0027 |

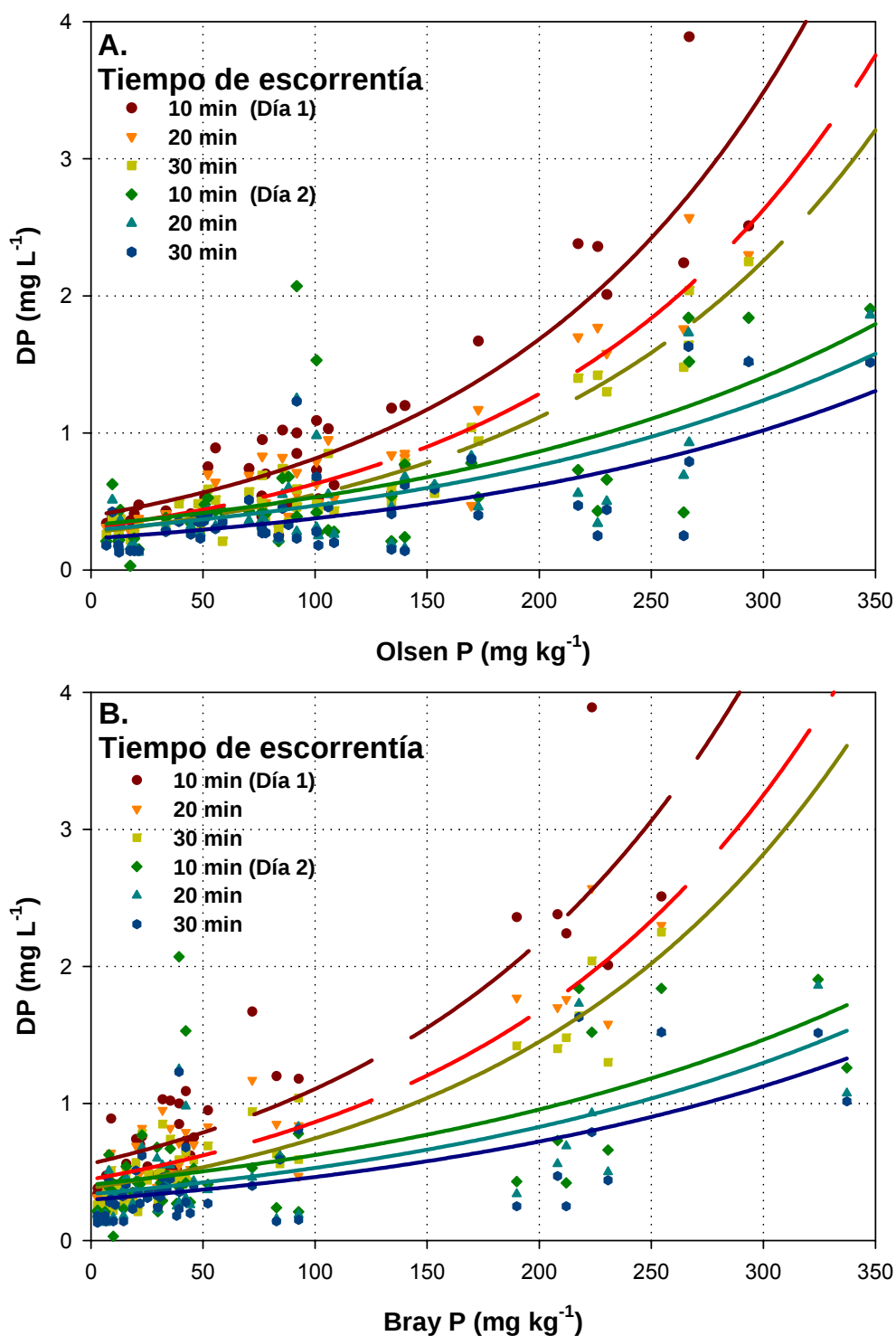


Figura 2.15. Relación entre la prueba de suelo Olsen (A) y Bray I (B) y la concentración de DP en la escorrentía para eventos con diferente tiempo de escorrentía en dos días de simulación.

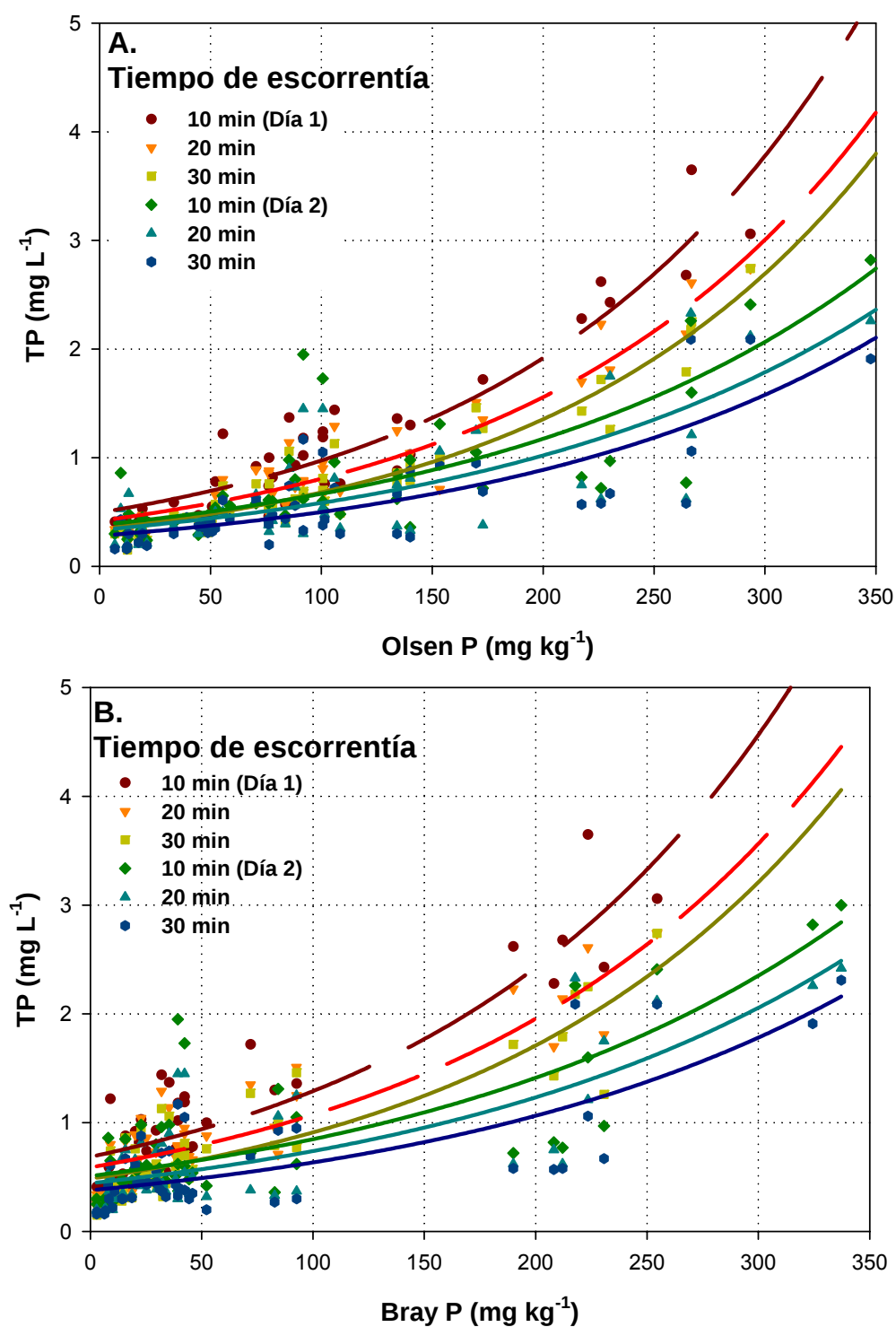


Figura 2.16. Relación entre la prueba de suelo Olsen (A) y Bray I (B) y la concentración de TP en la escorrentía para eventos con diferente tiempo de escorrentía en dos días de simulación.

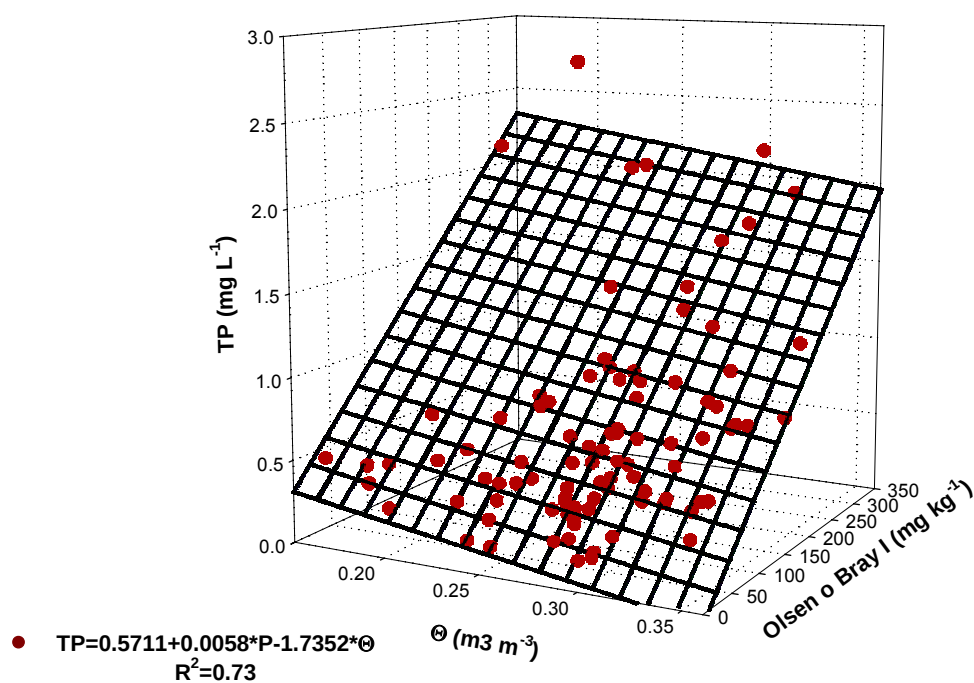


Figura 2.17. Relación entre la prueba de suelo, el contenido de humedad antecedente del suelo y la concentración de TP en la escorrentía.

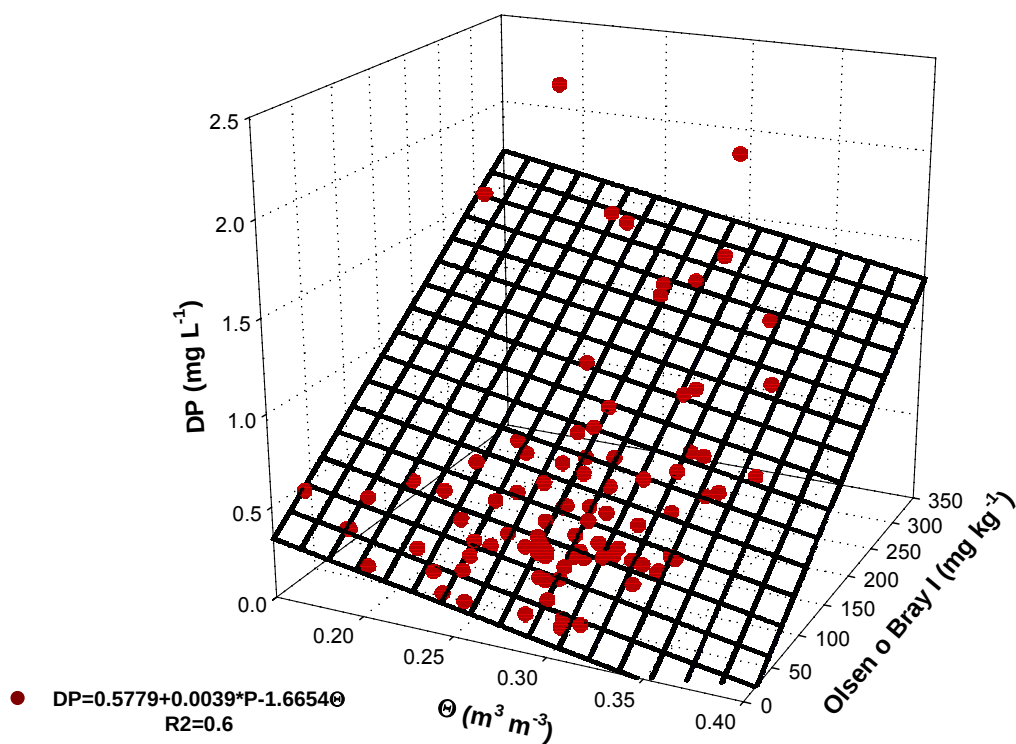


Figura 2.18. Relación entre la prueba de suelo, el contenido de humedad antecedente del suelo y la concentración de DP en la escorrentía.

Las condiciones homogéneas de pendiente y grado de cobertura de la superficie del terreno permiten inferir, que la variable con mayor efecto sobre parámetros hidrológicos como el tiempo de respuesta del flujo y la lámina acumulada de esorrentía es  $\Theta$ . En promedio el tiempo de duración total del evento de lluvia simulada tras 30 minutos de flujo para el primer día es de 45 minutos y para el segundo día de 36 minutos (Figura 2.19). La concentración de TP y DP en la esorrentía decrece mientras aumenta el volumen y la duración de un evento de esorrentía, así como el tiempo total y la lámina de un evento de lluvia (Figuras 2.20, 2.21 y 2.22). Sin embargo, estas concentraciones transcurridos 10, 20 y 30 minutos del flujo dentro de un mismo nivel de susceptibilidad a la pérdida de P, no presentaron diferencia significativa ( $\alpha < 0.05$ ) dentro de cada día y para las dos pruebas de suelo. La tasa de dilución en cada nivel de susceptibilidad a la pérdida de P fue significativamente diferente e incrementó con el valor de  $\Theta$ . La tasa de dilución se observó entre 0.012 y 0.020  $\text{mg L}^{-1} \text{min}^{-1}$  en el primer día y entre 0.006 y 0.008  $\text{mg L}^{-1} \text{min}^{-1}$  en el segundo.

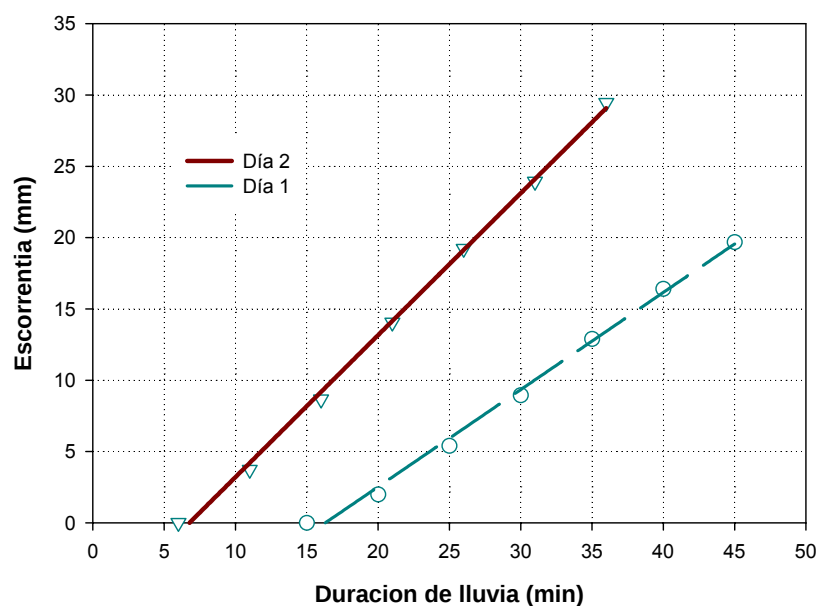


Figura 2.19. Incremento de la lámina de flujo en un evento de precipitación ( $I=70 \text{ mm hr}^{-1}$ ).

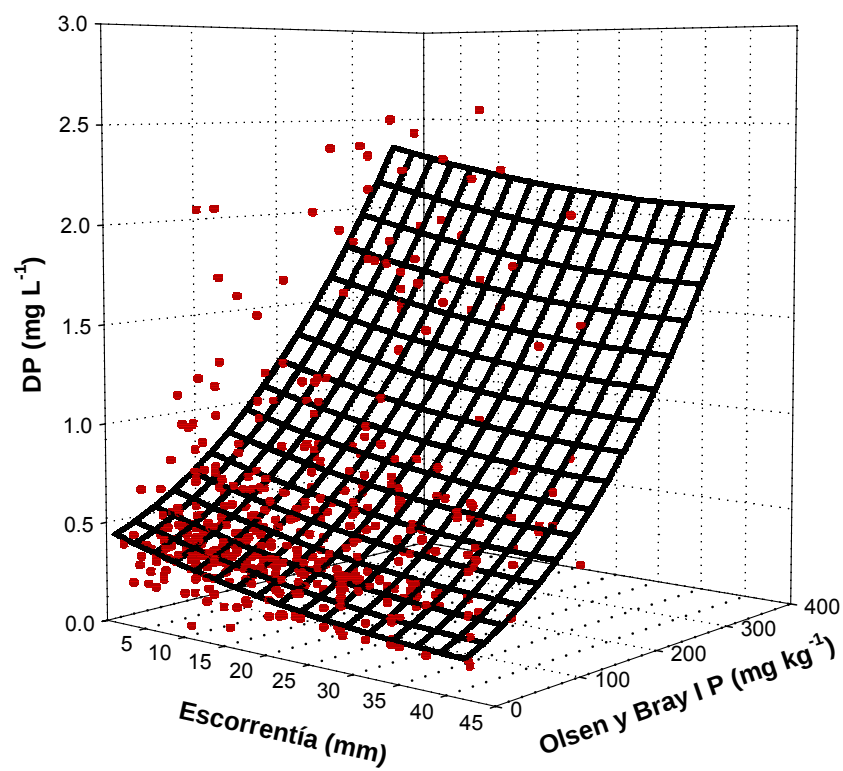
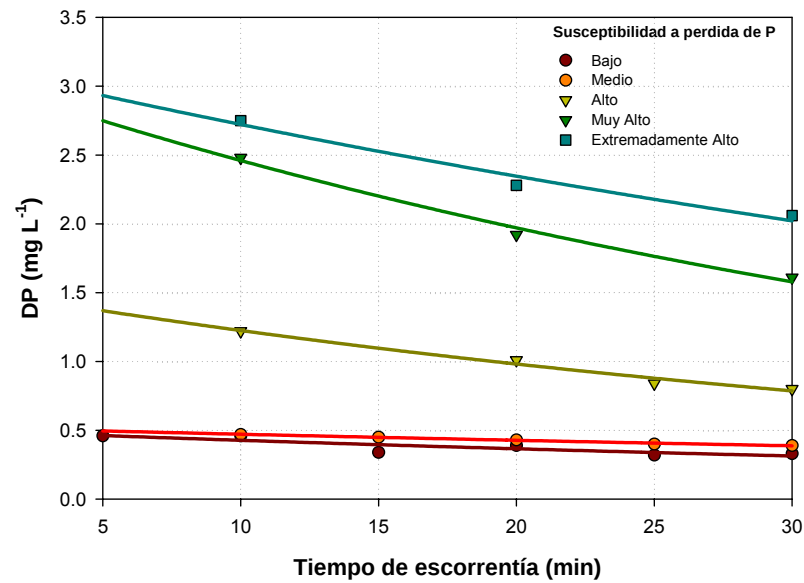


Figura 2.20. Relación entre la prueba de suelo, la lámina de escurrentía y la concentración de DP en el flujo.

A.



B.

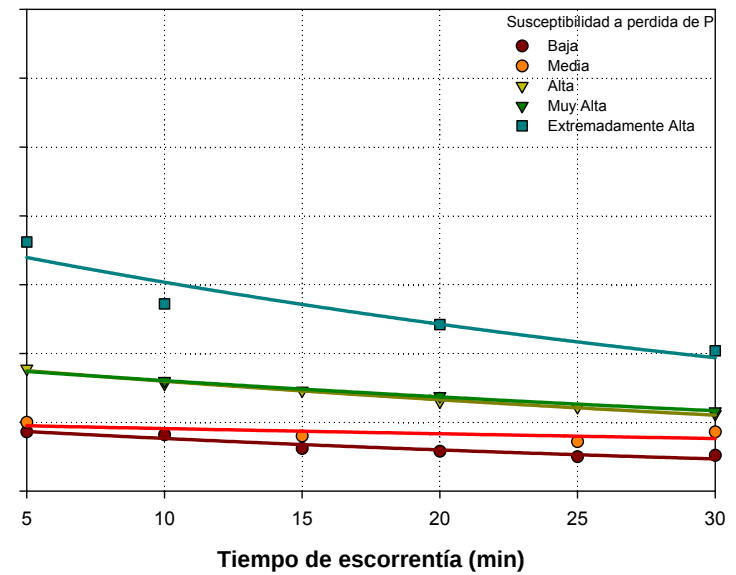
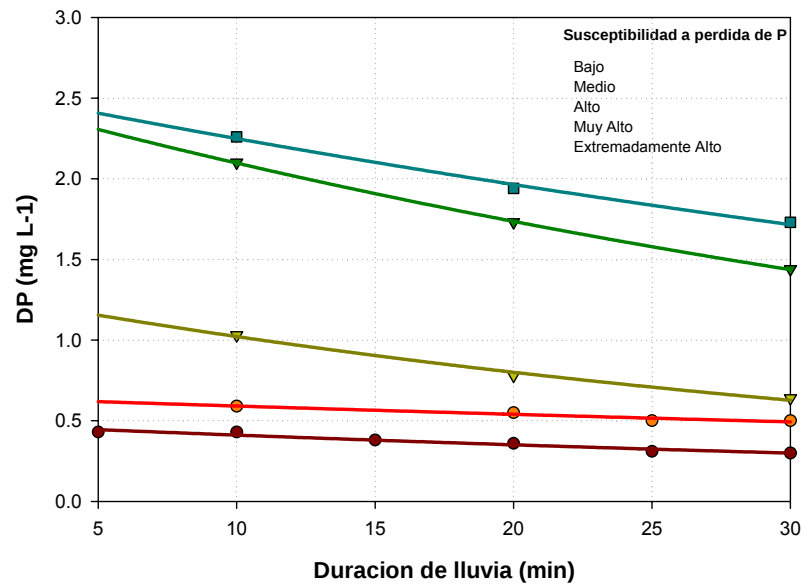


Figura 2.21. Comportamiento de la concentración de DP en la escorrentía para eventos de lluvia de diferente duración en día 1 (A) y día 2 (B), en suelos con diferente susceptibilidad a la pérdida de P (Olsen).

A.



B.

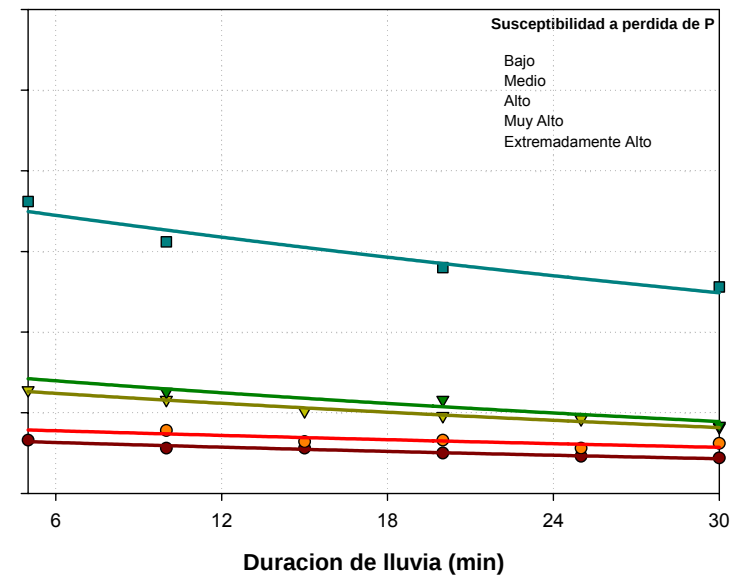


Figura 2.22. Comportamiento de la concentración de DP en la escorrentía para eventos de lluvia de diferente duración en día 1 (A) y día 2 (B), en suelos con diferente susceptibilidad a la pérdida de P (Bray).

### 2.2.7. Determinación del valor crítico ambiental de P

A partir de las correlaciones encontradas entre la prueba de suelo y la concentración de DP en la esorrentía para un tiempo de flujo de 30 minutos (tiempo de comparación referenciado por el Protocolo del NPRP), se encontró un valor crítico ambiental de 184 y 143 mg kg<sup>-1</sup> para las pruebas Olsen y Bray I, respectivamente. El valor encontrado para la prueba Olsen valida el índice propuesto para Puerto Rico, mientras que el valor encontrado para la prueba Bray I, indica que el complejo de series Humatas, Consumo, Daguey es aproximadamente un 30% más susceptible a la pérdida de P que otros suelos en Puerto Rico. Posiblemente debido al mayor valor promedio para el contenido de MO que presentan las muestras de suelo analizadas en el presente estudio, y a su ya discutido efecto sobre la concentración de DP en el flujo para un mismo nivel de P en el suelo. Otro factor que infiere en la condición descrita, es la reducción en la capacidad de extracción de la prueba Bray I, causada por el valor del pH en el suelo, sugiriendo una posible subestimación de la concentración de P en el suelo.

La Tabla 2.15 describe el valor crítico ambiental de P para eventos de esorrentía de diferente duración. Se encontró que el suelo tiende a ser más susceptible de aportar concentraciones de P críticas en la esorrentía ( $\geq 1 \text{ mg L}^{-1}$ ), cuando el evento de lluvia es más corto en días secos y con valores de  $\Theta$  inferiores a la capacidad de campo. También permite inferir que eventos de menor intensidad bajo condiciones homogéneas de  $\Theta$  y duración del evento a las descritas en este estudio, aportarían mayores concentraciones de DP en la

escorrentía, aumentando la susceptibilidad del suelo a aportar concentraciones de P potencialmente eutroficantes.

Tabla 2.15. Valor crítico ambiental de la prueba de P en el suelo bajo diferente duración de eventos de lluvia.

| <b>Tiempo de<br/>escorrentía<br/>(min)</b> | <b>Día 1</b>                          |                                        | <b>Día 2</b>                          |                                        |
|--------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|
|                                            | <b>Olsen<br/>(mg kg<sup>-1</sup>)</b> | <b>Bray I<br/>(mg kg<sup>-1</sup>)</b> | <b>Olsen<br/>(mg kg<sup>-1</sup>)</b> | <b>Bray I<br/>(mg kg<sup>-1</sup>)</b> |
| 10                                         | 130                                   | 86                                     | 240                                   | 209                                    |
| 20                                         | 162                                   | 123                                    | 268                                   | 241                                    |
| 30                                         | 184                                   | 143                                    | 296                                   | 276                                    |

### 2.3. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio confirmaron la evidencia de que las concentraciones de DP y TP en la escorrentía, se incrementan con la prueba de P del suelo (Olsen y Bray). El mejor ajuste para la relación entre DP y la prueba de suelo a diferentes tiempos de escorrentía, fue encontrado en regresiones de tipo exponencial. El coeficiente de determinación estuvo entre 0.40 y 0.87 para la prueba Bray I P y entre 0.44 y 0.92 para la prueba Olsen P.

La fracción DP representó en promedio el 80% de la concentración total de P en la escorrentía. El incremento en parámetros intrínsecos del suelo como el contenido de MO y el grado de cobertura vegetal de la superficie del suelo, incrementaron la concentración de TP y DP en la escorrentía. El incremento en  $\Theta$  reduce la concentración de DP e incrementa la concentración de PP\* y SS en eventos de escorrentía con igual tiempo de duración, sobre suelos con similar nivel de P. Las concentraciones de DP y TP en días con eventos de escorrentía consecutivos, se redujeron por un aumento en  $\Theta$  y en la lámina de escorrentía en el segundo evento. El aumento en el tiempo de escorrentía incrementó el volumen de escorrentía y la concentración SS y PP\* y redujo la concentración de las fracciones TP y DP en la escorrentía. Una limitada readsorción de P por parte de los SS en el flujo y con ello una mayor concentración de DP en la escorrentía, ocurrieron por la baja concentración de SS propia de suelos con pasturas.

El coeficiente de extracción de P por la escorrentía para el complejo conformado por las series de suelo Humatas, Consumo y Daguey presentó para

un tiempo de escorrentía de 30 minutos, un valor de 0.0056 y 0.0062 obtenidos para la prueba de suelo Olsen y Bray I respectivamente. El incremento en el tiempo de escorrentía y la ocurrencia de eventos consecutivos causa una reducción en el valor del coeficiente de extracción de P.

Bajo condiciones experimentales de campo y concentraciones reales de P en la escorrentía, se determinó para el complejo de suelos estudiado, un valor crítico ambiental para las pruebas Olsen y Bray I. Los resultados obtenidos validaron el índice de la prueba Olsen propuesto para Puerto Rico por Sotomayor et al. (2004). El valor crítico ambiental de la prueba Bray I para estos suelos, describió una susceptibilidad a la pérdida de P 1.3 veces mayor a la de otros suelos en Puerto Rico de acuerdo con el índice propuesto por los mismos investigadores. Sin embargo, aunque ambos extractantes presentaron altas correlaciones entre las fracciones de P en la escorrentía y el nivel de P en el suelo, la capacidad de extracción de P de la prueba Bray I, estuvo limitada por el incremento en el valor del pH generado por la enmienda con superfosfato triple, condición que puede estar sobreestimando la susceptibilidad de los suelos a perder P en la escorrentía y con ello, el valor crítico ambiental.

Al incrementarse el tiempo de un evento escorrentía y la lámina de escorrentía, el valor crítico ambiental aumenta debido a un efecto de dilución, reduciendo la susceptibilidad de un suelo a aportar concentraciones de DP superiores al límite de  $1 \text{ mg L}^{-1}$  sugerido por USEPA (1986).

### **3. PÉRDIDAS DE P Y SEDIMENTOS EN LA ESCORRENTÍA EN UN ULTISOL BAJO DIFERENTES FUENTES DE ENMIENDA**

#### **3.1. MATERIALES Y MÉTODOS**

El experimento fue realizado en veinte predios de la Estación Experimental Agrícola de Corozal perteneciente a la Universidad de Puerto Rico, en Corozal, Puerto Rico. Los predios presentaban diferentes variedades de pastos y de acuerdo con el valor de las pruebas de suelo de los predios testigo (T), no habían recibido aplicación alguna de enmiendas de fósforo (P) hasta el presente estudio. El suelo pertenece a la serie Humatas (Very-fine, parasequic, isohyperthermic Typic Haplohumults) (Beinroth et al., 2003). La caracterización taxonómica del suelo en el área fue confirmada por miembros del National Soil Survey Laboratory, perteneciente al Servicio Nacional de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) en Lincoln, Nebraska.

Cada predio tenía un área de 407 m<sup>2</sup>. Nueve de los predios fueron enmendados con superfosfato triple (SFT) recibiendo aplicaciones de 25, 50, 100, 150, 300, 450, 600, 900 y 1200 kg P ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, otros ocho con gallinaza (GL), recibiendo aplicaciones de 25, 50, 150, 300, 450, 600, 900 y 1200 kg P ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Anexo A). Tres predios no recibieron P y fueron usados como testigo (T). La enmienda orgánica fue dividida en dos aplicaciones realizadas en octubre de 2003 y febrero de 2004. La enmienda inorgánica fue dividida en cuatro aplicaciones realizadas en octubre y diciembre de 2003 y en febrero y mayo de 2004. Las pruebas de simulación de lluvia para evaluar la relación entre la prueba de P en el suelo y la concentración de P en la escorrentía, fueron

realizadas durante el mes de julio de 2004. Se realizó un muestreo en grillas en cada parcela, tras dividir cada predio en nueve celdas y tomar una muestra compuesta representativa de cada una de ellas, a una profundidad de 5 cm. Se seleccionó de cada predio una celda donde se estableció una parcela de simulación.

### **3.1.1. Establecimiento de parcelas y desarrollo de pruebas de simulación**

El establecimiento de las parcelas y las aplicaciones de la lluvia simulada fueron realizadas conforme al protocolo propuesto por el “National Phosphorus Research Project (NPRP) for Simulated Rainfall - Surface Runoff Studies” (USDA – NRCS, 2001). Se establecieron parcelas pareadas cada una con diferente nivel de P en el suelo. Cada subparcela representó una unidad experimental. El área de las subparcelas era de 1 m de ancho por 2 m de largo con el eje longitudinal orientado en el sentido de la pendiente y la canaleta de colección del flujo en la parte inferior de la misma. El borde de las parcelas se elaboró con láminas de acero de 0.32 cm de espesor y 15 cm de altura, de las cuales entre 3 y 5 cm de cada lámina fueron enterrados en el suelo. Los predios presentaron cobertura de gramíneas (Brachiaria, Estrella, Guinea) cuya altura fue homogeneizada a un máximo de 5 cm previo a la simulación de lluvia.

Se realizaron aplicaciones de lluvia simulada con una intensidad de 70 mm hr<sup>-1</sup>. Este valor fue sugerido por el protocolo NPRP (USDA – NRCS, 2001) y corresponde a la intensidad máxima en 1 hora para un período de retorno de 10 años en el área de estudio. Esta intensidad fue determinada a partir de las curvas de Intensidad - Frecuencia - Duración generadas por la Junta de

Planificación de Puerto Rico (1975). Se empleó un simulador construido en la Estación Experimental Agrícola de Corozal, siguiendo las especificaciones técnicas del modelo TLALOC 3000 (Joern's Inc., West Lafayette, IN) y una boquilla FullJet ½HHSS50WSQ (Spraying Systems Co., Wheaton, IL) ubicada en el centro de la parcela a 3.05 m de altura sobre la superficie del suelo para permitir velocidad terminal en las gotas. Se realizaron calibraciones previas para determinar la presión de flujo que generaba dicha lámina de lluvia y la uniformidad de aplicación de la misma por parte de la boquilla siguiendo el procedimiento sugerido en el protocolo del NPRP.

Un total de treinta y cuatro simulaciones de lluvia fueron realizadas en este estudio (17 parcelas pareadas  $\times$  2 eventos de lluvia simulada). El esquema de trabajo consistió de dos simulaciones de lluvia a intervalos de veinticuatro horas en cada parcela. El intervalo de tiempo influyó en las condiciones de humedad volumétrica del suelo ( $\Theta$ ). La primera simulación presentó valores de  $\Theta$  inferiores a la capacidad de campo ( $\approx 38\%$ ) y en la segunda replicación valores entre la capacidad de campo y el punto de saturación. Antes de cada prueba de simulación se determinó el grado de cobertura de la superficie del suelo y el contenido de humedad volumétrica antecedente del suelo ( $\Theta_v$ ) en tres puntos de cada subparcela (parte alta, media y baja), usando el medidor de humedad Theta probe (Dynamax Inc., TX). Mediante calibración previa se correlacionó la medida del instrumento y el valor para el contenido de humedad gravimétrica ( $\Theta$ ) en la misma muestra, para muestras de suelo con diferentes condiciones de humedad. En cada subparcela se obtuvo una muestra superficial de suelo

compuesta (0 - 5 cm) dentro y en el borde de cada subparcela, evitando al máximo disturbar la superficie. En el laboratorio se cuantificó la concentración total de P mediante los métodos de Olsen (Sims, 2000a) y Bray I (Sims, 2000b), el valor del pH (1:1), la conductividad eléctrica, la textura mediante el método de Bouyucuos (Montenegro y Malagón, 1990) y la concentración de materia orgánica (MO) mediante el método de Nelson y Sommers (1982).

Una vez iniciada la lluvia, el tiempo de inicio del flujo superficial fue registrado. Se cuantificó la esorrentía desde su inicio a intervalos de un minuto, durante un tiempo de 30 minutos para obtener el hidrograma de esorrentía. Una muestra de 500 ml del volumen de esorrentía acumulado se tomó cada 10 minutos y una muestra de la fuente de suministro de agua, para determinar la variabilidad en la concentración de sedimentos suspendidos (SS), P total (TP) y P disuelto (DP). Se tomó muestra de la fuente de agua en cada prueba de simulación, para determinar la concentración de P total (TP), P disuelto (DP) y sedimentos suspendidos (SS), encontrando valores promedio de 0.05 y 0.04 mg L<sup>-1</sup> y de 0.001 g L<sup>-1</sup> respectivamente. Para eliminar esta variabilidad en el análisis de la información, las concentraciones de DP, TP y SS de la fuente fueron sustraídas del valor de las concentraciones en la esorrentía.

La concentración de DP se determinó por medición directa (Murphy y Riley, 1962) para una submuestra filtrada por un diámetro de poro de 0.45 µm (Whatman, UK), la masa de solutos retenidos en el filtro permitió estimar la concentración de SS. La concentración de TP se determinó para una muestra no

filtrada de 100 ml mediante el procedimiento de digestión con persulfato (Pote y Daniel, 2000).

Los análisis de laboratorio fueron desarrollados en el Laboratorio de Química de Suelos del Recinto Universitario de Mayagüez y el Laboratorio de Química de Suelos y Aguas de la Estación Experimental Agrícola de Río Piedras, ambos pertenecientes a la Universidad de Puerto Rico.

### **3.1.2. Métodos estadísticos**

Diecisiete parcelas pareadas fueron utilizadas, cada una con un nivel diferente de P en el suelo. Cada subparcela representó un replicado. Había siete parcelas enmendadas con GL, siete parcelas enmendadas con SFT y tres parcelas testigo. Los resultados de cada subparcela para Olsen P, Bray I P, pendiente, cobertura,  $\Theta$ , MO y textura fueron analizados con su respectiva pareja mediante una prueba t student pareada ( $\alpha = 0.05$ ), para determinar la homogeneidad en cada parcela. Similar procedimiento se realizó para la escorrentía acumulada, TP, DP y SS, para determinar si existió incidencia en la uniformidad del simulador sobre la variabilidad de las subparcelas.

#### **3.1.2.1. Efectos de variables pedológicas**

Se agruparon las parcelas por el tipo de enmienda que recibieron y por el nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P sugerido por Sotomayor et al (1994), para evaluar el cambio en la MO, el pH y la textura por cada tipo de enmienda y en cada nivel evaluado. El efecto de la MO y el pH sobre la concentración de DP y TP y el efecto del contenido de P en el suelo sobre la acidez del suelo fueron determinados para cada tipo de enmienda de P.

### **3.1.2.2. Efectos de variables hidrológicas y día de simulación**

Se evaluó el efecto del tipo de enmienda, el nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P y el efecto de día de simulación, sobre la concentración y descarga promedio diaria de DP, TP, PP\* y SS, el tiempo de respuesta del flujo, el valor del contenido de humedad volumétrica antecedente del suelo ( $\Theta$ ), la lámina de escorrentía (E), el flujo promedio (Q), la precipitación total (P) y la razón entre la escorrentía y la precipitación (E/P).

### **3.1.2.3. Efectos de la prueba de suelo en la concentración de P en la escorrentía**

Para los métodos de extracción Olsen y Bray I, los valores de la prueba de P del suelo fueron correlacionados con la concentración de TP y DP en la escorrentía. El mejor ajuste de regresión fue determinado para cada intervalo de tiempo de escorrentía (10, 20 y 30 minutos), en cada día de simulación y para cada tipo de enmienda, obteniendo una regresión curvilínea. Se determinaron diferencias estadísticas ( $\alpha = 0.05$ ) entre los parámetros de las regresiones (incremento e intercepto) de cada tipo de enmienda, en cada intervalo de tiempo en cada día y entre días. Se determinó el efecto de la MO y su interacción con la prueba de suelo, sobre la concentración de DP y TP en la escorrentía.

Las diferencias estadísticas o análisis de varianza (ANAVA) fueron determinadas empleando el método de comparación de Tukey para un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 0.05. Se empleó para este procedimiento el software INFOSTAT 2.0 (Universidad de Córdoba, Argentina). La correlación entre variables fue estimada usando los modelos Curve Expert 1.3. (Microsoft

Corporation, USA) y SigmaPlot 6.1. (SPSS,USA). El coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y la prueba estadística de significancia ( $\alpha = 0.01$ ) fueron determinados para cada variable dentro de cada regresión.

Los anteriores procedimientos estadísticos se desarrollan partiendo de las siguientes hipótesis:

- La concentración de P en la esorrentía aumenta con el incremento en la concentración de P en el suelo.
- La fuente de enmienda de P aplicada al suelo incide en la concentración de P en la esorrentía, para similares niveles de P en el suelo.
- El incremento en la humedad antecedente del suelo y en la duración de un evento de esorrentía son factores que reducen la concentración de P en la esorrentía desde un suelo con un nivel específico de P.
- El contenido de materia orgánica del suelo incide en la concentración de P en la esorrentía desde un suelo con un nivel específico de P.

## 3.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.2.1. Generalidades

La fuente de agua para cada simulación fue una llave de registro con flujo y presión aproximados de  $30 \text{ L min}^{-1}$  y  $1.19 \text{ kg cm}^{-2}$  ( $17.5 \text{ lbf pg}^{-2}$ ), respectivamente. De acuerdo con la regresión cuadrática ( $R^2=0.92$ ) generada en la calibración del equipo de simulación, una intensidad promedio de  $70 \text{ mm hr}^{-1}$  se obtuvo con una presión correspondiente de  $0.17 \text{ kg cm}^{-2}$  ( $2.46 \text{ lbf pg}^{-2}$ ) (Figura 3.1). La distribución del agua sobre las parcelas por parte de la boquilla presentó una uniformidad promedio del 81% (Anexo B).

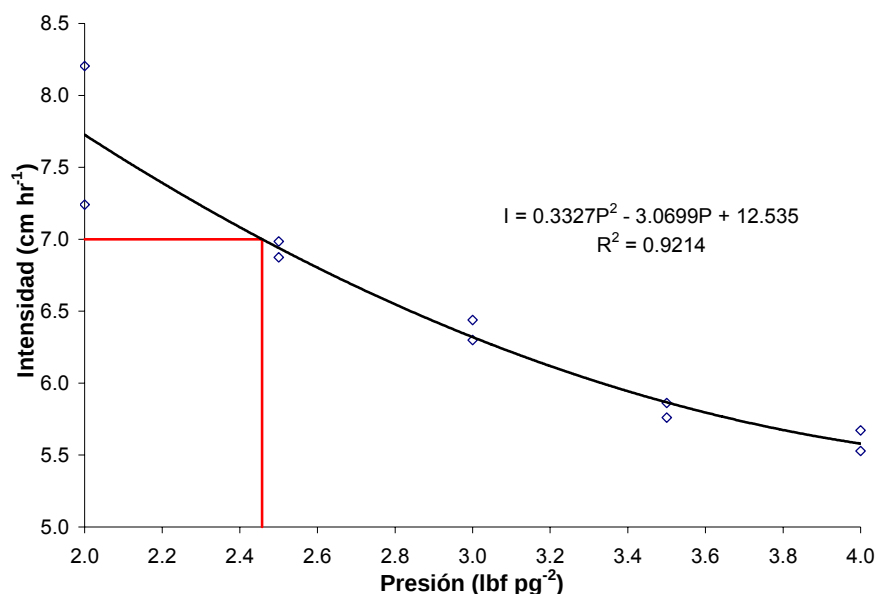


Figura 3.1. Curva de calibración presión - intensidad para el simulador de lluvia a una altura de boquilla de 3m.

### 3.2.2. Caracterización del suelo

Las muestras de suelo presentaron textura arcillosa. Las fracciones texturales no presentaron diferencia ( $\alpha=0.05$ ) al comparar las muestras

agrupadas por su nivel de susceptibilidad a la pérdida de P (Tablas 3.1 y 3.2). El contenido de materia orgánica (MO) de las muestras fue alto y fluctuó entre 4.2 y 6.1%, presentando un valor promedio de 5.5% para predios enmendados con gallinaza (GL), 5.0% para predios enmendados con superfosfato triple (SFT) y 4.7% para los predios testigo (T). Estadísticamente se observó un efecto sobre el contenido de MO en el suelo ocasionado por la fuente de enmienda aplicada. Las muestras presentaron una acidez moderada a ligeramente ácida con un pH promedio de 6.05, 5.66 y 6.57 para predios T, con enmienda de SFT y GL respectivamente.

Tabla 3.1. Caracterización de las muestras de suelo agrupadas por su nivel de susceptibilidad Olsen a la pérdida de fósforo.

| Nivel de<br>susceptibilidad<br>a la pérdida de<br>P | Textura <sup>1</sup> |    |    | MO<br>(%) |      | pH      |        | CO<br>(%) |      |
|-----------------------------------------------------|----------------------|----|----|-----------|------|---------|--------|-----------|------|
|                                                     | A                    | L  | Ar | GL        | SFT  | GL      | SFT    | GL        | SFT  |
| Bajo                                                | 33                   | 24 | 43 | 4.63 a    | 4.66 | 6.03 a  | 6.05 b | 2.07 a    | 2.08 |
| Medio                                               | 32                   | 27 | 41 | 5.37 b*   | 4.90 | 5.83 a  | 5.59 b | 2.40 b*   | 2.19 |
| Alto                                                | 30                   | 26 | 42 | 5.64 b*   | 4.94 | 6.98 b* | 5.19 a | 2.52 b*   | 2.20 |
| Muy Alto                                            | 34                   | 23 | 43 | 5.79 b    | -    | 7.34 c  | -      | 2.59 b    | -    |
| Ext. Alto                                           | 26                   | 22 | 42 | -         | 5.27 | -       | 6.35   | -         | 2.35 |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentaron diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) entre niveles de susceptibilidad. Valores seguidos de \* en una fila presentaron diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) entre tratamiento de enmienda. <sup>1</sup>La diferencia presentada en el pH del suelo corresponde a la categorización de acidez. (A) arena, (L) Limo, (Ar) Arcilla, (MO) materia orgánica, (CO) carbono orgánico.

Tabla 3.2. Caracterización de las muestras de suelo agrupadas por su nivel de susceptibilidad Bray a la pérdida de fósforo.

| Nivel de susceptibilidad a la pérdida de P | Textura <sup>1</sup> |    |    | MO (%) |      | pH      |        | CO (%) |      |
|--------------------------------------------|----------------------|----|----|--------|------|---------|--------|--------|------|
|                                            | A                    | L  | Ar | GL     | SFT  | GL      | SFT    | GL     | SFT  |
| Bajo                                       | 32                   | 25 | 43 | 4.96   | 4.69 | 5.90 a  | 5.86 b | 2.21*  | 2.09 |
| Medio                                      | 32                   | 27 | 41 | 6.12*  | 5.15 | 6.47 b* | 5.78 b | 2.73*  | 2.30 |
| Alto                                       | 32                   | 26 | 42 | 5.28*  | 4.94 | 6.91 c* | 5.19 a | 2.36*  | 2.20 |
| Muy Alto                                   | 39                   | 21 | 40 | 5.84   | -    | 7.27 c  | -      | 2.61   | -    |
| Ext. Alto                                  | 33                   | 23 | 44 | 5.72*  | 5.27 | 7.38 d* | 6.35 c | 2.56*  | 2.35 |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentaron diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) entre niveles de susceptibilidad. Valores seguidos de \* en una fila presentaron diferencia significativa ( $\alpha=0.05$ ) entre tratamiento de enmienda. <sup>1</sup>La diferencia presentada en el pH del suelo corresponde a la categorización de acidez. (A) arena, (L) Limo, (Ar) Arcilla, (MO) materia orgánica, (CO) carbono orgánico.

La prueba de suelo Olsen presentó valores entre 0.02 y 315 mg kg<sup>-1</sup> para los predios enmendados con SFT y entre 0.02 y 153 mg kg<sup>-1</sup>, para los predios enmendados con GL. La prueba de suelo Bray I presentó valores entre 0.01 y 350 mg kg<sup>-1</sup> y entre 0.02 y 245 mg kg<sup>-1</sup> para los predios enmendados con SFT y GL, respectivamente. El 35% y el 40% de las muestras provenientes de predios con enmienda de GL y SFT, respectivamente, alcanzaron valores de las pruebas Olsen y Bray I que superaron el nivel de alto potencial de pérdida de P a través de la esorrentía. Todas las muestras de los predios T presentaron niveles de la prueba de suelo con bajo potencial de pérdida de P. La categorización usada fue propuesta por Sotomayor et al. (2004) (Figuras 3.2 y 3.3).

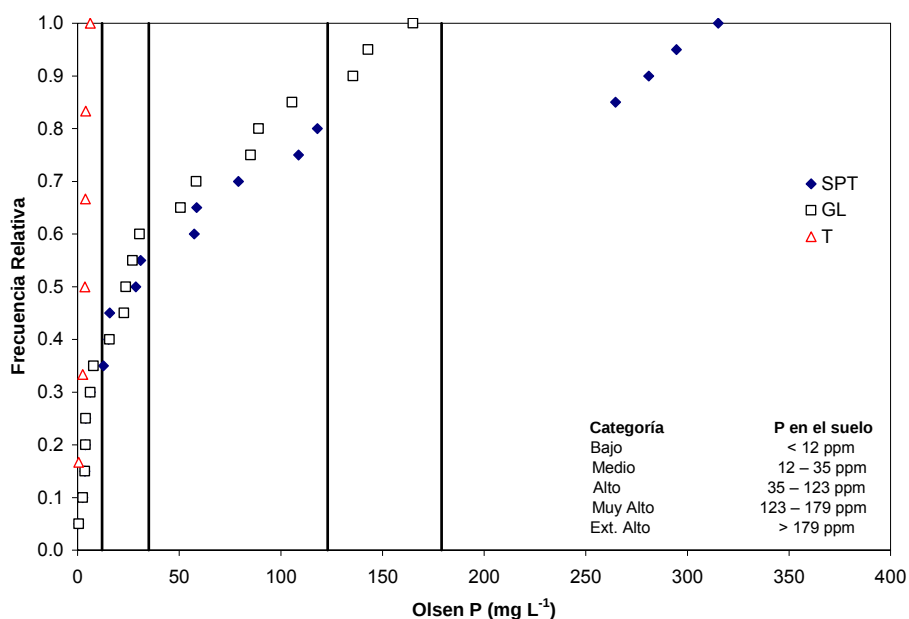


Figura 3.2. Distribución relativa del valor de la prueba Olsen de P del suelo, para predios bajo dos tipos de enmienda de acuerdo con su susceptibilidad a la pérdida de P en la escorrentía.

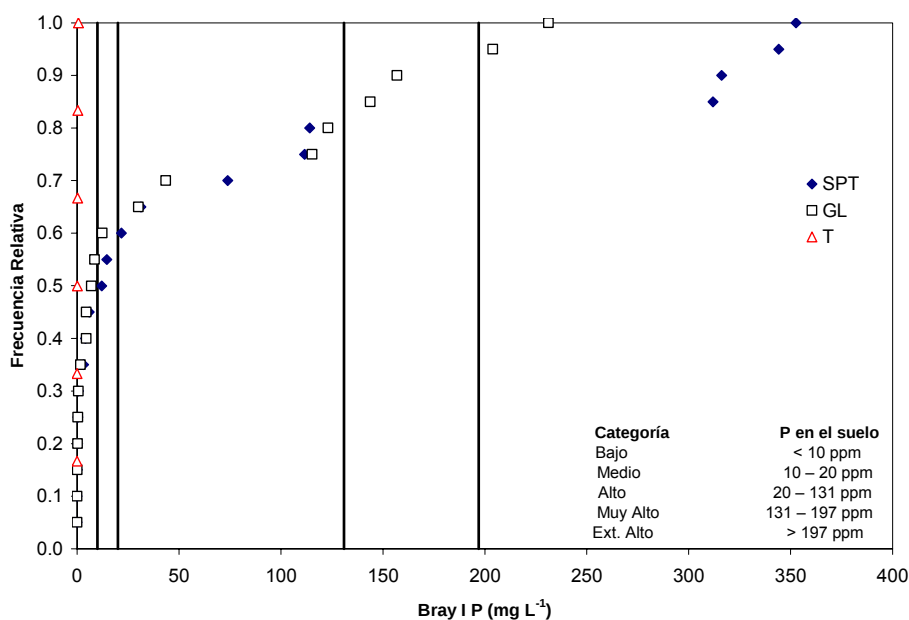


Figura 3.3. Distribución relativa del valor de la prueba de P del suelo Bray, para predios bajo dos tipos de enmienda de acuerdo con su susceptibilidad a la pérdida de P en la escorrentía.

Correlaciones de tipo lineal estadísticamente diferentes ( $\alpha=0.05$ ) describieron la relación entre la extracción de P del suelo por el método Olsen y por el método Bray I, en los predios enmendados (Figura 3.4). Una mayor tasa de incremento lineal en la correlación fue obtenida en predios enmendados con GL. Esta situación puede estar ligada al incremento en el pH, observado con el aumento en el valor de la prueba de suelo en predios con enmienda orgánica (Figuras 3.5). Este incremento en el pH es atribuido a la entrada de calcio y a efectos de amortiguamiento (buffering), ocasionados por la adición de bicarbonatos y ácidos orgánicos con grupos carboxilos e hidroxilofenoles presentes en la gallinaza (Sharpley y Moyer, 2000). O'Hallorans et al. (1997) describieron que junto al incremento en el pH del suelo en predios enmendados con diferentes niveles de aplicación de gallinaza, se observó una reducción proporcional en la concentración de aluminio (Al) intercambiable y un decrecimiento en la saturación de Al. Hue (1992) describe que esta reducción de puede ser posible por la formación de complejos quelatantes de Al y Fe y/o por la formación de pares iónicos no tóxicos para la planta, procedentes de reacciones entre aniones orgánicos producidos por la gallinaza y óxidos de Fe y Al del suelo y que la adsorción por el suelo de estos aniones permite la liberación iones  $\text{OH}^-$  y un cambio en el pH.

En los predios enmendados con SFT cuyo nivel en la prueba de P del es categorizado desde bajo hasta alto, la acidez aumenta desde ligeramente ácido a fuertemente ácido. La aplicación de una alta dosis de SFT (900 y 1200 kg P  $\text{ha}^{-1}$ ) generó un incremento en la concentración de P en el suelo por encima de

250 mg P kg<sup>-1</sup> suelo. El valor del pH asociado a estos casos se redujo con el incremento en el nivel de la prueba de suelo desde una reacción neutra a una de moderada acidez (Figura 3.6). Posiblemente la alta cantidad de Ca y H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> aplicado con la enmienda para alcanzar altos niveles de P disponible en el suelo, permitieron la formación y precipitación de fosfato cálcico y la liberación de iones de H<sup>+</sup> a la solución del suelo reduciendo el pH.

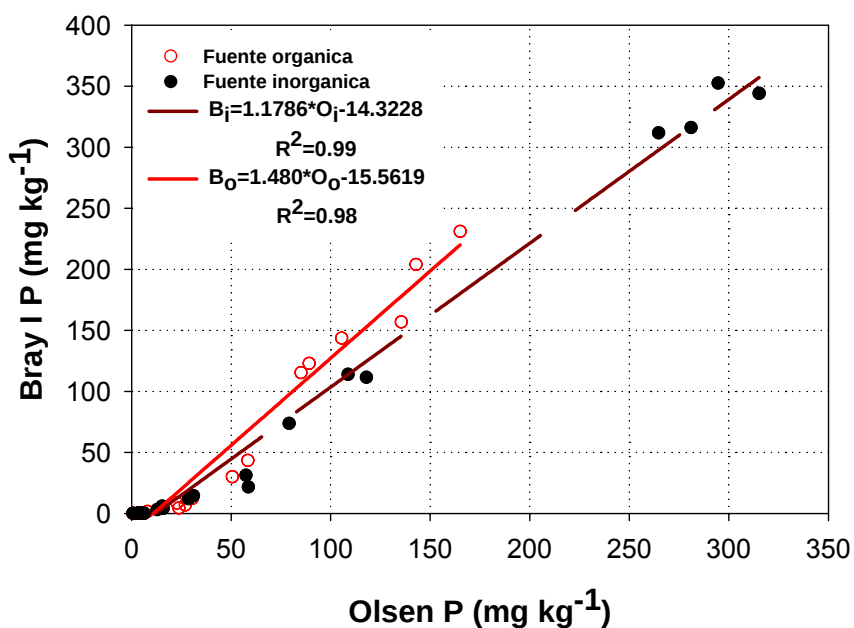


Figura 3.4. Relación entre los métodos de extracción Olsen y Bray I, para determinar la prueba de P en predios enmendados con gallinaza y superfosfato triple.

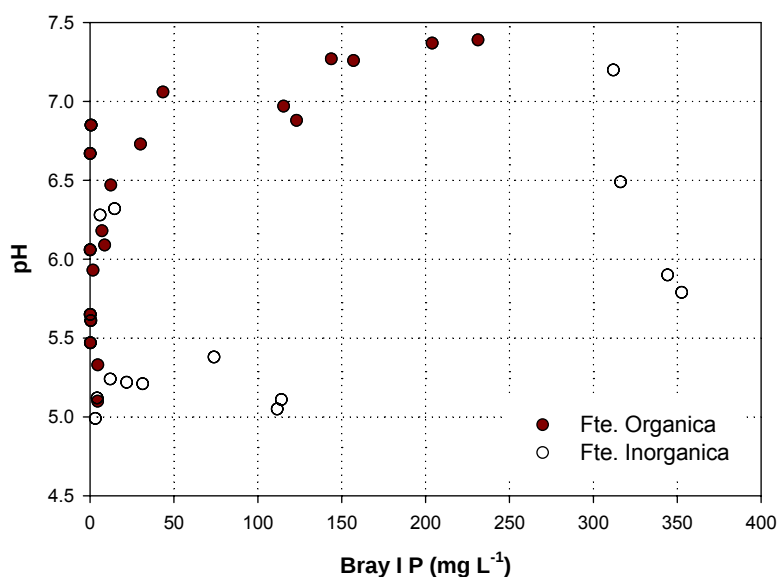


Figura 3.5. Variación en el pH del suelo para diferentes niveles en las pruebas de P Bray I bajo dos fuentes de enmienda de P.

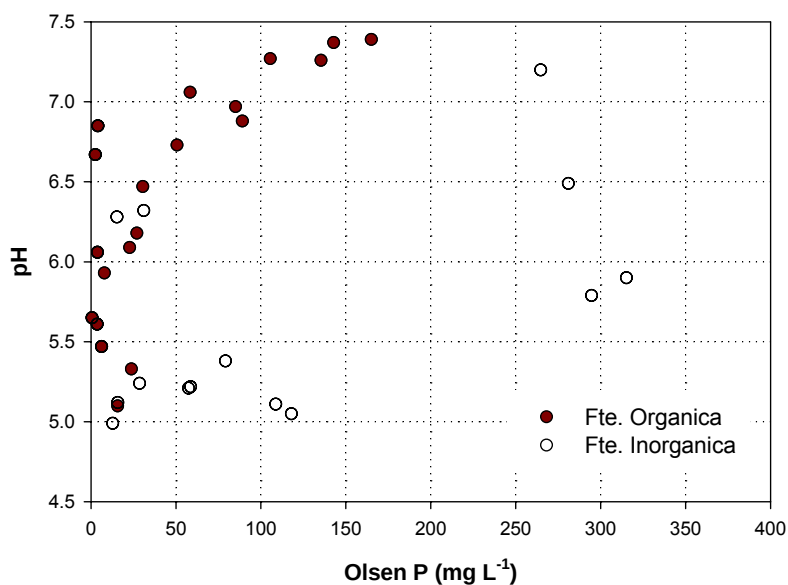


Figura 3.6. Variación en el pH del suelo para diferentes niveles en las pruebas de P Olsen bajo dos fuentes de enmienda de P.

### 3.2.3. Comportamiento del flujo superficial

La pendiente de los predios estuvo entre 15 y 27%, con un promedio de 15.7, 20.1 y 21.0% para las áreas T, GL y SFT, respectivamente. Los predios

con menor pendiente correspondieron a aquellos cuya prueba de suelo describe la mayor susceptibilidad a la pérdida de P. El grado de cobertura de la superficie del suelo presentó valores entre 42.9 y 93.3%. El valor promedio de este parámetro para los predios con enmienda GL y SFT fueron de 67.0 y 72.1%, respectivamente, sin presentar diferencia significativa entre predios con diferente fuente de enmienda, ni entre niveles de susceptibilidad a la pérdida de P.

El contenido de humedad volumétrica del suelo ( $\Theta$ ) incrementó significativamente ( $\alpha=0.05$ ) de 36.2 a 40.4% del primer al segundo día de simulación. El valor de  $\Theta$  no se afectó por el tipo de enmienda, ni presentó interacción alguna por efecto de la fuente de enmienda o del día de simulación (Tabla 3.3). El tiempo de inicio de la escorrentía fue menor en el segundo día de simulación. Solamente en el primer día, los predios T presentaron diferencia significativa con los predios enmendados, situación generada por el efecto de un evento cuyo valor de  $\Theta$  fue de 27%, alcanzando el inicio del flujo solamente después de 17 minutos de simulación. Este mismo grupo es el único en tener un efecto de día de simulación sobre la respuesta del flujo (Tabla 3.3). Bajo las condiciones descritas, una relación curvilínea decreciente ( $R^2=0.85$ ) entre  $\Theta$  y el tiempo de respuesta al flujo fue encontrada (Figura 3.7). El valor de  $\Theta$  influyó sobre la respuesta hidrológica (E/P) del suelo, la lámina de escorrentía y el flujo (Figura 3.8) que ocurren en un evento de lluvia específico; sin embargo, esta variación no fue estadísticamente significativa. El valor de la relación E/P

encontrada, es consistente con la observada en estudios bajo condiciones de lluvia natural y características topográficas semejantes (Gilley y Risse, 2000).

Tabla 3.3. Parámetros hidrológicos generados a una intensidad de 70 mm h<sup>-1</sup>.

| Parámetro                               | Día 1    |         |         | Día 2 |       |       |
|-----------------------------------------|----------|---------|---------|-------|-------|-------|
|                                         | T        | GL      | SFT     | T     | GL    | SFT   |
| Tiempo de respuesta (min)               | 9.43 b*  | 4.92 a  | 4.38 a  | 4.03  | 3.33  | 2.80  |
| Duración del evento (min)               | 41.60 b* | 34.92 a | 34.38 a | 34.03 | 33.33 | 32.80 |
| Escorrentía (E) (mm)                    | 21.99    | 20.27   | 20.29   | 25.96 | 25.48 | 28.72 |
| Flujo prom. (Q) (mm min <sup>-1</sup> ) | 0.73     | 0.68    | 0.68    | 0.87  | 0.85  | 0.96  |
| ( $\Theta$ ) (%)                        | 35.13*   | 36.14*  | 36.26*  | 40.28 | 40.77 | 40.54 |
| Relación E/P (%)                        | 47.06    | 50.15   | 50.75   | 65.23 | 62.93 | 75.25 |

Valores seguidos de la misma letra en una fila no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de la fuente de enmienda. Valores seguidos de \* para una misma fuente de enmienda presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto del día de simulación.

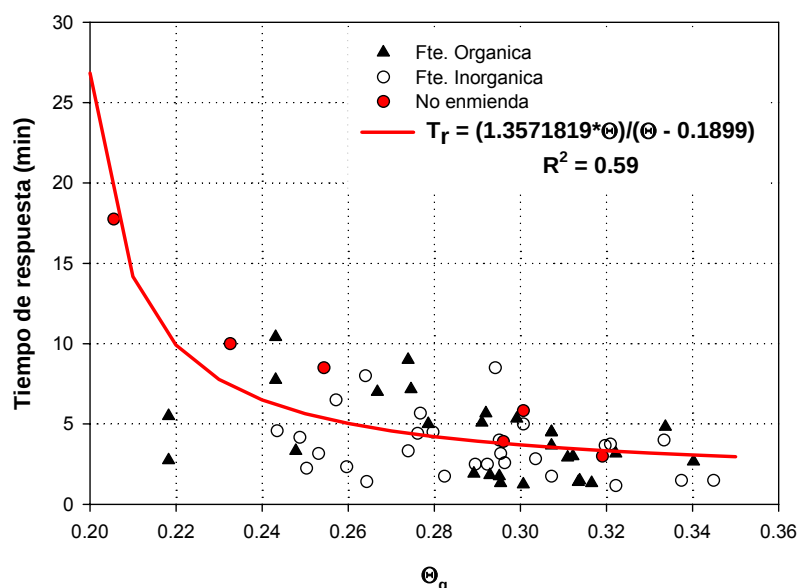
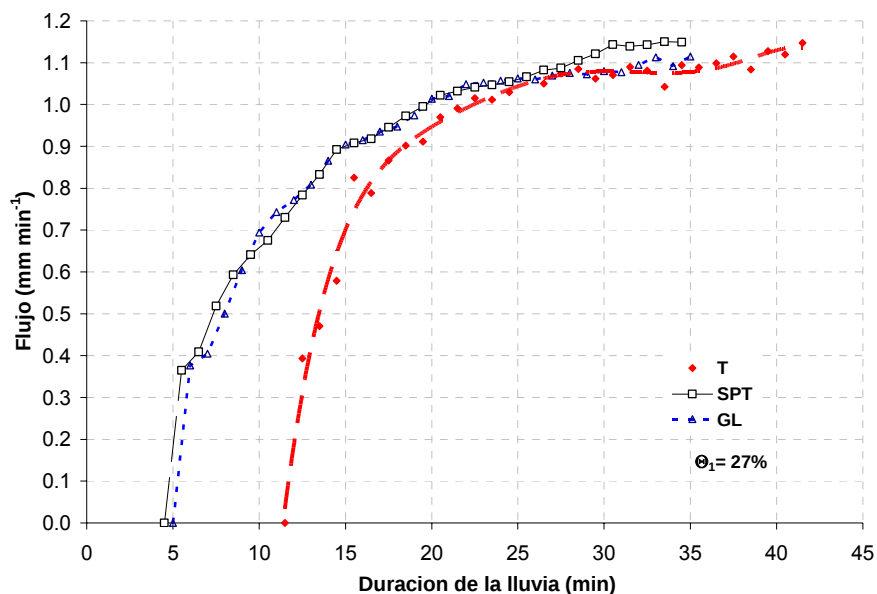


Figura 3.7. Relación entre el contenido de humedad antecedente del suelo y el tiempo de respuesta del flujo bajo una intensidad de 70 mm hr<sup>-1</sup>.

A.



B.

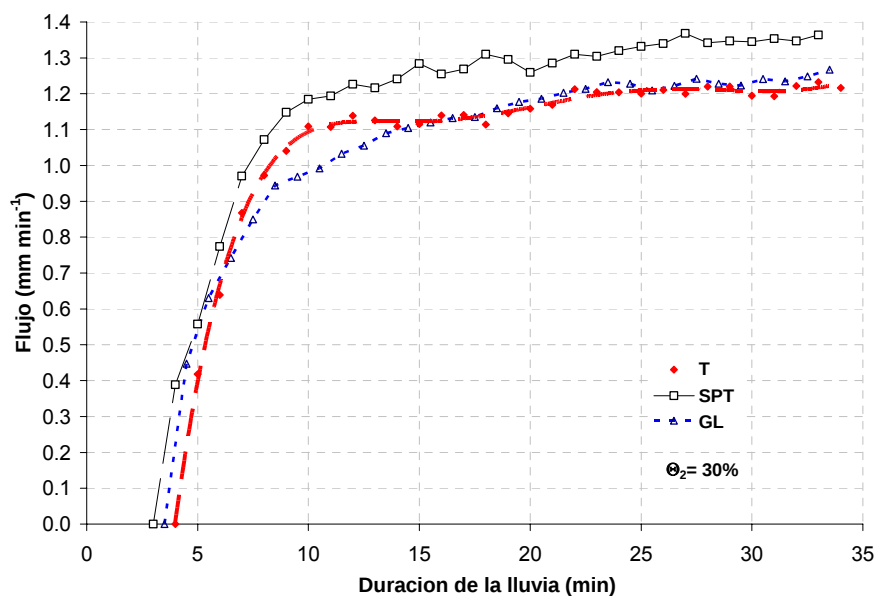


Figura 3.8. Hidrograma de escorrentía en un Ultisol bajo 30 min de simulación de lluvia a una intensidad de 70 mm/hr en el día 1 (A) y en el Día 2 (B).

### 3.2.4. Movimiento de fósforo

La concentración de TP, DP, PP\* y SS en la escorrentía no presentó diferencia significativa por el efecto de día para ninguna de las condiciones de

enmienda evaluadas (Tabla 3.4). Las parcelas GL presentaron un mayor valor no significativo con las parcelas SFT, en el valor promedio de la concentración de las diferentes fracciones de P en la esorrentía. En el segundo día de simulación los predios enmendados con GL presentaron el mayor valor para las concentraciones de TP y PP\*, en comparación con los valores obtenidos para los predios T.

Tabla 3.4. Valor promedio de la concentración de P y sedimentos en la esorrentía.

| Parámetro                 | Fuente de enmienda |        |        |
|---------------------------|--------------------|--------|--------|
|                           | T                  | GL     | SFT    |
| DP (mg L <sup>-1</sup> )  | 0.08 a             | 1.06 b | 0.84 b |
| TP (mg L <sup>-1</sup> )  | 0.36 a             | 2.54 b | 1.70 b |
| PP* (mg L <sup>-1</sup> ) | 0.27 a             | 1.56 b | 1.10 b |
| SS (g L <sup>-1</sup> )   | 0.27 a             | 0.65 b | 0.67 b |

Valores seguidos de la misma letra en una fila no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de la fuente de enmienda.

La concentración de TP, DP, PP\* y SS en la esorrentía aumentó con el incremento en la prueba de P del suelo, presentando generalmente diferencia entre el menor y el mayor nivel de la susceptibilidad del suelo a la pérdida de P (Tablas 3.5 a 3.8). Se evidenció un leve efecto debido al tipo de enmienda para un mismo nivel de susceptibilidad en la concentración de las tres fracciones de P, desde el nivel de alta susceptibilidad a la pérdida de P, siendo mayores tales concentraciones en los predios bajo enmienda GL. La concentración de SS presentó diferencia por el efecto de la fuente de enmienda, solamente en valores

de la prueba de P categorizadas en el máximo nivel de susceptibilidad a la pérdida de P.

La fracción DP representó en promedio el 23, 32 y 35% de la concentración de TP en la escorrentía para los predios T, SFT y GL, respectivamente. Para grupos de parcelas bajo la misma fuente de enmienda, la fracción DP/TP aumentó con el incremento en la pendiente y la reducción en el grado de cobertura de la superficie del suelo (Anexo D). La fracción de PP\* representó el 77, 65 y 68% de la concentración promedio de TP para los predios T, SFT y GL, respectivamente, siendo esta la fracción predominante en la escorrentía. Se determinó una correlación lineal entre DP y TP y entre PP\* y TP, así como el efecto de reducción de estas concentraciones generado por el incremento en el valor de  $\Theta$  (Figuras 3.9 a 3.12). La razón entre PP\* y TP fue definida en el presente estudio, como la razón de enriquecimiento de P (REP). Estadísticamente no se evidenciaron efectos por cambio en el tipo de enmienda ni por día de ocurrencia de la simulación, sobre las relaciones DP/TP y PP\*/TP (Tablas 3.9 y 3.10). Contrario a lo encontrado por Sharpley y Kleinman (2003) para suelos cubiertos con pasturas, la REP se incrementó con la concentración de SS (Figura 3.13) debido a la mínima variación en el volumen de escorrentía entre simulaciones diarias y entre parcelas.

Tabla 3.5. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Olsen, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la concentración de DP y TP en la escorrentía.

| Nivel de<br>susceptibilidad<br>a la pérdida de<br>P | TP      |                     |         |                      | DP     |                     |         |                     |
|-----------------------------------------------------|---------|---------------------|---------|----------------------|--------|---------------------|---------|---------------------|
|                                                     | Día 1   |                     | Día 2   |                      | Día 1  |                     | Día 2   |                     |
|                                                     | GL      | SFT                 | GL      | SFT                  | GL     | SFT                 | GL      | SFT                 |
| Bajo                                                | 0.46 a  | 0.41 a              | 0.35 a  | 0.30 a               | 0.11 a | 0.11 a              | 0.05 a* | 0.05 a              |
| Medio                                               | 1.06 a  | 1.03 ab             | 0.37 a  | 0.64 a* <sup>‡</sup> | 0.17 a | 0.24 a              | 0.08 a  | 0.13 a              |
| Alto                                                | 2.48 ab | 1.76 b <sup>‡</sup> | 3.41 ab | 1.40 a <sup>‡</sup>  | 0.95 a | 0.55 a <sup>‡</sup> | 1.44 ab | 0.41 a <sup>‡</sup> |
| Muy Alto                                            | 4.94 b  | -                   | 6.15 b  | -                    | 2.27 b | -                   | 2.48 b  | -                   |
| Ext. Alto                                           | -       | 4.43 c              | -       | 4.37 b               | -      | 2.64 b              | -       | 2.05 b              |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de la susceptibilidad del suelo a la pérdida de P. Valores seguidos de \* para una misma fuente de enmienda en una misma fila presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto del día de simulación. Valores seguidos de <sup>‡</sup> en un mismo día presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de fuente de enmienda. – No existen parcelas para este nivel de P en el suelo.

Tabla 3.6. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Olsen, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la concentración de PP\* y SS en la escorrentía.

| Nivel de<br>susceptibilidad<br>a la pérdida de<br>P | PP*   |         |         |                     | SS    |                   |         |                     |
|-----------------------------------------------------|-------|---------|---------|---------------------|-------|-------------------|---------|---------------------|
|                                                     | Día 1 |         | Día 2   |                     | Día 1 |                   | Día 2   |                     |
|                                                     | GL    | SFT     | GL      | SFT                 | GL    | SFT               | GL      | SFT                 |
| Bajo                                                | 0.35  | 0.30 a  | 0.28 a  | 0.25 a              | 0.29  | 0.29              | 0.30 a  | 0.26 a              |
| Medio                                               | 0.89  | 0.79 ab | 0.30 ab | 0.51 a <sup>‡</sup> | 0.40  | 0.78 <sup>‡</sup> | 0.36 a  | 0.60 b <sup>‡</sup> |
| Alto                                                | 1.52  | 1.21 ab | 1.97 b  | 0.99 b <sup>‡</sup> | 0.60  | 0.64              | 0.70 ab | 0.65 b              |
| Muy Alto                                            | 2.67  | -       | 3.67 c  | -                   | 0.76  | -                 | 1.12 b  | -                   |
| Ext. Alto                                           | -     | 1.79 b  | -       | 2.33 c              | -     | 0.54*             | -       | 0.80 b              |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de la susceptibilidad del suelo a la pérdida de P. Valores seguidos de \* para una misma fuente de enmienda en una misma fila presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto del día de simulación. Valores seguidos de <sup>‡</sup> en un mismo día presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de fuente de enmienda. – No existen parcelas para este nivel de P en el suelo.

Tabla 3.7. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Bray I, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la concentración de DP y TP en la escorrentía.

| Nivel de<br>susceptibilidad<br>a la pérdida de<br>P | TP      |                     |        |                     | DP     |        |         |                     |
|-----------------------------------------------------|---------|---------------------|--------|---------------------|--------|--------|---------|---------------------|
|                                                     | Día 1   |                     | Día 2  |                     | Día 1  |        | Día 2   |                     |
|                                                     | GL      | SFT                 | GL     | SFT                 | GL     | SFT    | GL      | SFT                 |
| Bajo                                                | 0.68 a  | 0.64 a              | 0.34 a | 0.43 a              | 0.10 a | 0.14 a | 0.04 a  | 0.07 a*             |
| Medio                                               | 1.05 a  | 0.92 a              | 0.54 a | 0.58 a*             | 0.51 a | 0.33 a | 0.26 a  | 0.19 a              |
| Alto                                                | 2.33 ab | 1.76 a <sup>‡</sup> | 2.78 a | 1.40 a <sup>‡</sup> | 0.66 a | 0.55 a | 1.20 ab | 0.41 a <sup>‡</sup> |
| Muy Alto                                            | 2.47 ab | -                   | 3.61 a | -                   | 1.68 b | -      | 1.50 ab | -                   |
| Ext. Alto                                           | 6.48 b  | 4.43 b <sup>‡</sup> | 7.76 b | 4.37 b <sup>‡</sup> | 2.80 c | 2.64 b | 3.12 b  | 2.05 b <sup>‡</sup> |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de la susceptibilidad del suelo a la pérdida de P. Valores seguidos de \* para una misma fuente de enmienda en una misma fila presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto del día de simulación. Valores seguidos de <sup>‡</sup> en un mismo día presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de fuente de enmienda. – No existen parcelas para este nivel de P en el suelo.

Tabla 3.8. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Bray I, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la concentración de PP\* y SS en la escorrentía.

| Nivel de<br>susceptibilidad<br>a la pérdida de<br>P | PP* = TP - DP |                      |         |                     | SS    |                   |         |                    |
|-----------------------------------------------------|---------------|----------------------|---------|---------------------|-------|-------------------|---------|--------------------|
|                                                     | Día 1         |                      | Día 2   |                     | Día 1 |                   | Día 2   |                    |
|                                                     | GL            | SFT                  | GL      | SFT                 | GL    | SFT               | GL      | SFT                |
| Bajo                                                | 0.58          | 0.50 a               | 0.30 a  | 0.36 a              | 0.32  | 0.52              | 0.32 a  | 0.42               |
| Medio                                               | 0.54          | 0.60 ab              | 0.28 a  | 0.39 a              | 0.57  | 0.47              | 0.39 a  | 0.41               |
| Alto                                                | 1.67          | 1.21 ab <sup>‡</sup> | 2.11 b  | 0.99 b <sup>‡</sup> | 0.66  | 0.64              | 0.71 ab | 0.65               |
| Muy Alto                                            | 0.79          | -                    | 1.58 ab | -                   | 0.39  | -                 | 0.82 ab | -                  |
| Ext. Alto                                           | 3.68          | 1.79 b <sup>‡</sup>  | 4.64 c  | 2.33 c <sup>‡</sup> | 0.94  | 0.54 <sup>‡</sup> | 1.17 b  | 0.80* <sup>‡</sup> |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de la susceptibilidad del suelo a la pérdida de P. Valores seguidos de \* para una misma fuente de enmienda en una misma fila presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto del día de simulación. Valores seguidos de <sup>‡</sup> en un mismo día presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de fuente de enmienda. – No existen parcelas para este nivel de P en el suelo.

Tabla 3.9. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Olsen, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la concentración de DP/TP y PP\*/TP en la escorrentía.

| Nivel de<br>susceptibilidad<br>a la pérdida de<br>P | DP/TP |         |       |         | PP*/TP |         |       |         |
|-----------------------------------------------------|-------|---------|-------|---------|--------|---------|-------|---------|
|                                                     | Día 1 |         | Día 2 |         | Día 1  |         | Día 2 |         |
|                                                     | GL    | SFT     | GL    | SFT     | GL     | SFT     | GL    | SFT     |
| Bajo                                                | 0.26  | 0.28 ab | 0.16  | 0.18 a  | 0.74   | 0.72 ab | 0.84  | 0.82 b  |
| Medio                                               | 0.29  | 0.27 a  | 0.18  | 0.21 ab | 0.71   | 0.73 b  | 0.82  | 0.79 ab |
| Alto                                                | 0.42  | 0.37 ab | 0.30  | 0.27 ab | 0.58   | 0.63 ab | 0.70  | 0.73 ab |
| Muy Alto                                            | 0.56  | -       | 0.41  | -       | 0.44   | -       | 0.59  | -       |
| Ext. Alto                                           | -     | 0.59 b  | -     | 0.45 b  | -      | 0.41 a  | -     | 0.82 b  |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de la susceptibilidad del suelo a la pérdida de P. – No existen parcelas para este nivel de P en el suelo.

Tabla 3.10. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Bray I, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la concentración de DP/TP y PP\*/TP en la escorrentía.

| Nivel de<br>susceptibilidad<br>a la pérdida de<br>P | DP/TP |         |        |         | PP*/TP |         |       |         |
|-----------------------------------------------------|-------|---------|--------|---------|--------|---------|-------|---------|
|                                                     | Día 1 |         | Día 2  |         | Día 1  |         | Día 2 |         |
|                                                     | GL    | SFT     | GL     | SFT     | GL     | SFT     | GL    | SFT     |
| Bajo                                                | 0.25  | 0.25 a  | 0.14   | 0.16 a  | 0.75   | 0.75 b  | 0.86  | 0.84 b  |
| Medio                                               | 0.49  | 0.37 ab | 0.48   | 0.33 ab | 0.51   | 0.63 ab | 0.52  | 0.67 ab |
| Alto                                                | 0.35  | 0.37 ab | 0.26   | 0.27 ab | 0.65   | 0.63 ab | 0.74  | 0.73 ab |
| Muy Alto                                            | 0.67  | -       | 0.43 * | -       | 0.33   | -       | 0.57* | -       |
| Ext. Alto                                           | 0.51  | 0.59 b  | 0.42   | 0.45 b  | 0.49   | 0.41    | 0.58  | 0.55 a  |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de la susceptibilidad del suelo a la pérdida de P. Valores seguidos de \* para una misma fuente de enmienda en una misma fila presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto del día de simulación. – No existen parcelas para este nivel de P en el suelo.

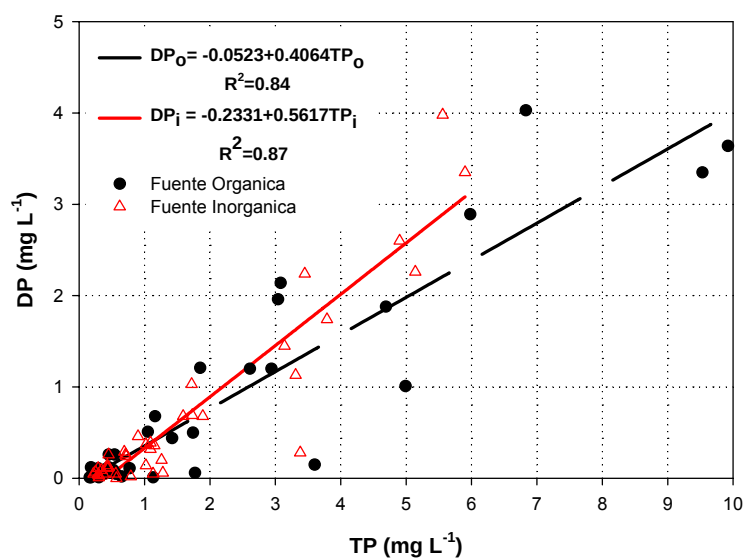


Figura 3.9. Relación entre la concentración de DP y TP en la escorrentía.

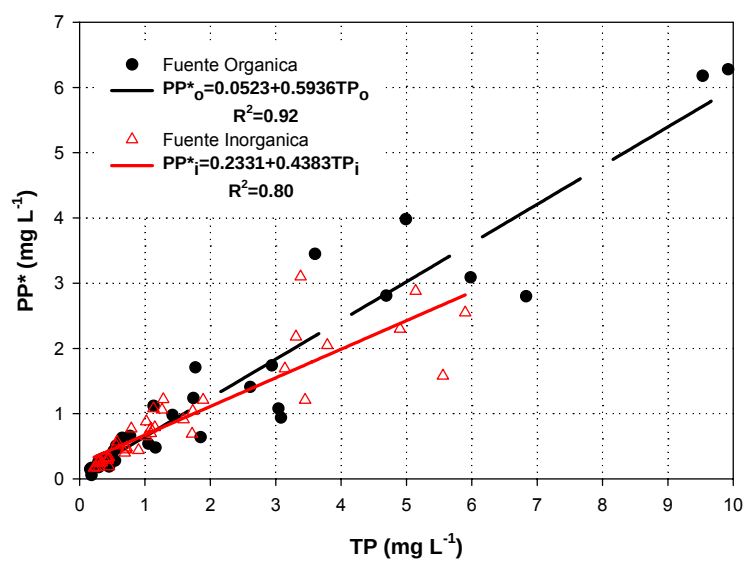


Figura 3.10. Relación entre la concentración de PP\* y TP en la escorrentía.

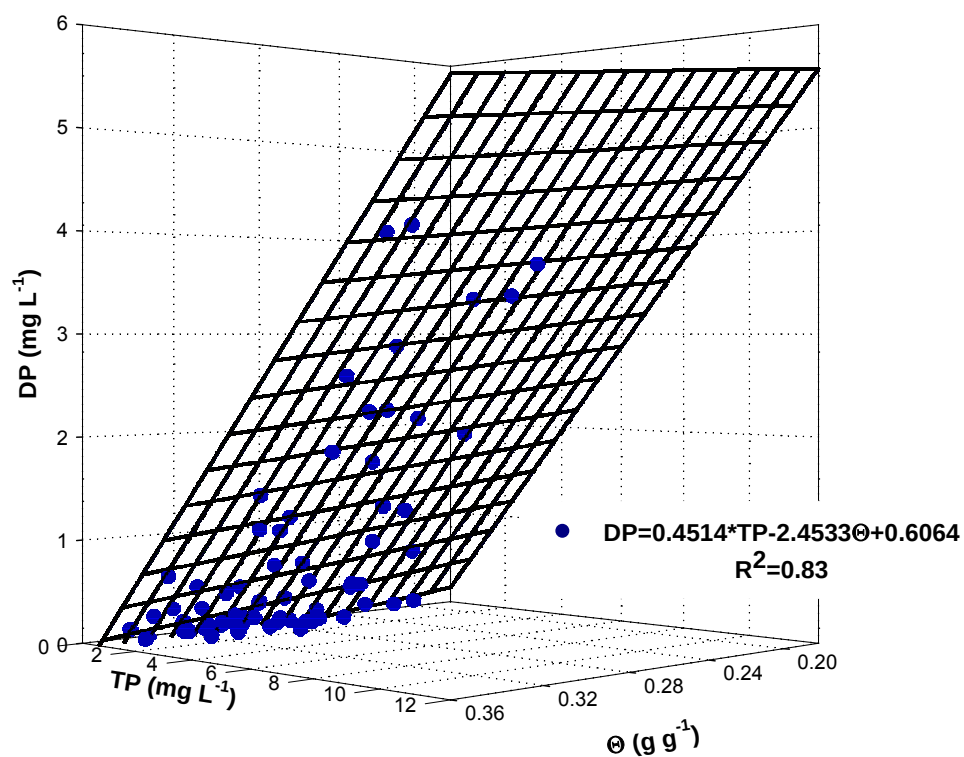


Figura 3.11. Correlación entre DP, TP y Θ.

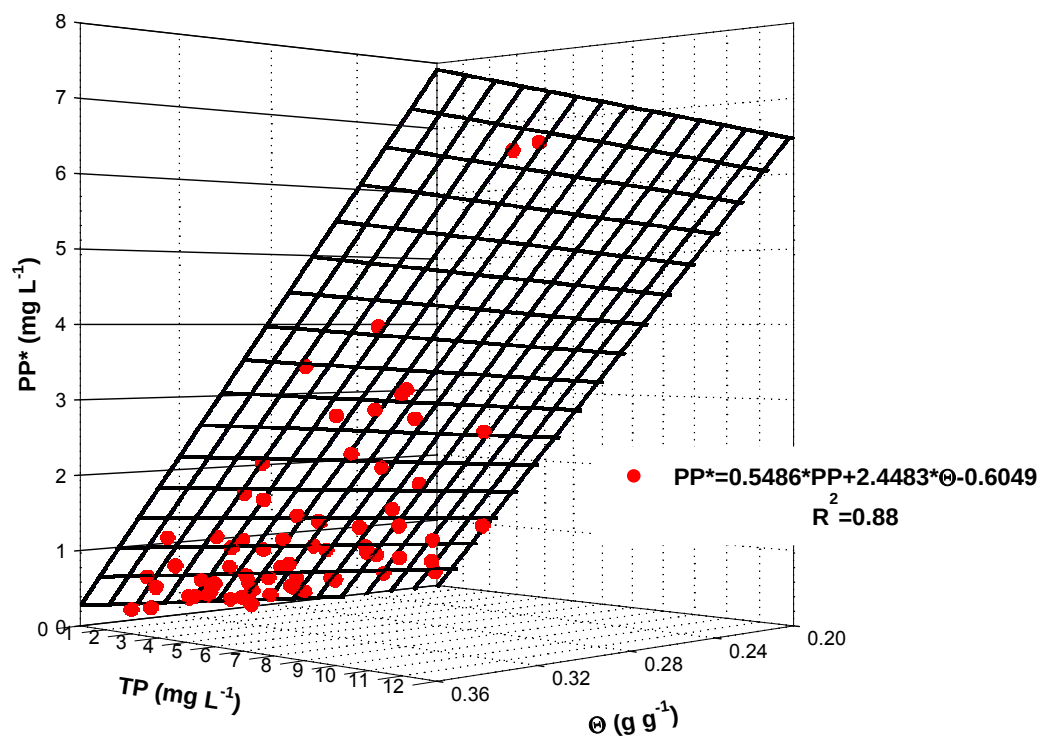


Figura 3.12. Correlación entre PP\*, TP y Θ.

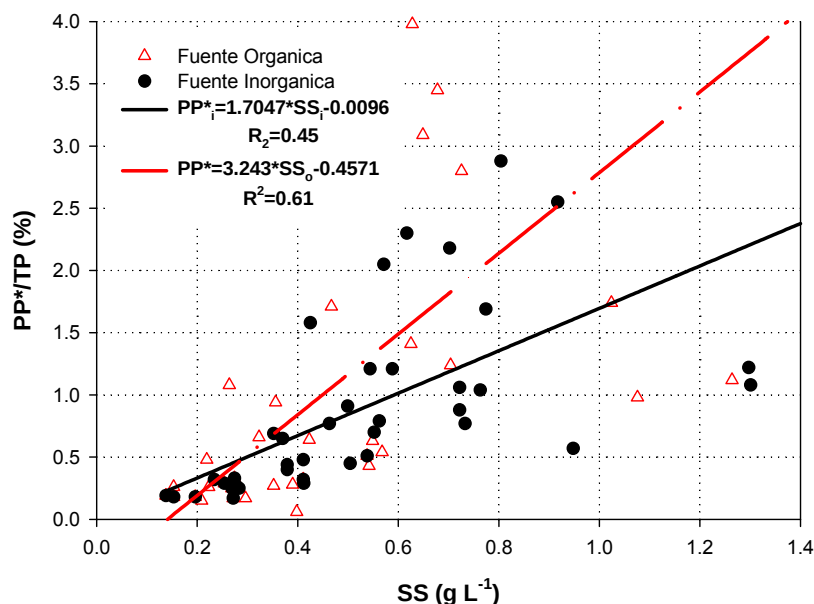


Figura 3.13. Relación entre la concentración de SS y la REP en la escorrentía.

### 3.2.5. Masa de sedimentos y de fósforo en el flujo superficial

La descarga de P en la escorrentía se incrementó con la prueba de P del suelo y presentó diferencia significativa debido a la fuente de enmienda. Efectos de categorización por la susceptibilidad del suelo a la pérdida de P sobre la descarga de P en la escorrentía, se observaron para los predios con aplicación de enmienda sólo cuando la prueba de P alcanzó los niveles de muy alto y extremadamente alto (Tablas 3.11 y 3.12).

La masa total de SS aumentó con el valor de la lámina de escorrentía acumulada (Figura 3.14), presentando valores promedio de 133.44, 129.9 y 71.52 kg ha<sup>-1</sup> en el primer día y 178.96, 189.48, 69.33 kg ha<sup>-1</sup> en el segundo, para los predios GL, SFT y T, respectivamente. No se encontró diferencia significativa entre días, ni entre tipo de fuente debido a la poca variabilidad en las condiciones hidrológicas del suelo entre simulaciones (Tablas 3.13 y 3.14).

Tabla 3.11. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Olsen, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la descarga de DP y TP en la escorrentía.

| Nivel de<br>susceptibilidad<br>a la pérdida de<br>P | TP (kg ha <sup>-1</sup> ) |                     |         |                     | DP (g ha <sup>-1</sup> ) |                     |         |                     |
|-----------------------------------------------------|---------------------------|---------------------|---------|---------------------|--------------------------|---------------------|---------|---------------------|
|                                                     | Día 1                     |                     | Día 2   |                     | Día 1                    |                     | Día 2   |                     |
|                                                     | GL                        | SFT                 | GL      | SFT                 | GL                       | SFT                 | GL      | SFT                 |
| Bajo                                                | 0.92 a                    | 0.95 a              | 0.83 a  | 0.79 a              | 0.20 a                   | 0.22 a              | 0.13 a  | 0.13 a              |
| Medio                                               | 2.84 a                    | 2.34 a              | 0.99 a  | 2.04 ab             | 0.47 a                   | 0.59 a              | 0.26 a  | 0.44 a              |
| Alto                                                | 4.98 a                    | 3.05 a <sup>‡</sup> | 7.86 ab | 3.33 b <sup>‡</sup> | 1.93 ab                  | 0.95 a <sup>‡</sup> | 3.00 ab | 0.96 a <sup>‡</sup> |
| Muy Alto                                            | 13.07 b                   | -                   | 16.85 b | -                   | 5.33 b                   | -                   | 6.52 b  | -                   |
| Ext. Alto                                           | -                         | 8.31 b              | -       | 12.59 c             | -                        | 4.94 b              | -       | 5.81b               |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de la susceptibilidad del suelo a la pérdida de P. Valores seguidos de <sup>‡</sup> en un mismo día presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de fuente de enmienda. – No existen parcelas para este nivel de P en el suelo.

Tabla 3.12. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorización Bray I, del día de simulación y de la fuente de enmienda sobre la descarga de DP y TP en la escorrentía.

| Nivel de<br>susceptibilidad<br>a la pérdida de<br>P | TP (kg ha <sup>-1</sup> ) |                     |         |                      | DP (kg ha <sup>-1</sup> ) |                     |         |                     |
|-----------------------------------------------------|---------------------------|---------------------|---------|----------------------|---------------------------|---------------------|---------|---------------------|
|                                                     | Día 1                     |                     | Día 2   |                      | Día 1                     |                     | Día 2   |                     |
|                                                     | GL                        | SFT                 | GL      | SFT                  | GL                        | SFT                 | GL      | SFT                 |
| Bajo                                                | 1.57 a                    | 1.34 a              | 0.81 a  | 1.20 a               | 0.19 a                    | 0.26 a              | 0.11 a  | 0.17 a              |
| Medio                                               | 3.33 a                    | 2.71 a              | 1.89 a  | 0.21 ab              | 1.08 ab                   | 0.95 a              | 0.91 a  | 0.69 a              |
| Alto                                                | 4.29 a                    | 3.05 a <sup>‡</sup> | 7.68 a  | 0.33 b <sup>‡</sup>  | 1.62 ab                   | 0.95 a <sup>‡</sup> | 2.86 a  | 0.96 a <sup>‡</sup> |
| Muy Alto                                            | 6.09 a                    | -                   | 7.90 a  | -                    | 4.14 ab                   | -                   | 3.33 ab | -                   |
| Ext. Alto                                           | 17.36 b                   | 8.31 b <sup>‡</sup> | 21.43 b | 12.59 c <sup>‡</sup> | 6.52 b                    | 4.94 b <sup>‡</sup> | 8,21 b  | 5.81 b <sup>‡</sup> |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de la susceptibilidad del suelo a la pérdida de P. Valores seguidos de <sup>‡</sup> en un mismo día presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de fuente de enmienda. – No existen parcelas para este nivel de P en el suelo.

Tabla 3.13. Efecto del nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P según categorizaciones Olsen y Bray I y efecto de la fuente de enmienda sobre la descarga de SS en la escorrentía.

| Nivel de<br>susceptibilidad<br>a la pérdida de<br>P | SS (kg ha <sup>-1</sup> ) |                     |          |                     |
|-----------------------------------------------------|---------------------------|---------------------|----------|---------------------|
|                                                     | Olsen                     |                     | Bray I   |                     |
|                                                     | GL                        | SFT                 | GL       | SFT                 |
| Bajo                                                | 69.07 a                   | 70.43               | 76.59 a  | 114.09              |
| Medio                                               | 96.09 a                   | 177.97              | 158.45 b | 142.77              |
| Alto                                                | 167.81 ab                 | 132.92              | 175.60 b | 132.92              |
| Muy Alto                                            | 268.77 b                  | -                   | 160.80 b | -                   |
| Ext. Alto                                           | -                         | 170.33 <sup>‡</sup> | 310.68 c | 170.33 <sup>‡</sup> |

Valores seguidos de la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de la susceptibilidad del suelo a la pérdida de P.  
– No existen parcelas para este nivel de P en el suelo.

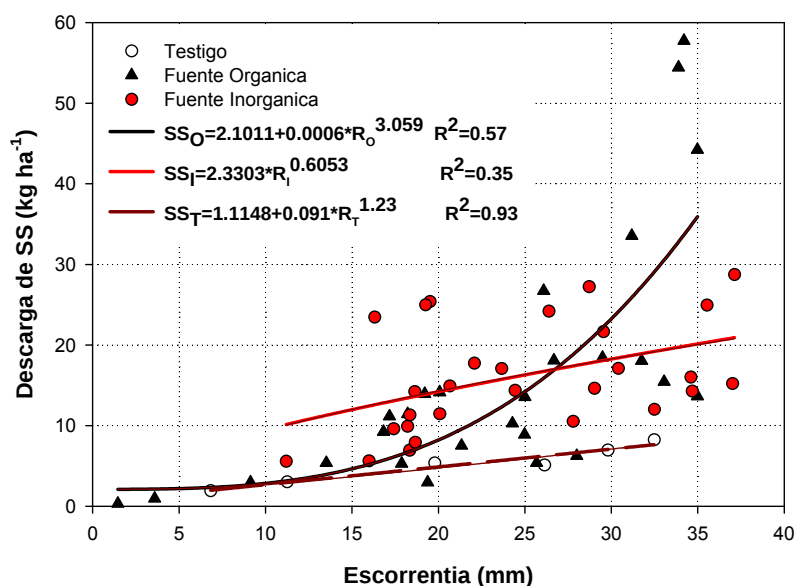


Figura 3.14. Relación entre la descarga de sedimentos y la escorrentía para predios bajo diferente enmienda.

### 3.2.6. Relación entre la prueba de P en el suelo y la concentración de P en la escorrentía.

La concentración de DP y TP en la escorrentía se incrementó con la prueba de P en el suelo (Olsen y Bray I). Similares condiciones reportaron

Sharpley y Smith (1989), Sharpley et al. (1996), Pote et al. (1999b), Sharpley y Kleinman (2003), Andraski y Bundy (2003), Andraski et al. (2003), Tabbara (2003) y Schroeder et al. 2004, entre otros autores. Se encontró una tendencia de correlación de tipo exponencial consistente con la expuesta por Sharpley et al. (2001) y por Guidry et al. (2004). El valor de  $R^2$  y la ecuación que describe cada correlación son dados en las Tablas 3.14 y 3.15 para DP. El incremento de DP y TP con la prueba de suelo, ocurre para los tres tiempos de duración de la escorrentía analizados (10, 20 y 30 minutos) y en los dos días de aplicación de lluvia.

Tabla 3.14. Parámetros de regresión entre la concentración de DP en la escorrentía y la prueba de suelo en predios GL.

| Día 1                       |                                     |                | Día 2                               |                |  |
|-----------------------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|--|
| Tiempo de escorrentía (min) | Ecuación                            | R <sup>2</sup> | Ecuación                            | R <sup>2</sup> |  |
| 10                          | DP = 0.3556*1.0178 <sup>Olsen</sup> | 0.59           | DP = 0.2989*1.0171 <sup>Olsen</sup> | 0.68           |  |
|                             | DP = 0.4233*1.0126 <sup>Bray</sup>  | 0.69           | DP = 0.3843*1.0113 <sup>Bray</sup>  | 0.75           |  |
| 20                          | DP = 0.3577*1.0155 <sup>Olsen</sup> | 0.54           | DP = 0.3093*1.0158 <sup>Olsen</sup> | 0.62           |  |
|                             | DP = 0.4070*1.0113 <sup>Bray</sup>  | 0.66           | DP = 0.3852*1.0106 <sup>Bray</sup>  | 0.69           |  |
| 30                          | DP = 0.2486*1.0149 <sup>Olsen</sup> | 0.69           | DP = 0.2951*1.0149 <sup>Olsen</sup> | 0.57           |  |
|                             | DP = 0.2956*1.0101 <sup>Bray</sup>  | 0.74           | DP = 0.3573*1.0101 <sup>Bray</sup>  | 0.63           |  |

Tabla 3.15. Parámetros de regresión entre la concentración de DP en la escorrentía y la prueba de suelo en predios SFT.

| Tiempo de escorrentía (min) | Día 1                               |                | Día 2                               |                |
|-----------------------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|
|                             | Ecuación                            | R <sup>2</sup> | Ecuación                            | R <sup>2</sup> |
| 10                          | DP = 0.3121*1.0086 <sup>Olsen</sup> | 0.85           | DP = 0.2141*1.0086 <sup>Olsen</sup> | 0.80           |
|                             | DP = 0.227*1.0086 <sup>Bray</sup>   | 0.91           | DP = 0.1320*1.0091 <sup>Bray</sup>  | 0.85           |
| 20                          | DP = 0.2214*1.0092 <sup>Olsen</sup> | 0.85           | DP = 0.1687*1.0091 <sup>Olsen</sup> | 0.78           |
|                             | DP = 0.1030*1.0105 <sup>Bray</sup>  | 0.91           | DP = 0.0023*1.0209 <sup>Bray</sup>  | 0.89           |
| 30                          | DP = 0.2251*1.0085 <sup>Olsen</sup> | 0.88           | DP = 0.1279*1.0097 <sup>Olsen</sup> | 0.84           |
|                             | DP = 0.1974*1.0079 <sup>Bray</sup>  | 0.92           | DP = 0.0012*1.0226 <sup>Bray</sup>  | 0.91           |

El valor de R<sup>2</sup> es menor para las correlaciones entre la prueba de suelo Olsen y Bray I y la concentración de DP y TP en la escorrentía, correspondientes a los predios enmendados con GL. Andraski et al. (2003), encontraron una reducción en el valor de R<sup>2</sup> para la correlación entre la prueba de suelo Bray I y la concentración de DP en la escorrentía, en predios con aplicación de gallinaza en un periodo inferior a 6 meses, en comparación con la correlación obtenida para predios con historial de aplicación en un período de tiempo mayor. En el presente estudio, la aplicación reciente de GL, pudo alterar la relación entre el nivel de P en el suelo y su aporte de P en la escorrentía. Las concentraciones de DP en GL fueron entre 1.53 y 2.06 veces mayores a las que aportó un predio con enmienda de SFT para un mismo nivel de la prueba Olsen P. Para la prueba de suelo Bray I, la diferencia fue de entre 0.5 y 1.46 veces. Esta relación creció

con el incremento en el tiempo de escorrentía y fue levemente menor en el segundo día de simulación.

El intercepto en las correlaciones entre la concentración de DP y TP en la escorrentía con la prueba de suelo, describen el valor de la concentración de DP y TP, cuando la prueba de suelo sea cero. El valor de la concentración mínima de DP en la escorrentía determinada para cada una de las seis correlaciones, fue positiva y aunque no presentó interacción triple, si presentó diferencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) al analizar los efectos de día de simulación, fuente de enmienda y prueba de suelo. Esta condición analizada con la poca variabilidad hidrológica ( $\Theta$  y E), permitió determinar que la concentración de DP en la escorrentía fue menor, cuando la humedad del suelo aumentó. Este concepto fue descrito previamente por Pote et al. (1999b). Los interceptos de las correlaciones entre DP y la prueba de suelo presentaron diferencia significativa y son menores ( $\alpha = 0.05$ ) que los interceptos de las correlaciones entre TP y la prueba de suelo. Esta situación fue generada por la alta contribución de la concentración de PP\* y SS en la escorrentía, producto de la capacidad dispersiva del agua sobre el suelo. Esta capacidad dispersiva, de acuerdo con los estudios realizados para la serie Humatas en el sitio de estudio por el National Soil Survey Laboratory de Nebraska, aporta en promedio un 25% de la fracción arcillosa, un 42% de la fracción media y un 32% de la fracción arenosa que compone la fracción textural del suelo (Anexo I).

Se evidenció un efecto del tipo de enmienda aplicado al suelo, sobre el valor del intercepto presente en las correlaciones de DP y TP para las dos

métodos de determinación de la prueba de P. El valor del intercepto en las correlaciones fue diferente entre las pruebas Olsen y Bray I para las dos fuentes de enmienda. Para la prueba Bray I se observó un efecto entre días de simulación, sólo cuando la fuente de enmienda fue SFT. Schroeder et al. (2004) sugirieron que la razón para éstas diferencias y para que el valor sea positivo, radica en el efecto de factores específicos del suelo, que regulan la interacción entre la escorrentía y la superficie del suelo y por las contribuciones de P provenientes de lixiviados de materiales vegetales (pasturas y plantas) y residuos orgánicos sobre la superficie. Sharpley et al. (1981) reportaron que de un 18 a un 94% de la pérdida de P en la escorrentía, es aportado como P lixiviado por la parte aérea de la vegetación. Timmons et al. (1970) mostraron que los residuos secos de pasturas pueden producir pérdidas de P que superan  $0.3 \text{ kg ha}^{-1}$ . Estos argumentos tienen gran relevancia para explicar el alto valor de los interceptos, especialmente en los predios GL donde el material aplicado se evidenció aun en algunos predios, reflejando altos contenidos de MO en la mayor parte de las muestras del presente estudio. Aunque no existe diferencia debido a la fuente de enmienda de los predios, estadísticamente ( $\alpha=0.05$ ) se encontró un efecto del contenido de MO sobre el valor de las concentraciones de P en la escorrentía (Figura 3.15).

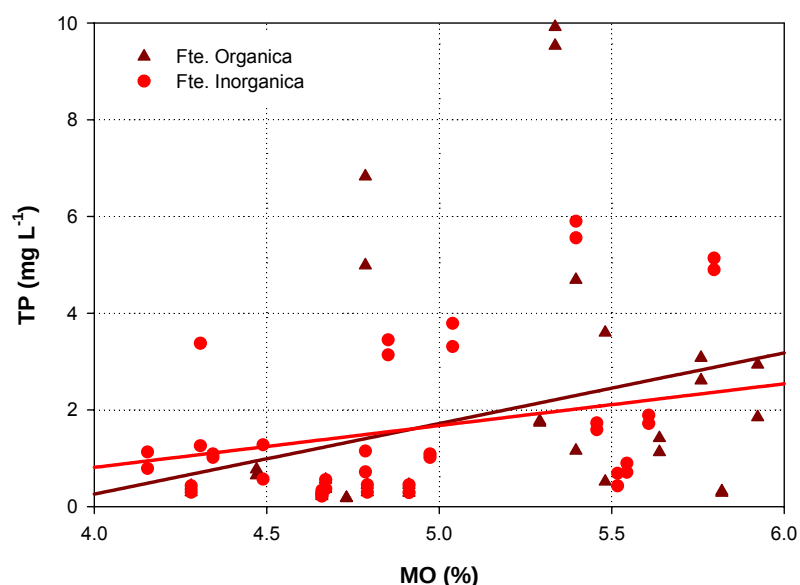


Figura 3.15. Relación entre la concentración de TP en la escorrentía y el contenido de MO del suelo.

El incremento (pendiente) de cada correlación entre la concentración de DP en la escorrentía y la prueba de P en el suelo, no presentó interacción triple, al analizar efectos de día de simulación, fuente de enmienda y prueba de suelo. Se observaron diferencias significativas ( $\alpha=0.05$ ) entre fuentes de enmienda y entre métodos para determinar la prueba de suelo (Figuras 3.16 a 3.19). No se encontró diferencia significativa entre días para los valores de la pendiente en las correlaciones, debido a la poca variabilidad hidrológica en los predios. Se encontró un leve efecto de dilución de la concentración de P en la escorrentía, al aumentar el tiempo de duración de un evento y la acumulación de la lámina de escorrentía. Este efecto ocurrió para las dos fuentes de enmienda y las pruebas de suelo estudiadas.

El hecho de que no hubo diferencia significativa en las condiciones de pendiente y grado de cobertura de la superficie del terreno para las parcelas GL,

SFT y T, sugiere que la variable con mayor efecto sobre parámetros hidrológicos como el tiempo de respuesta del flujo y la lámina acumulada de escorrentía fue  $\Theta$ , aun cuando este parámetro fue similar entre grupos de parcelas por fuente de enmienda. En promedio, el tiempo de duración total del evento de lluvia simulada tras 30 minutos de escorrentía para el primer día fue de 39.5, 35 y 34.5 minutos y para el segundo día de 34, 33.5 y 33 minutos para predios T, GL y SFT respectivamente. La concentración de TP y DP en la escorrentía decreció mientras aumentó el volumen y la duración de un evento de escorrentía, así como el tiempo total y la lámina de un evento de lluvia. Las concentraciones de DP y TP presentaron diferencia significativa ( $\alpha < 0.05$ ) dentro de un mismo nivel de susceptibilidad a la pérdida de P, debidas al incremento en el tiempo de duración del evento, después de los primeros 10 minutos continuos de flujo, dentro de cada día y para las dos pruebas de suelo. En general, la tasa de dilución de DP incrementó en cada nivel de susceptibilidad a la pérdida de P y fue significativamente diferente entre niveles. La tasa de dilución de DP presentó valores entre 0.01 y 0.054 mg L<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup> en el primer día y entre 0.003 y 0.024 mg L<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup> en el segundo, para predios con enmienda SFT. Los predios con enmienda GL presentaron tasas de dilución de DP entre 0.007 y 0.01 mg L<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup> en el primer día y entre 0.001 y 0.07 mg L<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup> en el segundo.

El valor del coeficiente de extracción de P del suelo por la escorrentía corresponde a la pendiente de la correlación lineal entre la prueba de suelo y la concentración de DP en la escorrentía. Este valor es mayor y significativamente diferente en las observaciones realizadas en predios GL en comparación con los

predios SFT, para las pruebas de suelo Olsen y Bray I (Tablas 3.16 y 3.17). Existe una reducción significativa en el valor del coeficiente mientras se incrementa el tiempo de escorrentía en un evento para los predios GL y SFT (Anexo G). El valor del coeficiente para la prueba Bray I fue menor y significativamente diferente que el de la prueba Olsen, para las dos fuentes de enmienda. Los valores del coeficiente de extracción fueron consistentes a los reportados por Andraski et al. (2003).

Tabla 3.16. Coeficiente de extracción de P por la escorrentía en predios bajo enmienda GL, para las pruebas de suelo Olsen y Bray I en dos días de simulación y diferentes tiempos de escorrentía.

| Tiempo de<br>escorrentía<br>(min) | Coeficiente de extracción de P |        |        |        |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|
|                                   | Día 1                          |        | Día 2  |        |
|                                   | Olsen                          | Bray I | Olsen  | Bray I |
| 10                                | 0.0204                         | 0.0135 | 0.0290 | 0.0196 |
| 20                                | 0.0214                         | 0.0150 | 0.0247 | 0.0168 |
| 30                                | 0.0156                         | 0.0112 | 0.0193 | 0.0141 |

Tabla 3.17. Coeficiente de extracción de P por la escorrentía en predios bajo enmienda SFT, para las pruebas de suelo Olsen y Bray I en dos días de simulación y diferentes tiempos de escorrentía.

| Tiempo de<br>escorrentía<br>(min) | Coeficiente de extracción de P |        |        |        |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|
|                                   | Día 1                          |        | Día 2  |        |
|                                   | Olsen                          | Bray I | Olsen  | Bray I |
| 10                                | 0.0131                         | 0.0108 | 0.0092 | 0.0076 |
| 20                                | 0.0112                         | 0.0093 | 0.0085 | 0.0070 |
| 30                                | 0.0090                         | 0.0077 | 0.0072 | 0.0061 |

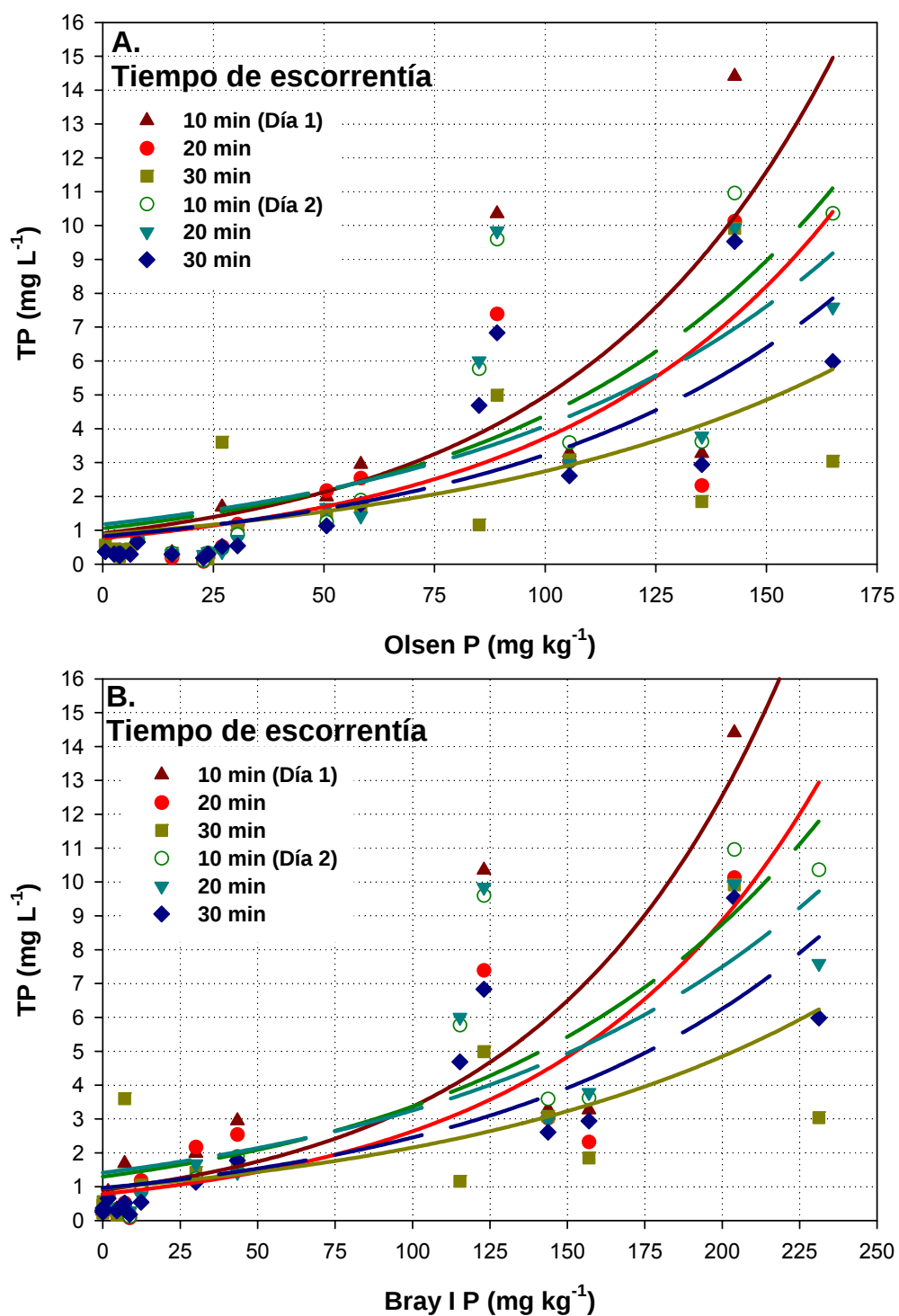


Figura 3.16. Relación entre la prueba de suelo Olsen (A) y Bray I (B) y la concentración de TP en la escorrentía para eventos con diferentes tiempos de escorrentía en dos días de simulación en predios GL.

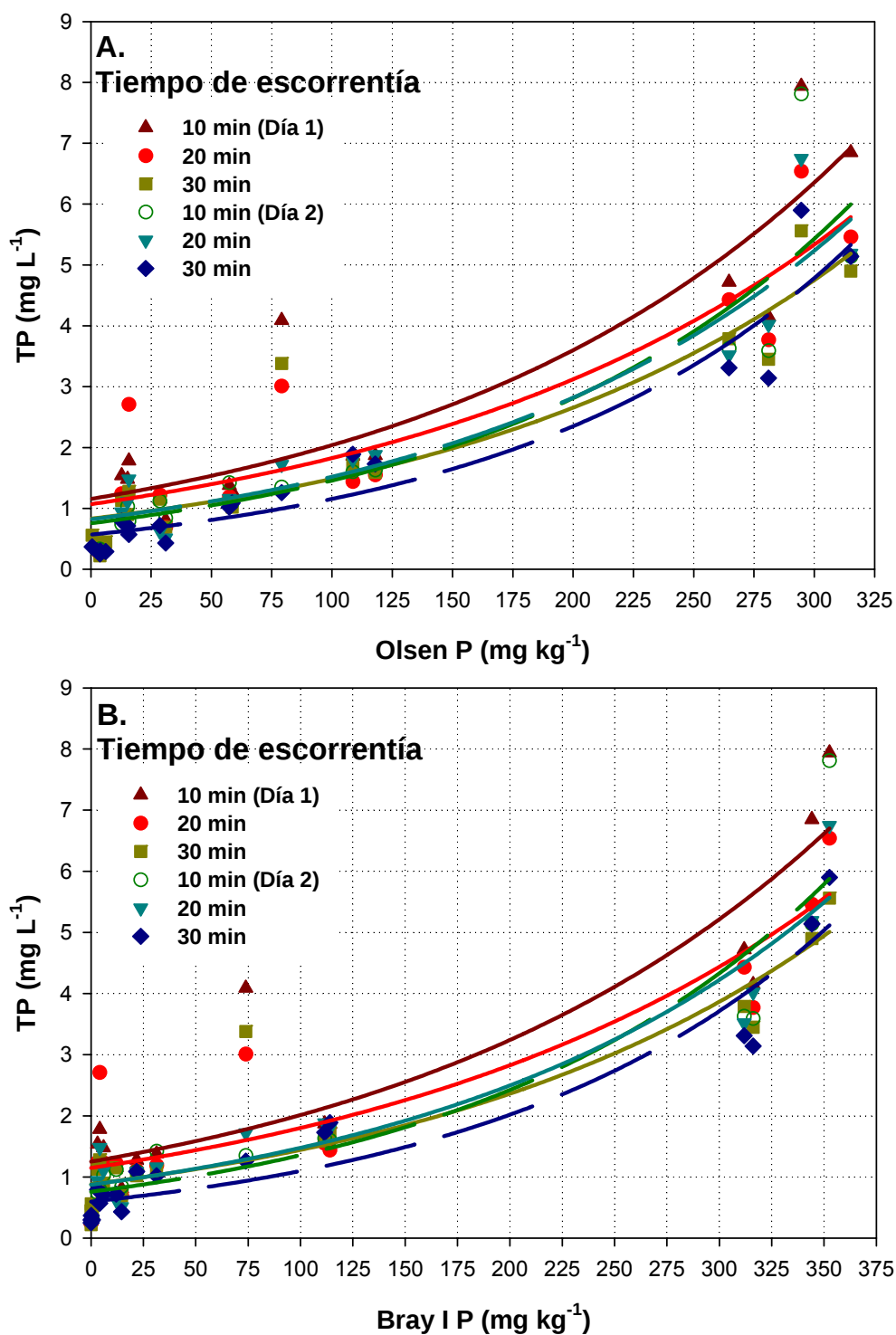


Figura 3.17. Relación entre la prueba de suelo Olsen (A) y Bray I (B) y la concentración de TP en la escorrentía para eventos con diferentes tiempos de escorrentía en dos días de simulación en predios SFT.

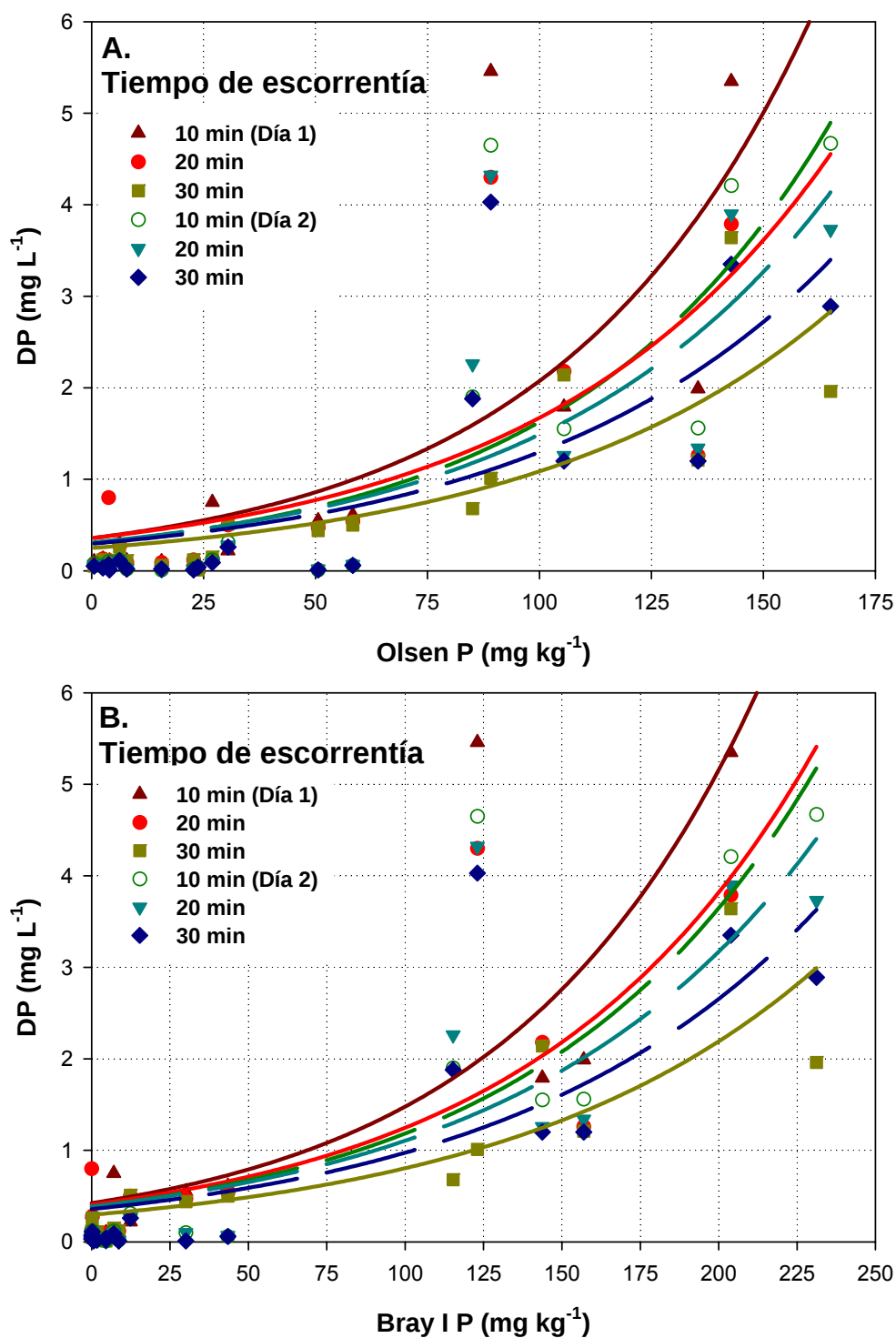


Figura 3.18. Relación entre la prueba de suelo Olsen (A) y Bray I (B) y la concentración de DP en la escorrentía para eventos con diferentes tiempos de escorrentía en dos días de simulación en predios GL.

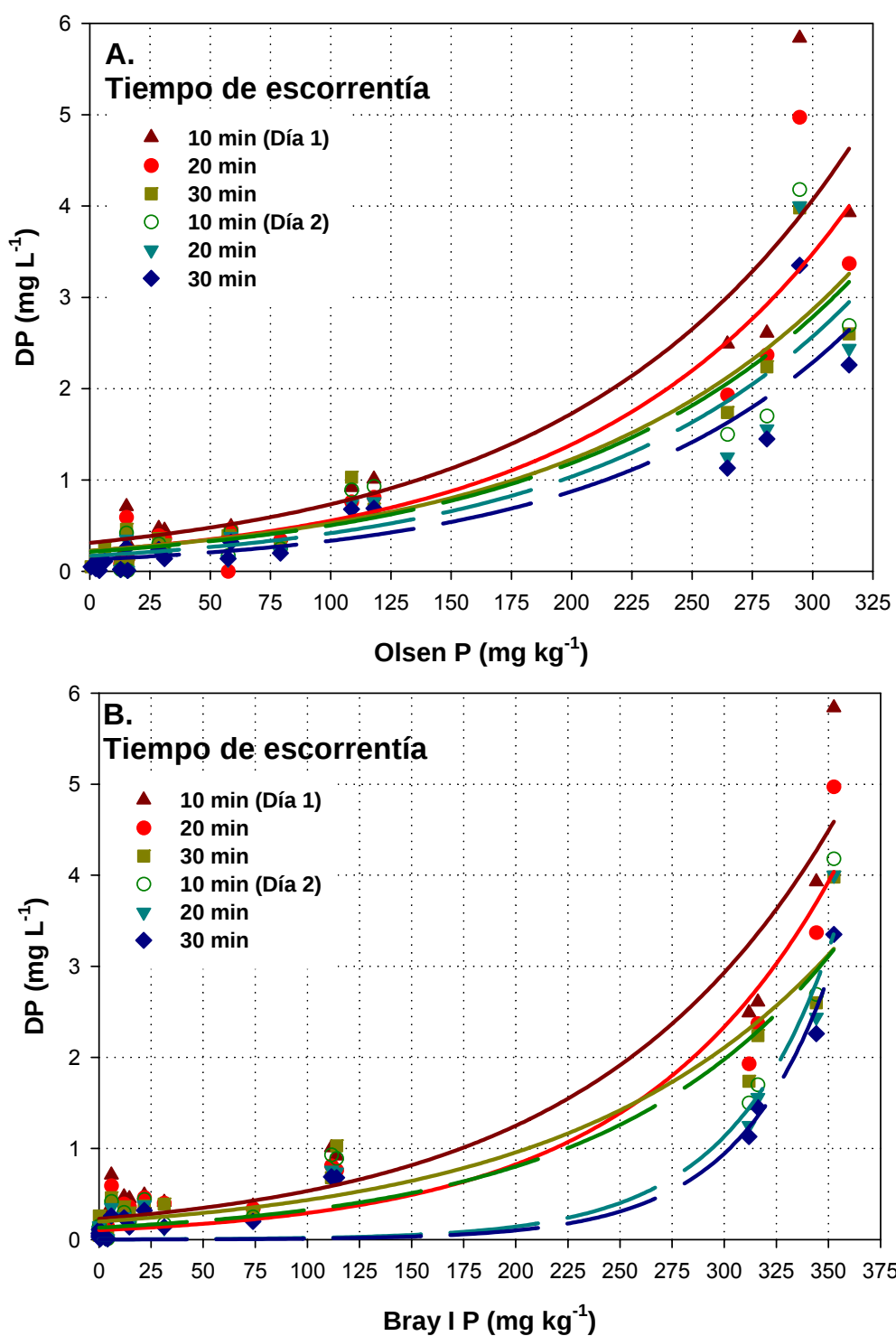
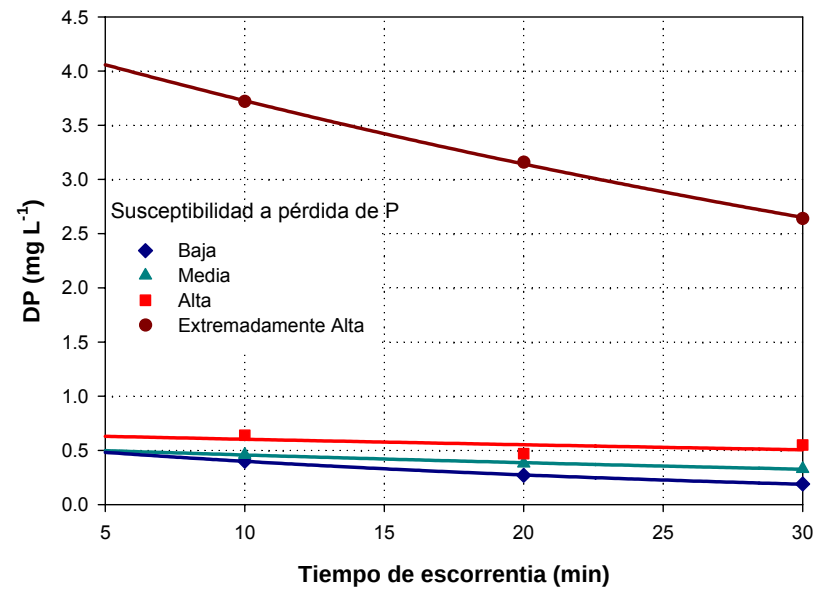


Figura 3.19. Relación entre la prueba de suelo Olsen (A) y Bray I (B) y la concentración de DP en la escorrentía para eventos con diferentes tiempos de escorrentía en dos días de simulación en predios SFT.

A.



B.

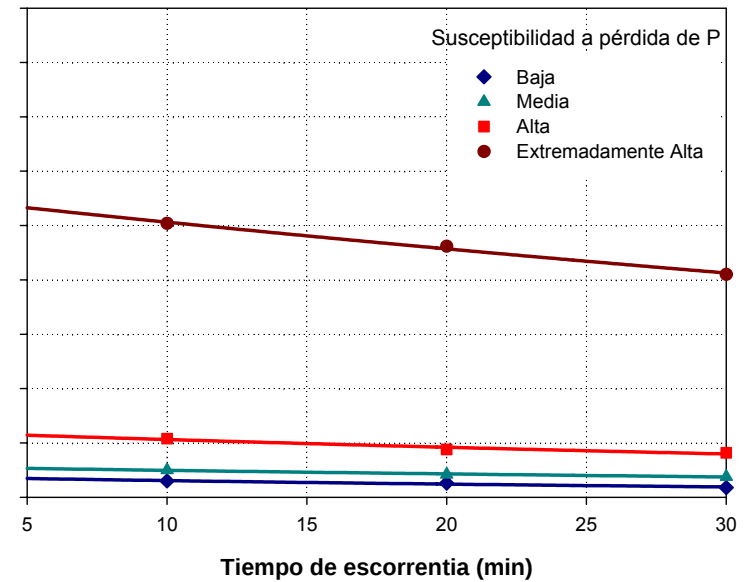


Figura 3.20. Comportamiento de la concentración de DP en la escorrentía para eventos de lluvia de diferente duración en día 1 (A) y día 2 (B), en suelos con diferente susceptibilidad a la pérdida de P enmendados con SFT.

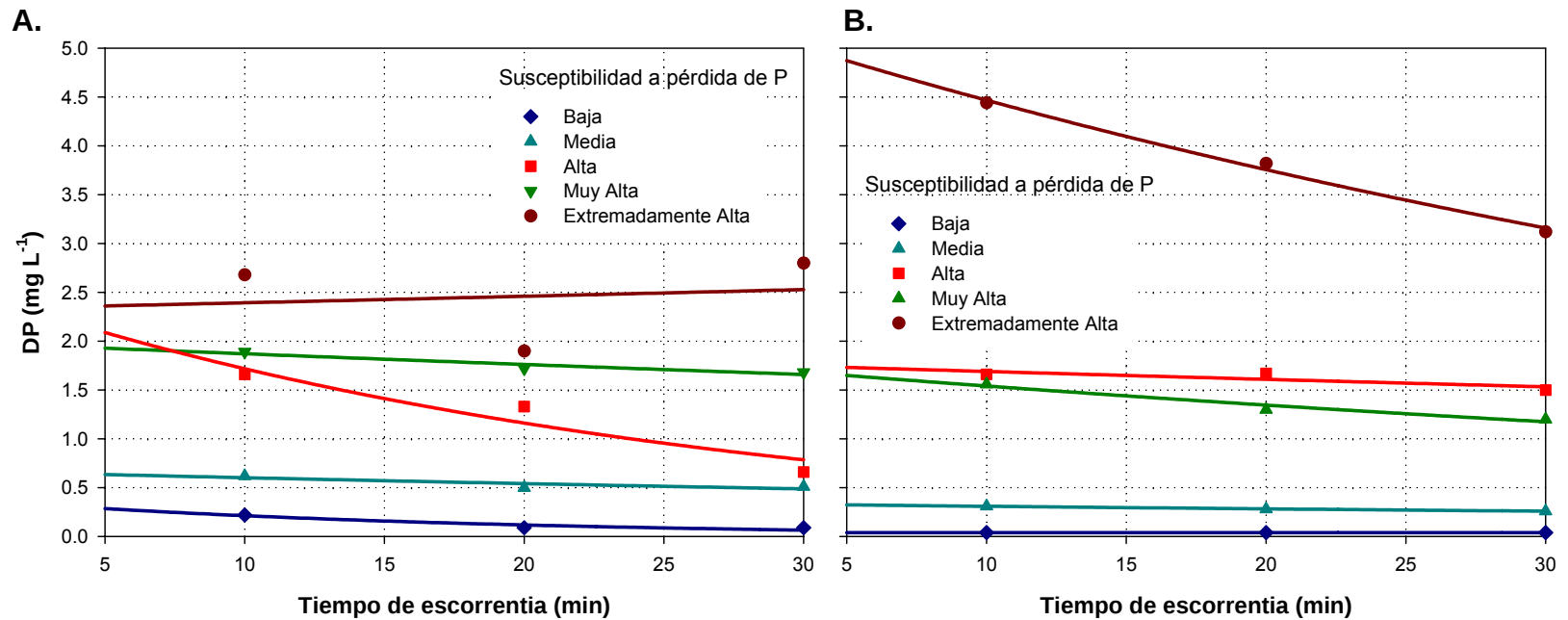


Figura 3.21. Comportamiento de la concentración de DP en la escorrentía para eventos de lluvia de diferente duración en día 1 (A) y día 2 (B), en suelos con diferente susceptibilidad a la pérdida de P enmendados con GL.

### 3.2.7. Determinación del valor crítico ambiental de P

A partir de las correlaciones encontradas entre la prueba de suelo y la concentración de DP en la esorrentía para un tiempo de esorrentía de 30 minutos (tiempo de comparación referenciado por el Protocolo del NPRP), se encontró un valor crítico ambiental para predios enmendados con GL de 88.5 y 111.5 mg kg<sup>-1</sup> para las pruebas Olsen y Bray I, respectivamente. Estos valores fueron consistentes con los encontrados por Andraski et al. (2003) para predios bajo aplicación de enmienda orgánica reciente, con un valor crítico ambiental para la STP Bray I de 90 mg kg<sup>-1</sup>. Los predios enmendados con SFT alcanzaron valores críticos en las pruebas de suelo de 176 y 206 mg kg<sup>-1</sup> para Olsen y Bray I respectivamente. Los valores encontrados para los predios SFT, validan el índice propuesto para Puerto Rico tanto para la prueba Olsen como para la prueba Bray I. Los valores encontrados para los predios con enmienda GL, indican que esta condición hace que el suelo sea aproximadamente entre un 50% y un 100% más susceptible a la pérdida de P que otros suelos en Puerto Rico estudiados por Sotomayor et al. (2004). Sin embargo, se debe tener en cuenta que la concentración de P en la esorrentía en predios con enmienda orgánica, evidenciaron la presencia de material que aun no había interactuado con el suelo, condición que afectó de forma importante el valor de la prueba de P del suelo y el valor de la concentración de P en la esorrentía.

La Tabla 3.18 describe el valor crítico ambiental de P para eventos de esorrentía con diferente duración.

Tabla 3.18. Valor crítico ambiental de la prueba de P en el suelo bajo diferente duración de eventos de escorrentía

| Tiempo de<br>escorrentía<br>(min) | Olsen<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) |       |       | Bray I<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) |       |       |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|
|                                   | GL*                             | SFT   |       | GL*                              | SFT   |       |
|                                   |                                 | Día 1 | Día 2 |                                  | Día 1 | Día 2 |
| 10                                | 94.5                            | 136   | 173   | 77                               | 173   | 224   |
| 20                                | 71                              | 165   | 218   | 85                               | 218   | 294   |
| 30                                | 88.5                            | 176   | 213   | 111.5                            | 206   | 300   |

\* Debido a que los predios con enmienda de GL no presentaron diferencia por efecto de día, se determinó un promedio del valor crítico ambiental.

### 3.3. CONCLUSIONES

La fuente de enmienda aplicada a un suelo, incidió en el valor de la prueba de P del suelo y en la concentración de P en la esorrentía. Suelos con similares niveles de aplicación, pero con diferentes fuentes presentaron mayores niveles en la prueba de P cuando la enmienda fue de origen orgánico (GL). Las concentraciones de DP y TP en la esorrentía, se incrementaron con la prueba de P del suelo (Olsen y Bray). Se determinaron correlaciones de tipo exponencial entre DP y TP con la prueba de suelo, a diferentes intervalos de tiempo de un evento de esorrentía para predios enmendados con superfosfato triple (SPT). Para predios enmendados con gallinaza (GL), el valor de  $R^2$  estuvo entre 0.69 y 0.75 para la prueba Bray I P y entre 0.57 y 0.74 para la prueba Olsen P. La reducción en el valor del coeficiente de determinación mostró que la reciente aplicación de enmienda orgánica puede alterar la relación entre la prueba de P del suelo y la concentración de P en la esorrentía, indicando que bajo esta circunstancia, el periodo de aplicación de la enmienda debe ser considerado para interpretar la pérdida potencial de P en la esorrentía a partir del valor de la prueba de P del suelo.

La fracción DP representó en promedio entre 23 y 35% de la concentración total de P en la esorrentía. La fracción más representativa fue la de PP\*, la cual está estrechamente relacionada con la concentración de SS y la dispersividad del suelo. El incremento en parámetros intrínsecos del suelo como el contenido de MO, incrementaron en la concentración de TP, PP\* y DP en la esorrentía, debido al desarrollo de diferentes procesos físicos y químicos en la

superficie del suelo. El incremento en  $\Theta$  representa una reducción en la concentración de DP y un incremento en la concentración de PP\* y SS en eventos de escorrentía con igual tiempo de duración, sobre suelos con similar nivel de P. El aumento en el tiempo de escorrentía incrementó el volumen de escorrentía y la concentración SS y PP\* y redujo la concentración de las fracciones TP y DP en la escorrentía. Se presentaron altas concentraciones de SS, condición que permitió la readsorción de P en el flujo y con ello una mayor concentración de PP\* en la escorrentía.

El coeficiente de extracción de P por la escorrentía para la serie de suelo Humatas enmendado con gallinaza, presentó para un tiempo de escorrentía de 30 minutos, valores de 0.016 y 0.011 obtenidos para la prueba de suelo Olsen y Bray I respectivamente. Bajo enmienda inorgánica la extracción de P del suelo por la escorrentía, fue de 0.009 y 0.0077. El incremento en el tiempo de escorrentía y la ocurrencia de eventos consecutivos causa una reducción en el valor del coeficiente de extracción de P.

Bajo condiciones experimentales de campo y concentraciones reales de P en la escorrentía, se determinó el valor crítico ambiental para la prueba Olsen y Bray I. Los resultados obtenidos para predios enmendados con SFT en 30 minutos de flujo de la escorrentía, validaron el índice de las pruebas Olsen y Bray I propuesto para Puerto Rico por Sotomayor et al. (2004). El valor crítico ambiental para la serie Humatas en predios enmendados con gallinaza, describieron una susceptibilidad a la pérdida de P 2 veces mayor a la de otros suelos en Puerto Rico.

#### **4. RECOMENDACIONES**

Al interpretar la información generada debe tenerse en claro que son estimaciones referenciadas a escala de parcela. Es necesario recordar que parámetros como la escorrentía acumulada decrecen, mientras la concentración y descarga de SS en la escorrentía aumentan con la longitud de la pendiente, el tamaño y el área de estudio. Las altas concentraciones de P en la escorrentía no necesariamente generan altas pérdidas de P, debido a la dilución de P después de la desorción del suelo en un evento de escorrentía y por efecto de variables hidrológicas antes enunciadas.

El valor crítico ambiental determinado en este estudio, define niveles de la prueba de suelo a partir de los cuales es preciso no permitir la aplicación de enmienda alguna de P al suelo. Con el objetivo de determinar niveles de P en el suelo que sobrepasen el valor crítico ambiental de P tras la aplicación de una enmienda, es necesaria la determinación de la capacidad de amortiguamiento del P en el suelo, es decir, la tasa de aplicación de P al suelo que incide en el incremento de un nivel ( $1 \text{ mg kg}^{-1}$ ) de la prueba de P en el suelo, para las diferentes fuentes de aplicación de P y los métodos de determinación de la prueba de P en el suelo, frecuentemente utilizados en Puerto Rico.

Los resultados generados en el presente estudio, permiten ver que el índice del valor crítico ambiental propuesto para Puerto Rico por Sotomayor et al. (2004), subestima el impacto que puede generar la enmienda orgánica de suelos, sobre la concentración de P en la escorrentía. Es claro que el procedimiento de laboratorio ofrece una buena aproximación a los resultados

determinados experimentalmente en campo, lo que permitiría determinar índices del valor crítico ambiental de P para diferentes suelos, bajo diferentes enmiendas de tipo orgánico (gallinaza, estiércol de ganado, porquinaza, etc.), en diferentes etapas de interacción del residuo con el suelo.

## LITERATURA CITADA

- Aase, J.K., D.L. Bjorneborg, and D.T. Westermann. 2001. Phosphorus runoff from two water sources on a calcareous soil. *J. Environ. Qual.* 30:1315–1323
- Andraski T. W. y L. G. Bundy. 2003. Relationships between phosphorus levels in soil and runoff in corn production systems. *J. Environ. Qual.* 32: 310-316.
- Andraski, T.W., L.G. Bundy, and K.C. Kilian. 2003. Manure history and long-term tillage effects on soil properties and phosphorus losses in runoff. *J. Environ. Qual.* 32:1782–1789.
- Baker, J., Laflen, J. 1983. Water quality consequences of conservation tillage. *Journal of Soil and Water Conservation.* 38: 186 – 93.
- Beinroth F., R. Engel, J. Lugo, C. Santiago, S. Ríos y G. Brannon. 2003. Updated taxonomic classification of the soils of Puerto Rico, 2002. *Bolletín* 303. University of Puerto Rico. Mayaguez Campus. College of Agricultural Sciences. 73 p.
- Cox, F.R., y S.E. Hendricks. 2000. Soil test phosphorus and clay content effects on runoff water quality. *J. Environ. Qual.* 29:1582–1586.
- Daniels M., T. Daniel, T. Carman, R. Morgan, J. Langston y K. VanDevender. 2000. Soils phosphorus levels: Concerns and recommendations. U. of Arkansas. (Online) 6 pp. <http://www.soil.ncsu.edu/sera17/>
- Daverde I. C., A. N. Kravchenko, R. G. Hoefft, E. D. Nafziger, D. G. Bullock, J. J. Warren y L. C. Gonzini. 2003. Phosphorus runoff: Effect of tillage and soils phosphorus levels. *J. Environ. Qual.* 32: 1436 – 1444.

- DeLaune, P. B., P. A. Moore, D. K. Carman, A. N. Sharpley, B. E. Haggard, y T. C. Daniel. Development of a phosphorus index for pastures fertilized with poultry litter-factors affecting phosphorus runoff. *J. Environ. Qual.* 33: 2183-2191.
- Fang, F., P.L. Brezonik, D.J. Mulla, and L.K. Hatch. 2002. Estimating runoff phosphorus losses from calcareous soils in the Minnesota River basin. *J. Environ. Qual.* 31:1918–1929.
- Fassbender, H. y E. Bormenisza. 1994. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA, San José. Costa Rica. 420 pp.
- Gaston, L. A., C. M. Drapcho, S. Tapadar y J. L. Kovar. 2003. Phosphorus runoff relationship for Louisiana Coastal plains soils amended with poultry litter. *J. Environ. Qual.* 32: 1422 – 1429.
- Gilley J. y L. Risse. 2000. Runoff and soil loss as affected by the application of manure. *Transactions of ASAE.* 43: 1583-1588.
- Gburek, W. J. y A. N. Sharpley. 1998. Hydrologic controls on phosphorus loss from upland agricultural watershed. *J. Environ. Qual.* 27: 267 – 277.
- Gburek, W. J., A. N. Sharpley, L. Heathwaite y G. L. Folmar. 2000. Phosphorus Management at the watershed scale: A modification of the Phosphorus Index. *J. Environ. Qual.* 29: 130 – 144.
- Good, L. W., L. G. Bundy, P. W. Barak, y J. M. Meyer. 2004. Predicting runoff sediment phosphorus concentrations using routine soil analyses. (CD ROM). En: 2004 Annual Meeting Abstracts ASA-CSSA-SSSA, Seattle, WA.

- Guidry A., R. Gelderman, D. German, J. Gerwing y F. Schindler. 2004. Evaluating phosphorus loss from Midwestern soils using simulated rainfall. (CD ROM). En: 2004 Annual Meeting Abstracts ASA-CSSA-SSSA, Seattle, WA.
- Hue, N. V. 1992. Correcting soil acidity of a highly weathered Ultisol with chicken manure and sewage sludge. *Commun. Soil. Sci. Plant. Anal.* 23:241-264.
- Junta de Planificación de Puerto Rico. 1975. Normas de diseño para sistemas de alcantarillado pluvial. Estado Libre Asociado de Puerto Rico. Oficina del Gobernador. 52 pp.
- Kleinman, P.J.A., A.N. Sharpley, K. Gartley, W.M. Jarrell, S. Kuo, R.G. Menon, R. Myers, K.R. Reddy, and E.O. Skogley. 2001. Interlaboratory comparison of soil phosphorus extracted by various soil test methods. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32:2325–2345.
- Kleinman P., A. Sharpley, R. Bryant, K. Czymmek y Q. Ketterings. 2002. National Phosphorus Runoff Project: New York. Quarterly Reports. (Online) 7 pp. <http://pswmru.arsup.psu.edu/phosphorus/nprp.htm>
- Kleinman P. y A. N. Sharpley (2003). Effect of broadcast manure on runoff phosphorus concentrations over successive rainfall events. *J. Environ. Qual.* 32:1072-1081.
- Kuo, S. 1996. Phosphorus. p. 869–918. In D. Sparks et al. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods.* SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- Lemunyon J., y R. J. Gilbert. 1993. The concept and need for a phosphorus assessment tool. *Journal of Production Agriculture.* 6 : 483-486.

- Lindsay, W. 1979. Chemical equilibria in soils. Wiley-Interscience Publication. New York. USA. 449 pp.
- Mallarino, A. 1997. Interpretation of soil phosphorus test for corn in soils with varying pH and calcium carbonate content. J. Prod. Agric. 10:163-167.
- Martínez, G., L. J. Olivieri, J. A. Castro, O. Muñiz, y J. L. Guzmán. 1999. Phosphorus status of soils from the poultry zone sin Puerto Rico. J. Agric. Univ. P. R. 83:1-17.
- Martínez G., D. Sotomayor y J. Castro. 2002. Application of the Caribbean P Index to soils receiving organic ammendments. J. Agric. Univ. P. R. 86: 145 – 154.
- McDowell, R., A. Sharpley y G. Folmar. 2001. Phosphorus export from an agricultural watershed: Linking source and transport mechanisms. J. Environ. Qual. 30: 1587 – 1595.
- McDowell, R. y A. N. Sharpley. 2001. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage. J. Environ. Qual. 30, 508-520.
- McDowell, R. y A. N. Sharpley. 2002. Effect of plot scale and upslope phosphorus source on phosphorus loss in overland flow. Soil Use Management. 18:112-119.
- Montenegro H. y D. Malagón. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección Agrológica. Bogotá, D.E. 811 pp.
- Mullins, G. y V. Tech. 2001. National Phosphorus Runoff Project: Virginia. Quarterly report: Dec 2001. (Online) 5 pp.  
<http://pswmru.arsup.psu.edu/phosphorus/nprp.htm>

- Muñiz, O. 1992 Uso de fertilizantes en Puerto Rico: Enfoques prácticos; Guía técnica. Universidad de Puerto Rico, Servicio de Extensión Agrícola: Mayagüez, PR. 26 pp.
- Murphy, J. y J.R. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem.* 27: 31-36.
- Nash D. y D. Halliwell. 1999. Fertilisers and phosphorus loss from productive grazing systems. *Aust. J. Soil. Res.* 37,403-429.
- O'Hallorans J., M. Muñoz y P. Marquez. Chicken manure as an amendment to correct soil acidity and fertility. *J. Agric. Univ. P. R.* 81:1-8.
- Preedy, N., K. McTiernan, R. Matthews, L. Heathwaite, y P. Haygarth. 2001. Rapid incidental phosphorus transfers from grassland. *J. Environ. Qual.* 30:2105-2112.
- Pote, D. H., T. C. Daniel, A. N. Sharpley, P. A. Moore, D. R. Edwards y D. J. Nichols. 1996. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 855 – 859.
- Pote, D. H., T. C. Daniel, D. J. Nichols, A. N. Sharpley, P. A. Moore, D. M. Miller y D. R. Edwards. 1999a. Relationship between phosphorus levels in three Ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *J. Environ. Qual.* 28: 170 – 175.
- Pote, D. H., T. C. Daniel, D. J. Nichols, P. A. Moore, Jr., D. M. Miller, y D. R. Edwards. 1999b. Seasonal and soil-drying effects on runoff phosphorus relationships. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1006 – 1012.

- Pote, D.H., y T. C. Daniel. 2000. Analyzing for total phosphorus and total dissolved phosphorus in water samples. P. 94-97. In G.M. Pierzinsky. Ed. Methods for phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters. Bulletin no. 396.
- Nelson, D.W., y L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. p. 539-580. In A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney (ed.) Methods of soil analysis. Part 2, 2nd ed. Agron. Monogr.9, ASA and SSSA, Madison, WI.
- Ramírez, J., D. Sotomayor, G. Martínez y L. Pérez. 2003. Transporte de fósforo en un suelo enmendado con fuentes minerales y orgánicas. Memorias Reunión Anual SOPCA 2003.
- Sauer, T., T. Daniel, D. Nichols, C. West, P. Moore, Jr. y G. Wheeler. 2000. Runoff water quality from poultry litter-treated pasture and forest sites. J. Environ. Qual. 29:515-521.
- Schroeder, P. D., D. E. Radcliffe, M. L. Cabrera, y C. D. Belew. 2004. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus in runoff: Effects of soil series variability. J. Environ. Qual. 33: 1452-1463.
- Sharpley, A. N., R. G. Menzel, S. J. Smith, E. D. Rhoades y A. E. Olness. 1981. The sorption of soluble P by soil material during transport in runoff from cropped and grassed watersheds. J. Environ. Qual. 10: 211 – 215.
- Sharpley, A. N. 1981. The contribution of phosphorus leached from canopy to losses sin surface runoff. J. Environ. Qual. 10:160-165.
- Sharpley, A. N. 1985. Depth of surface soil-runoff interaction as affected by rainfall, soil slope and management. Soil Sci. Soc. Am. J. 49:1010-1015.

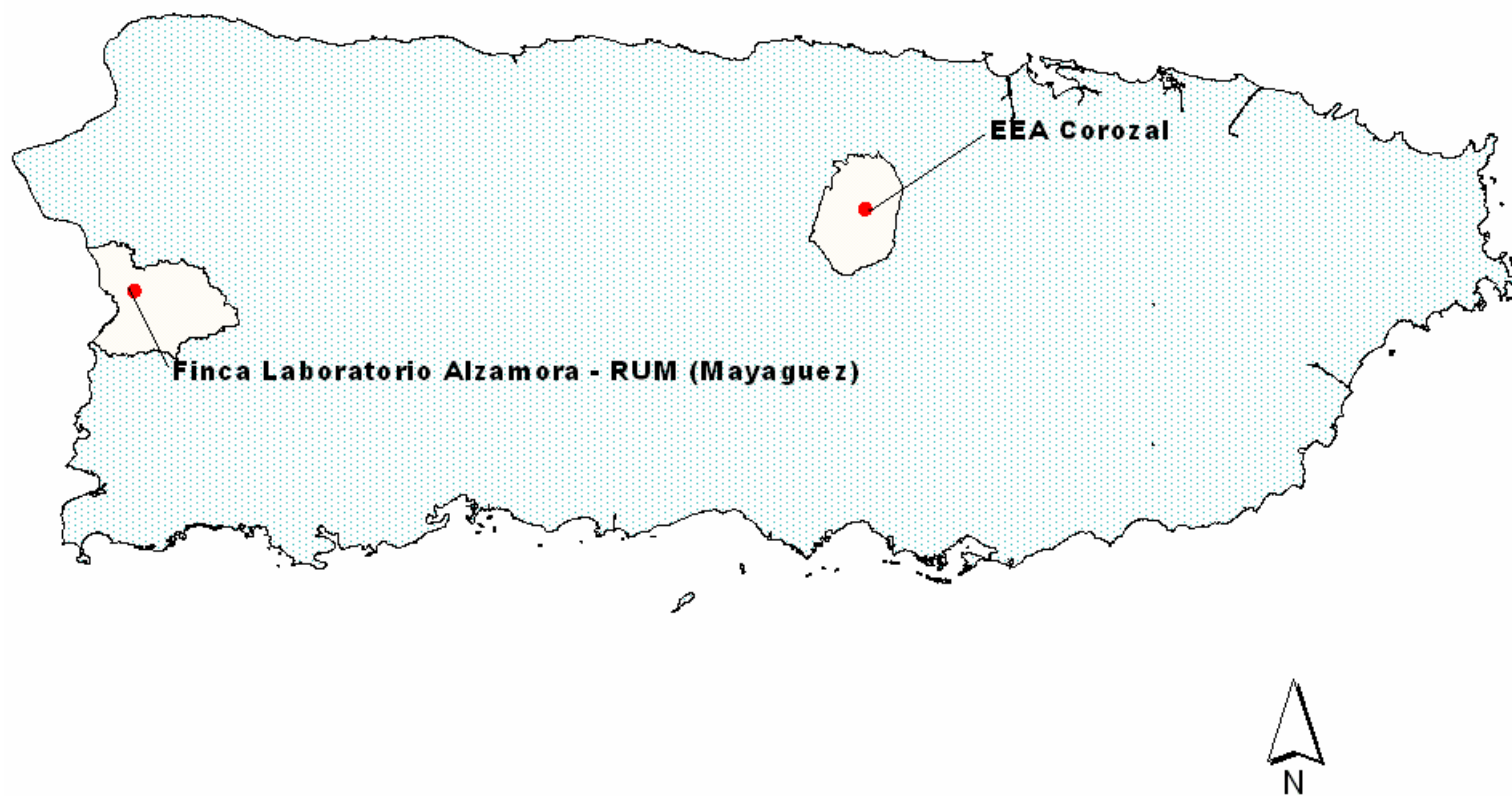
- Sharpley, A. N. y S. J. Smith. 1989. Prediction of soluble phosphorus transport in agriculture runoff. *J. Environ. Qual.* 18: 313 – 316.
- Sharpley, A. N. 1993. An innovate approach to estimate bioavailable phosphorus in agricultural runoff using iron-oxide impregnated paper. *J. Environ. Qual.* 22:597-601.
- Sharpley, A. N., T. C. Daniel y D. R. Edwards. 1993. Phosphorus movement in the landscape. *J. Prod. Agric.* 6: 493 – 500.
- Sharpley, A. N., S. C. Chapra, R. Wedepohl, J. T. Sims, T. C. Daniel y K. R. Reddy. 1994. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options. *J. Environ. Qual.* 23: 437 – 451.
- Sharpley A. 1995. Identifying sites vulnerable to phosphorus loss in agricultural runoff. *J. Environ. Qual.* 24: 947 – 951.
- Sharpley, A. N., T. C. Daniel, J. T. Sims y D. H. Pote. 1996. Determining environmentally sound soil phosphorus levels. *J. Soil and Water Cons.* 51: 160 -166.
- Sharpley, A. N. y B. Moyer. 2000. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall. *J. Environ. Qual.* 29:1462-1469.
- Sharpley, A. N., McDowell R., Weld J.L. y Kleinman P. 2001. Assessing site vulnerability to phosphorus loss in an agricultural watershed. *J. Environ. Qual.* 30: 2026 – 2036.
- Sharpley A. N. 2001. Managing Phosphorus for Agriculture and the Environment. Penn State College of Agricultural Sciences and Agricultural Research and Cooperative Extension. (Online). 16 pp. <http://pubs.cas.psu.edu>

- Sharpley A. y P. Kleinman. 2002. National Phosphorus Runoff Project: Pennsylvania – Rainfall simulator and plot scale comparison. USDA – ARS. (Online). 9 pp. <http://pswmru.arsup.psu.edu/phosphorus/nprp.htm>
- Sharpley, A.N., P.J.A. Kleinman, R.W. McDowell, M. Gitau, y R.B. Bryant. 2002. Modeling phosphorus transport in agricultural watersheds: Processes and possibilities. *J. Soil Water Conserv.* 57: 425–439.
- Sharpley, A. N., T. Daniel, T. Sims, J. Lemunyon, R. Stevens y R. Parry. 2003. Agricultural phosphorus and eutrophication. Second edition. USDA – ARS. ARS -149. 42 pp.
- Sharpley, A. y P. Kleinman. 2003. Effect of rainfall simulator and plot scale on overland flow and phosphorus. *J. Environ. Qual.* 32: 2172-2179.
- Sims, J.T. 2000a. Soil test Phosphorus: Olsen P. En: G.M. Pierzinsky Ed., *Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters.* Bulletin no. 396. 20-21 pp.
- Sims, J.T. 2000b. Soil test Phosphorus: Bray and Kurtz P-1. En G.M. Pierzinsky Ed., *Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters.* Bulletin no. 396. 13-14 pp.
- Sotomayor, D., G. Martínez, L. Pérez y J. J. Ramírez. 2003. Off-field phosphorus transport from an Ultisol. (CD ROM). En: 2003 Annual Meeting Abstracts ASA-CSSA-SSSA, Denver, CO.
- Sotomayor, D., G. Martínez, Santana O., Mylavarapu R. y Guzman J. 2004. Phosphorus soil test for environmental assesment in tropical soils. *Comun. Soil Sci. Plant anal. Anal.* 35: 1485 – 1503.

- Tabbara H. 2003. Phosphorus loss to runoff after twenty-four hours after application of liquid swine manure or fertilizer. *J. Environ. Qual.* 32: 1044-1052.
- Tarkalson D. D. y R. L. Mikkelsen. 2004. Runoff phosphorus losses as related to phosphorus source, application method, and application rate on a piedmont soil. *J. Environ. Qual.* 33:1424–1430
- Timmons, D.R., R. F. Holt y J. J. Latteral. 1970. Leaching of crop residues as a source of nutrients in surface waters. *Water Resour. Res.* 6: 1367-1375.
- Torbert, H.A., T.C. Daniel, J.L. Lemunyon, y R.M. Jones. 2002. Relationship of soil test phosphorus and sampling depth to runoff phosphorus in calcareous and noncalcareous soils. *J. Environ. Qual.* 31: 1380-1387.
- Troeh, F.R. y L.M. Thompson. 1993. *Soils and soil fertility*. Fifth edition. Oxford University Press Inc. New York, NY.
- USDA – NRCS. 2001. National Phosphorus Project for Simulated Rainfall-Surface Runoff Studies. Protocol. (Online). 18 pp. <http://pswmru.arsup.psu.edu/phosphorus/nprp.htm>
- US EPA. 1986. Quality criteria for water. Office of water regulation and standards. EPA-440/5-86-001. May 1986.
- Vadas, P. A., P. J. A. Kleinman, A. N. Sharpley, y B. L. Turner. 2005. Relating soil phosphorus to dissolved phosphorus in runoff: a single extraction. *J. Environ. Qual.* 34: 572 – 580.
- Walkley A, Black I A. (1934): An Examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic titration method. *Soil Sci.* 34:29-38.

- Withers, P. 2000. An environmental soil test to determine the potential for sediment and phosphorus transport in runoff from agricultural land. Project Contributions. SD3. (Online) 8 pp. <http://www.image-train.net/events>
- Wood C. W., G. L. Mullins y B. F. Hajek. 1998. Phosphorus in agriculture. Soil Quality Institute Technical Pamphlet No. 2. (Online) 5 pp. <http://soils.usda.gov>
- Zaimes G. N. y R. C. Schultz. 2002. Phosphorus in agricultural watersheds. Department of Forestry, Iowa State University, Ames, Iowa January 2002. (Online) 116 pp. <http://www.buffer.forestry.iastate.edu>

## ANEXO A. LOCALIZACIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO



## **ANEXO A.1. DISTRIBUCIÓN DE LA PRUEBA DE SUELO POR APLICACIÓN DE ENMIENDAS**

Se realizó un muestreo en grillas en veinte predios, tras dividir cada predio en nueve celdas y tomar una muestra compuesta representativa de cada una de ellas, a una profundidad de 5 cm. Cada predio tenía un área de 407 m<sup>2</sup>. Nueve de los predios fueron enmendados con superfosfato triple (SFT) recibiendo aplicaciones de 25, 50, 100, 150, 300, 450, 600, 900 y 1200 kg P ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Ocho predios se enmendaron con gallinaza (GL), recibiendo aplicaciones de 25, 50, 150, 300, 450, 600, 900 y 1200 kg P ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Tres predios no recibieron P y fueron usados como testigo (T). La enmienda orgánica fue dividida en dos aplicaciones realizadas en octubre de 2003 y febrero de 2004. La enmienda inorgánica fue dividida en cuatro aplicaciones realizadas en octubre y diciembre de 2003 y en febrero y mayo de 2004.

Las muestras de suelo fueron analizadas para determinar el nivel de la prueba de suelo Olsen y Bray I. Mediante aplicación del software ArcView 3.2. (ESRI, Inc) (Figuras A.1 a A.3 y A.6 a A.8). Se desarrolló la distribución espacial de la prueba de suelo en cada predio y se determinó el área relativa (%) de cada nivel de susceptibilidad del suelo a la pérdida de P (Figuras A.4, A.5, A.9 y A.10), para cada nivel de aplicación en cada tipo de fuente de enmienda.

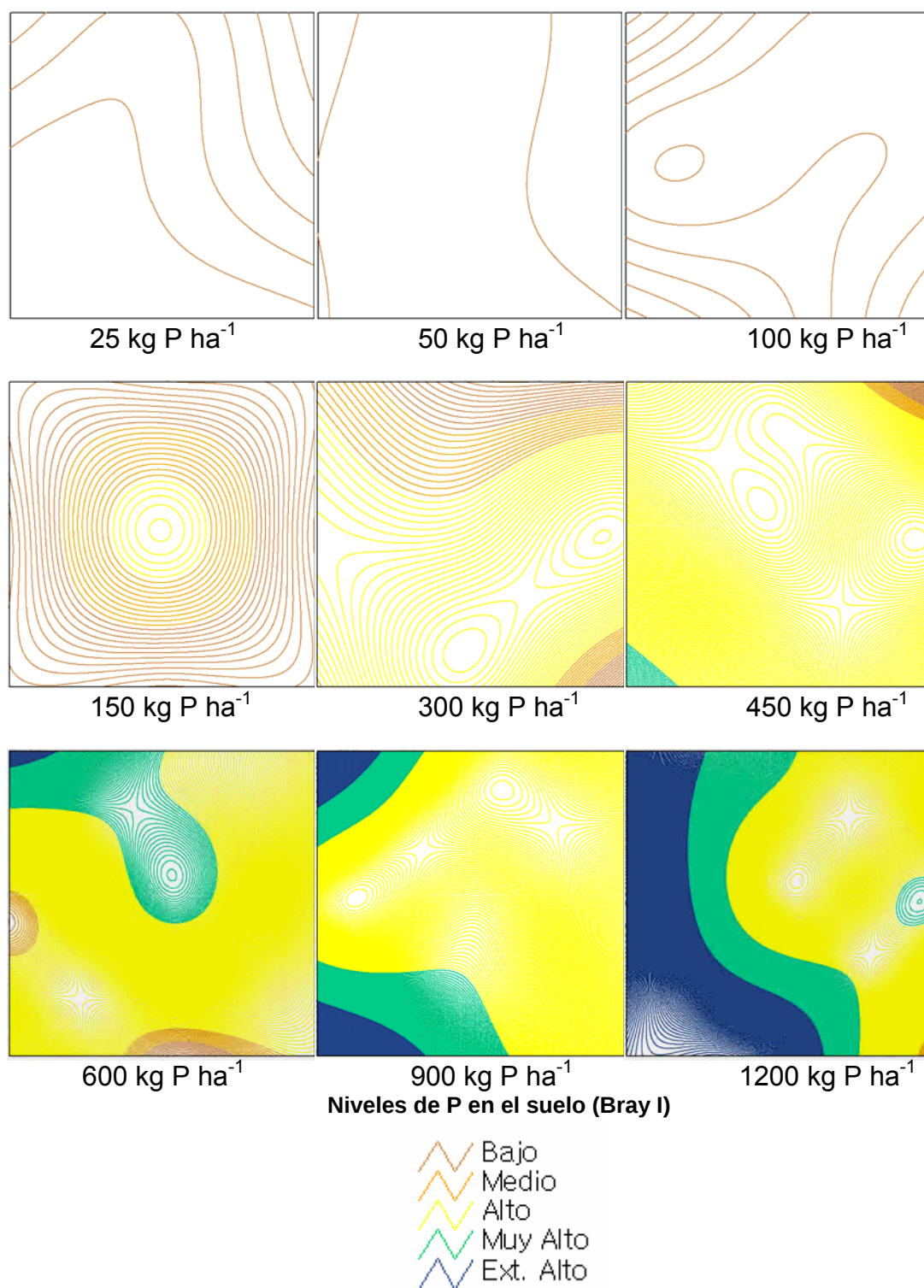


Figura A.1. Distribución espacial de la prueba de P de suelo Bray I en Ultisol con diferentes niveles de enmienda inorgánica

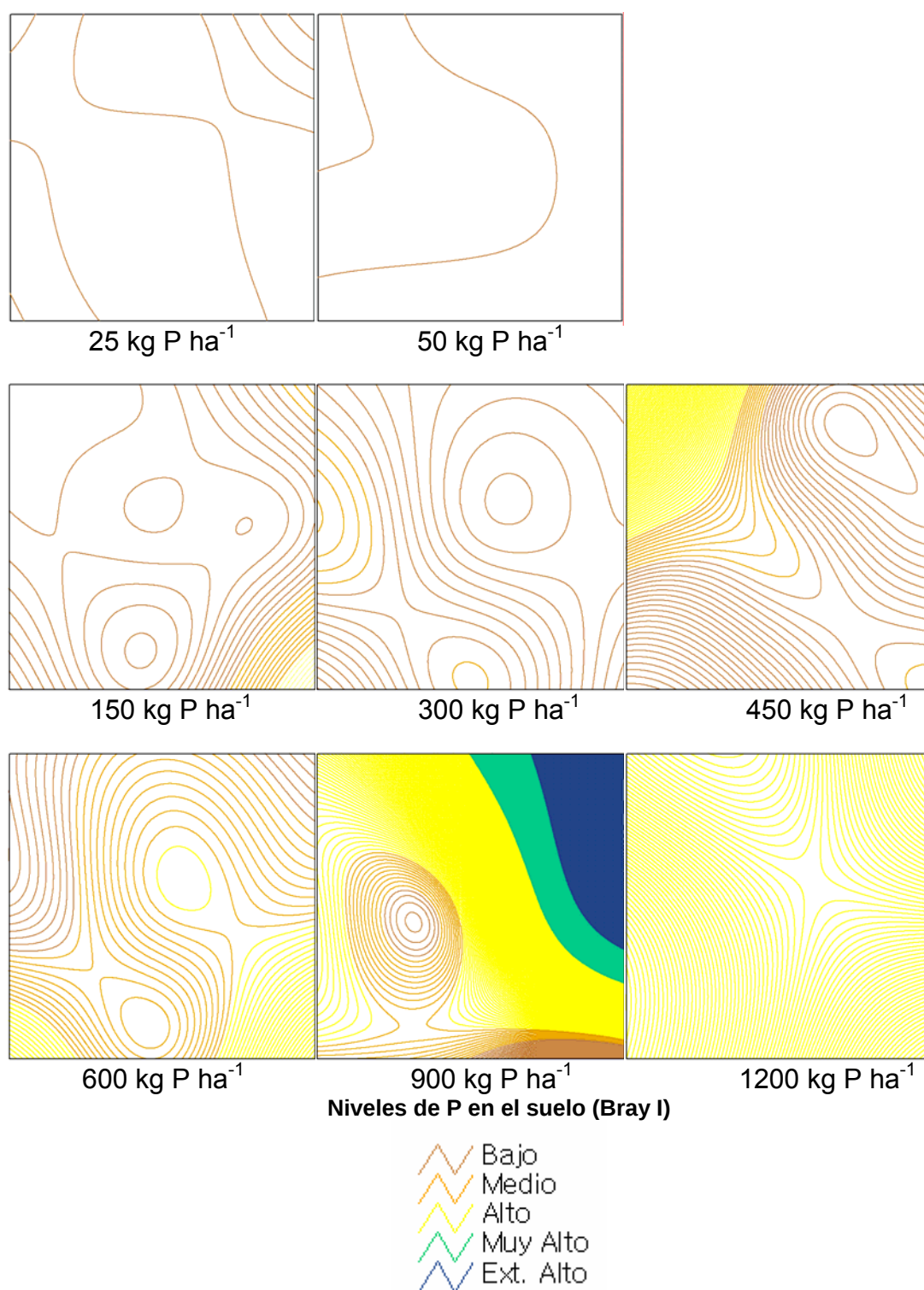


Figura A.2. Distribución espacial de la prueba de P de suelo Bray I en Ultisol con diferentes niveles de enmienda orgánica

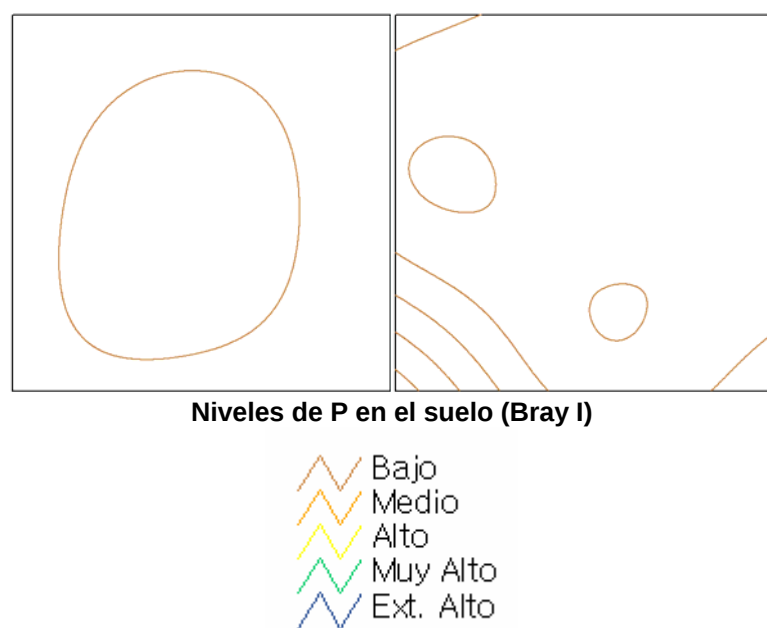


Figura A.3. Distribución espacial de la prueba de P de suelo Bray I en Ultisol sin enmienda

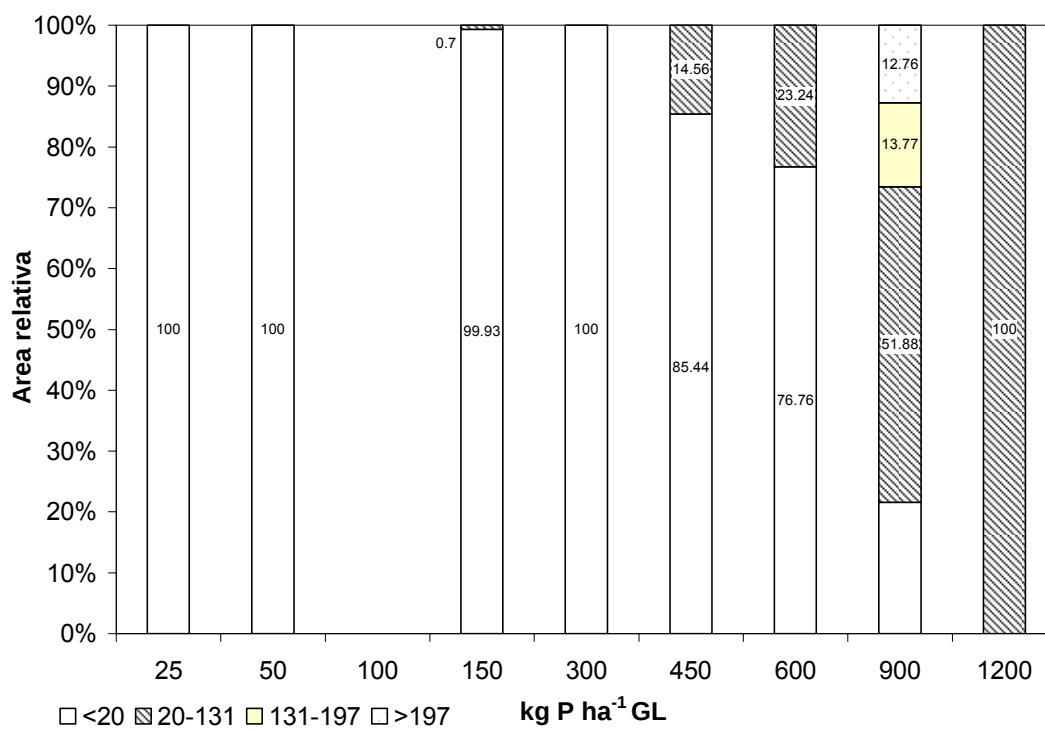


Figura A.4. Distribución de la prueba de suelo Bray I en predios con diferentes niveles de enmienda orgánica

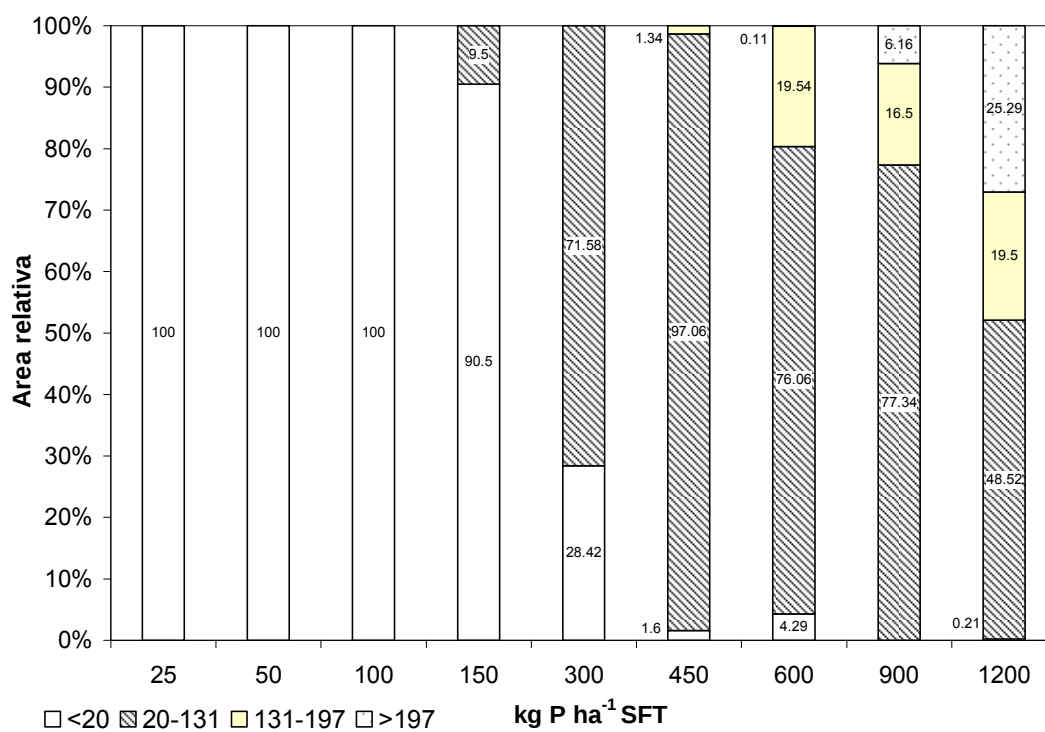


Figura A.5. Distribución de la prueba de suelo Bray I en predios con diferentes niveles de enmienda orgánica

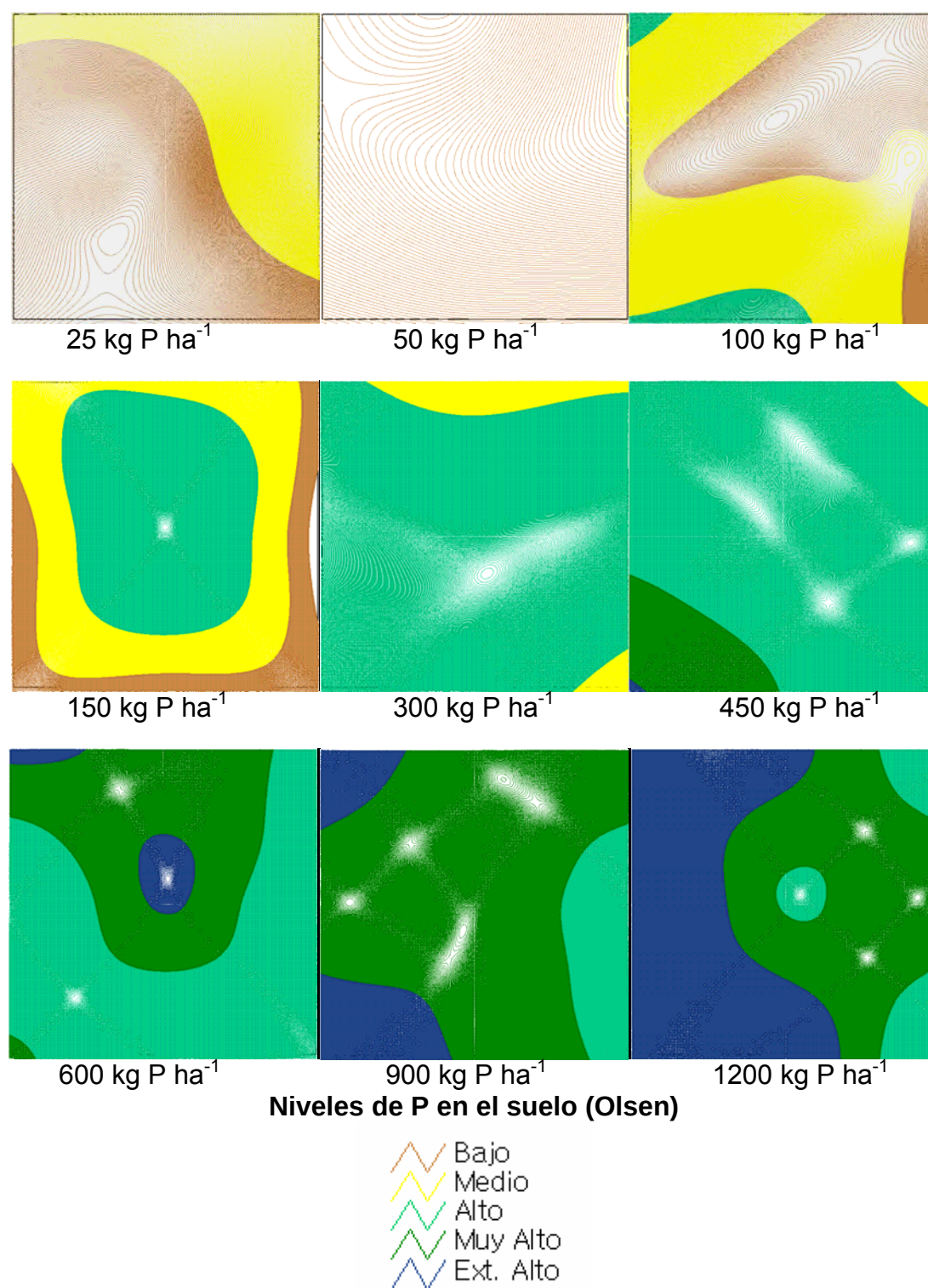


Figura A.6 Distribución espacial de la prueba de P de suelo Olsen en Ultisol con diferentes niveles de enmienda inorgánica

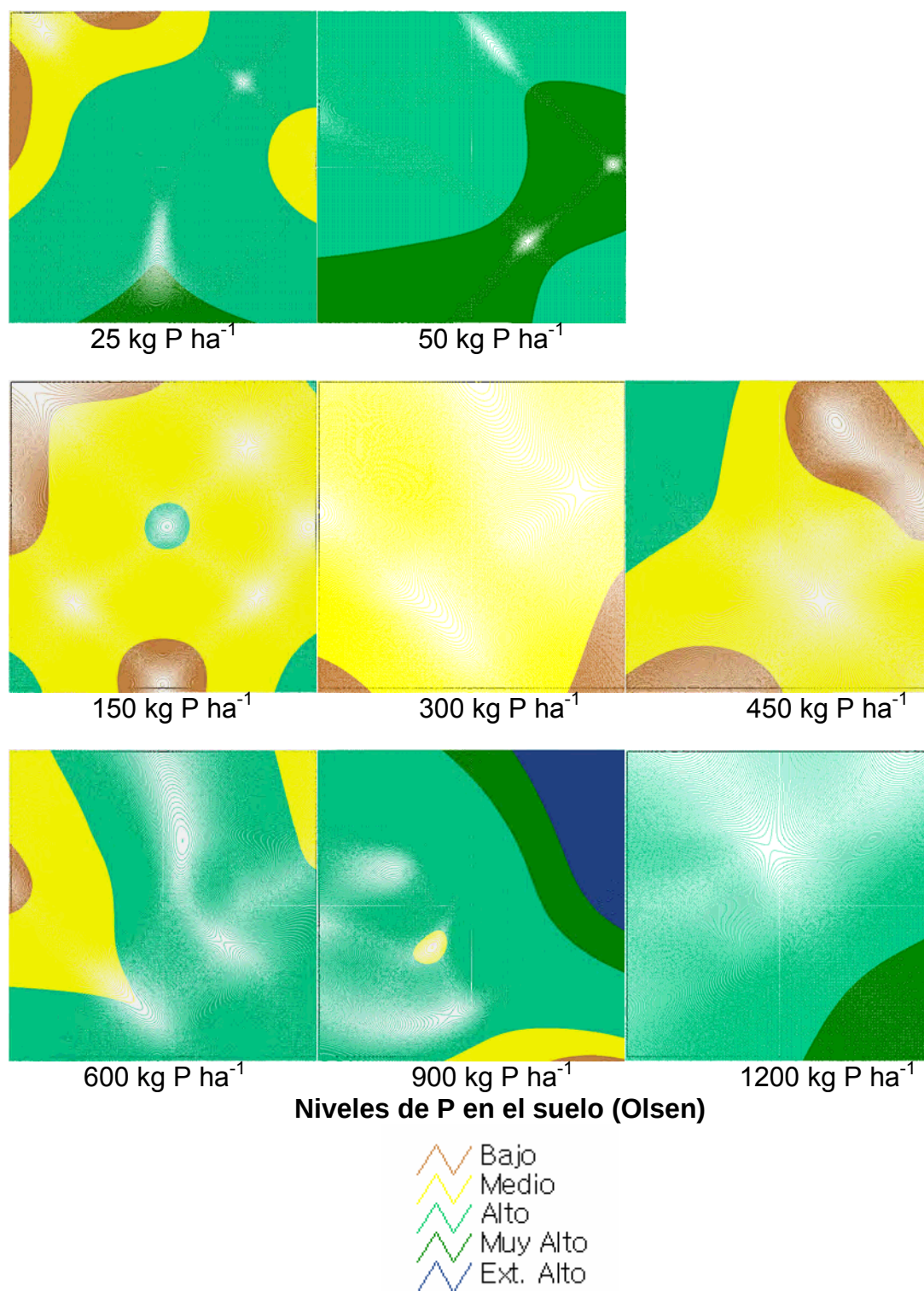


Figura A.7. Distribución espacial de la prueba de P de suelo Olsen en Ultisol con diferentes niveles de enmienda orgánica

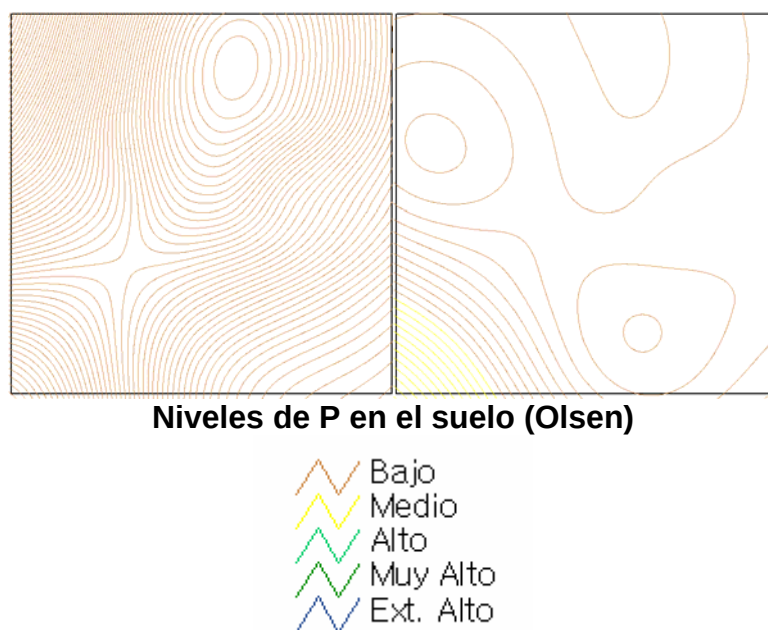


Figura A.8. Distribución espacial de la prueba de P de suelo Olsen (sin enmienda)

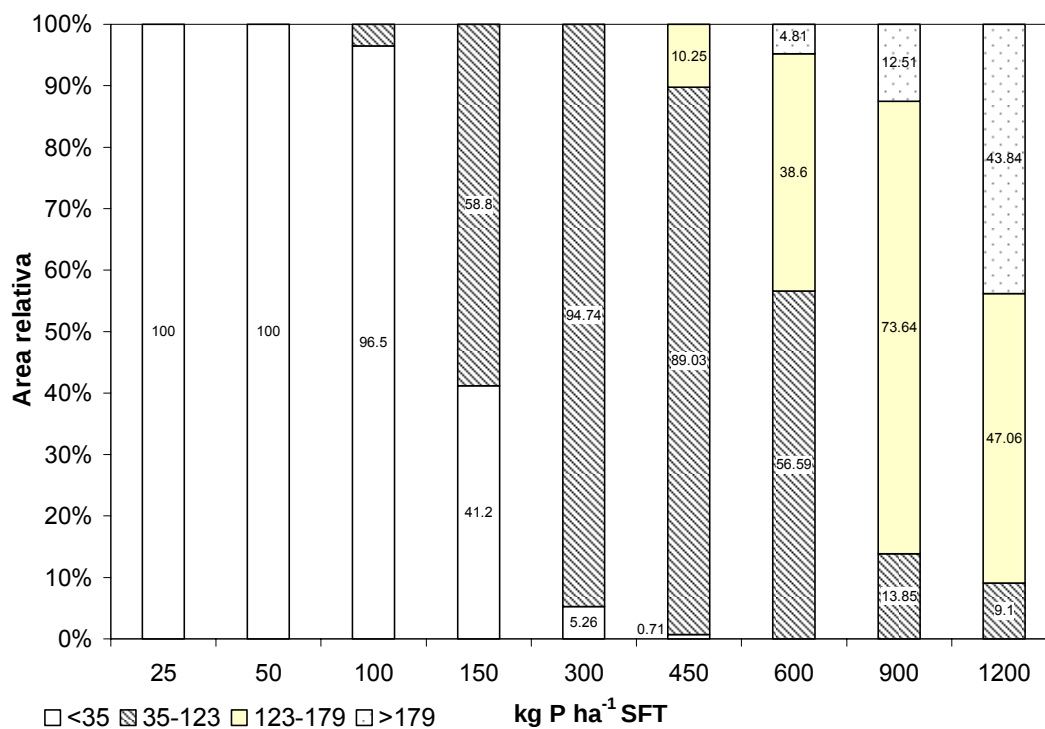


Figura A.9. Distribución de la prueba de suelo Olsen en predios con diferentes niveles de enmienda orgánica

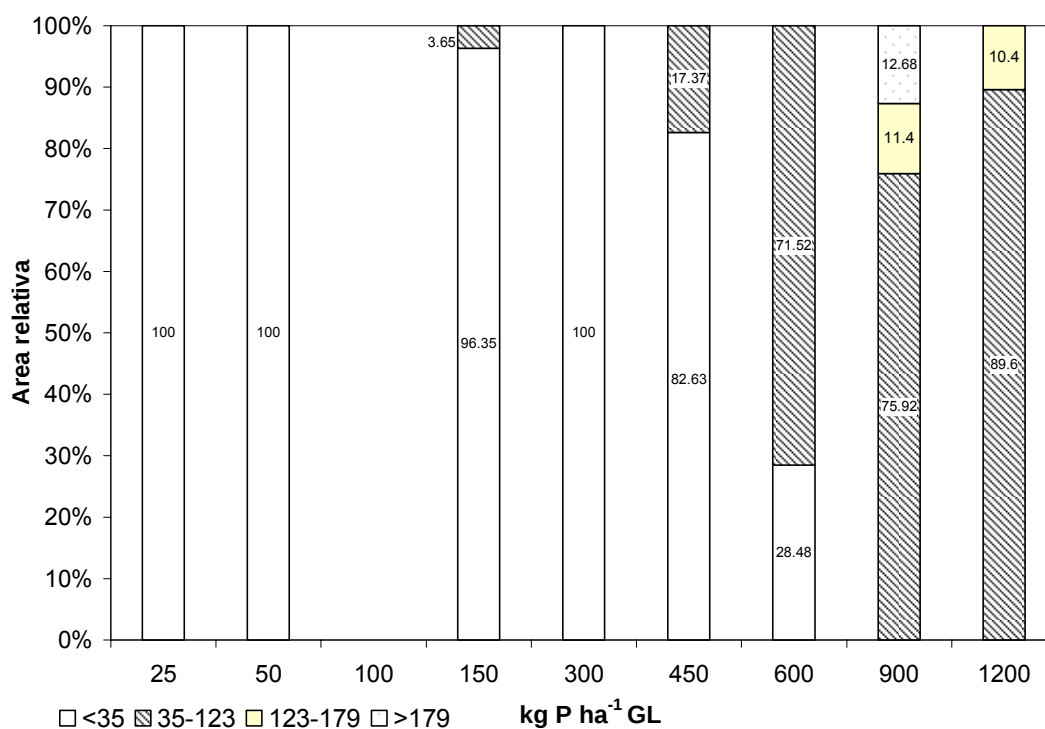


Figura A.10. Distribución de la prueba de suelo Olsen en predios con diferentes niveles de enmienda orgánica

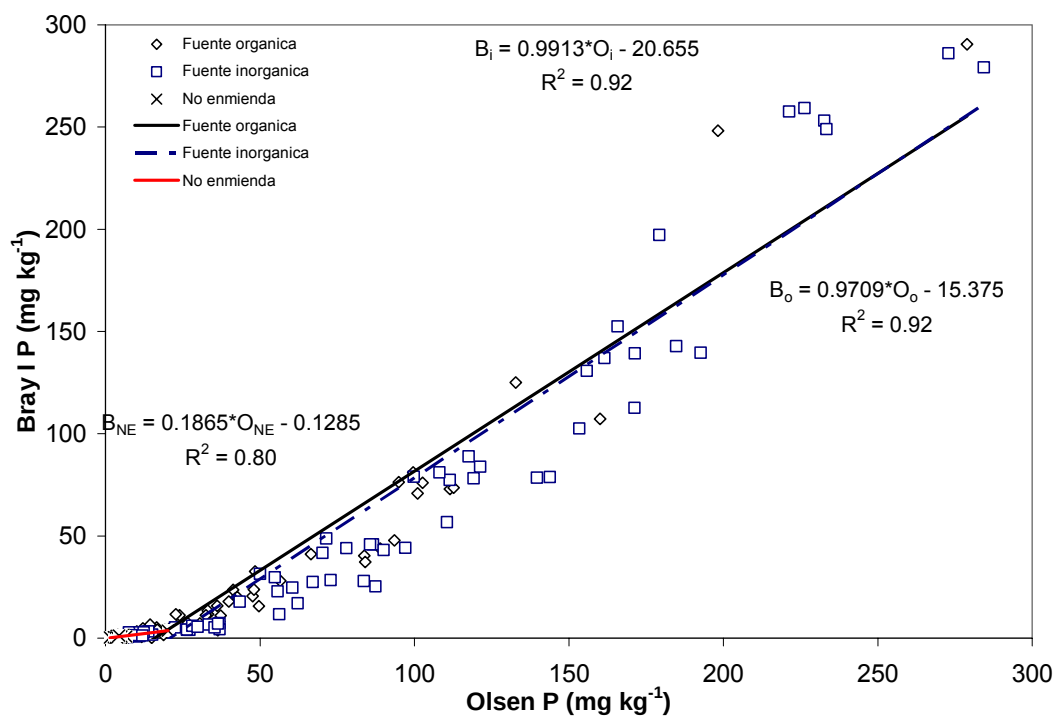


Figura A.11. Relación entre los métodos de extracción Olsen y Bray I, para determinar la prueba de P en predios sin enmienda y enmendados con gallinaza y superfosfato triple

## **ANEXO B. CALIBRACIÓN DEL SIMULADOR DE LLUVIA**

El presente documento formó parte del desarrollo metodológico del proyecto de investigación “Transporte de fósforo y de sedimentos en escorrentía bajo simulación de lluvia” y resume el procedimiento de calibración utilizado para determinar las necesidades de descarga y presión, que garantizaron la aplicación continua de lluvia simulada con una intensidad de  $70 \text{ mm hr}^{-1}$  a diferentes alturas de aplicación, usando el modelo Tlaloc 3000 rainfall simulator.

### **Descripción general del sistema**

La válvula y los accesorios que permitieron el flujo de agua fueron montados sobre una estructura de aluminio de 3.05 m (10 ft) en cada una de sus dimensiones, siendo cubiertas sus caras con lonas que limitan el flujo de viento (cortavientos). Fue usada como fuente de suministro para el simulador, una llave de registro que permitió el flujo de agua del tanque de almacenamiento de la Finca Laboratorio Alzamora en Mayagüez, con un caudal de  $24 \text{ L min}^{-1}$  y una presión aproximada de 15 psi. En un principio se consideró que la fuente cubría las necesidades de volumen de agua requeridas, ya que superó el valor sugerido por recomendaciones técnicas de investigadores, la cual determina un flujo óptimo de  $14 \text{ L min}^{-1}$  ( $233 \text{ mL s}^{-1}$ ) para alcanzar una intensidad de 70 mm/hr.

### **Metodología y análisis**

Se evaluó la intensidad y la uniformidad de la lluvia aplicada sobre 2 parcelas continuas, cada una de 2 m largo por 1 m de ancho orientada la mayor dimensión en el sentido de la pendiente. Se ubicaron 36 recipientes con

diámetro de 11 cm y espaciados a 38 cm entre el centro de cada uno de ellos. Se aplicó agua durante un periodo de 10 minutos y se procedió a determinar el volumen recolectado en cada uno de los recipientes. Se modificó la presión de flujo desde 2 psi (lbf pg<sup>-2</sup>) hasta 5 psi y con ello el volumen de agua que pasó por la boquilla estuvo entre 116.3 mL s<sup>-1</sup> (6.98 L min<sup>-1</sup>) y 227.3 mL s<sup>-1</sup> (13.7 L min<sup>-1</sup>) (Tabla B.1).

Tabla B.1. Relación entre el flujo y la presión a través de la boquilla montada en el simulador

| <b>Presión<br/>(psi)</b> | <b>Flujo<br/>(L m<sup>-1</sup>)</b> | <b>Flujo<br/>(mL s<sup>-1</sup>)</b> |
|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 2.0                      | 6.977                               | 116.28                               |
| 2.5                      | 9.245                               | 156.25                               |
| 3.0                      | 10.526                              | 175.43                               |
| 3.5                      | 11.11                               | 185.17                               |
| 4.0                      | 11.538                              | 192.30                               |
| 4.5                      | 12.5                                | 208.33                               |
| 5.0                      | 13.636                              | 227.27                               |
| 5.5                      | 15.349                              | 255.82                               |

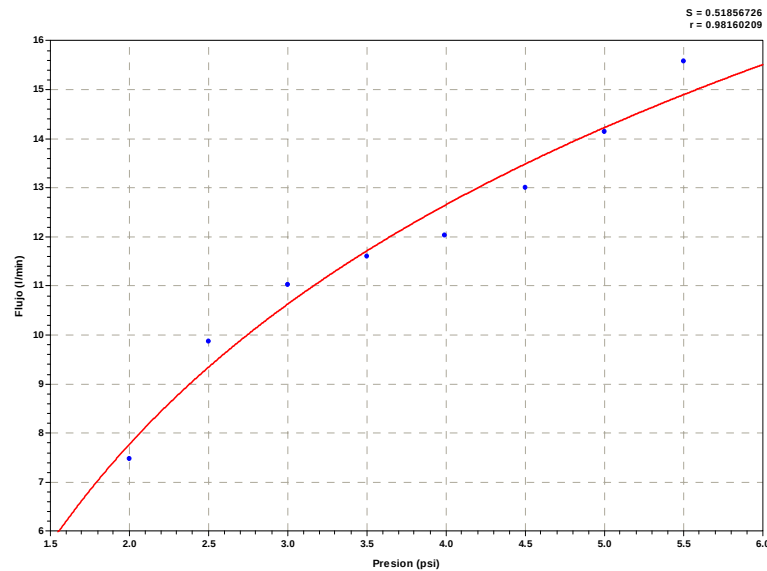


Figura B.1. Relación entre el flujo y la presión a través de la boquilla montada en el simulador

La lluvia simulada fue aplicada a través de una boquilla FullJet 1/2HH-SS50WSQ (Spraying Systems Co., Wheaton, IL). Se realizó la evaluación a 3 diferentes alturas 2.5 m (8 ft), 2.9 m (9.5 ft) y 3.05 m (10 ft) sobre el suelo para alcanzar velocidad terminal.

Diferentes metodologías pueden ser utilizadas para el cálculo del coeficiente de uniformidad, entre ellas esta la propuesta por Christiansen y el método del  $Q_{25}$ . El primero de ellos se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$CU_C = 100 [(1 - \sum |X_i - X_m|) \div X_m]$$

Donde:

$CU_C$  = Coeficiente de uniformidad de Christiansen

$|X_i - X_m|$  Representan, en valor absoluto, las desviaciones con relación a la media  $X_m$  del agua captada por  $n$  pluviómetros.

La metodología del  $CU_{(Q25)}$  se obtiene aplicando un la determinación de la relación que existe entre el cuantil inferior de las muestras obtenidas y el valor promedio de las mismas.

$$CU_{(Q25)} = ( X_{25} / X_m ) * 100$$

Donde:

$X_{25}$  = Media de 25 % de observaciones de valor más bajo

$X_m$  = La media del agua captada por n pluviómetros

Tabla B.2. Coeficiente de uniformidad de la aplicación de lluvia simulada para 3 alturas diferentes de la boquilla

| Presión<br>(psi) | 8 ft          |                   | 9.5 ft        |                   | 10 ft         |                   |
|------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|
|                  | $CU_C$<br>(%) | $CU_{Q25}$<br>(%) | $CU_C$<br>(%) | $CU_{Q25}$<br>(%) | $CU_C$<br>(%) | $CU_{Q25}$<br>(%) |
| 2.0              | 30            | 13                | 63            | 49                | 67            | 64                |
| 2.5              | 49            | 46                | 62            | 66                | 76            | 65                |
| 3.0              | 65            | 74                | 69            | 75                | 78            | 69                |
| 3.5              | 77            | 82                | 77            | 80                | <b>82</b>     | <b>83</b>         |
| 4.0              | 81            | 84                | 81            | 81                | 85            | 84                |
| 4.5              | 80            | 84                | 83            | 83                | 87            | 86                |
| 5.0              | 83            | 81                | 82            | 84                | 89            | 83                |

Para las alturas evaluadas, los valores del coeficiente de uniformidad de aplicación de agua por parte de la boquilla, describieron la mejor distribución para presiones entre 4 y 4.5 psi, situación similar a la encontrada por Shelton et al (1985), quienes mencionaron que bajo una presión de regulación de la boquilla cercana a 4 psi, se generaron gotas de lluvia con un tamaño, una velocidad y energía de impacto aproximadas a las de la precipitación natural y una mejor distribución de la lluvia simulada, representado en el valor del

coeficiente de uniformidad. Sharpley et al (2001) bajo una presión de 4.1 psi consiguió una uniformidad de 80%.

En cada una de las alturas de posicionamiento de la boquilla evaluadas, la intensidad de la lluvia simulada presenta siempre un comportamiento descendente cuando la presión alcanza valores superiores a 3.0 psi. Similar comportamiento se presenta manteniendo la presión constante mientras varía la altura de posicionamiento de la boquilla.

Tabla B.3. Intensidad promedio obtenida en el área de la parcela a diferentes presiones para tres alturas diferentes de la boquilla.

| Presion<br>(psi) | 8 ft                  | 9.5 ft                | 10 ft                 |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                  | Intensidad<br>(mm/hr) | Intensidad<br>(mm/hr) | Intensidad<br>(mm/hr) |
| 2.0              | 98.8                  | 104.2                 | 100.1                 |
| 2.5              | 110.1                 | 110.2                 | 112.5                 |
| 3.0              | 111.5                 | 98.5                  | 97.2                  |
| 3.5              | 108.0                 | 91.2                  | 88.4                  |
| 4.0              | 105.75                | 88.8                  | 85.2                  |
| 4.5              | 103.12                | 86.1                  | 83.1                  |
| 5.0              | 101.9                 | 84.2                  | 80.8                  |

La calibración del simulador para obtener la presión de flujo ideal, no arrojó resultados favorables, ya que el volumen de agua asumido correspondía a la suma de los volúmenes captados en cada uno de los 36 recipientes. Se procedió a construir un colector del área de la parcela de simulación ( $2 \text{ m}^2$ ), a fin de obtener el volumen real de lluvia simulada sobre el área neta de captación. Bajo esta condición se obtuvo una curva de calibración para cada localidad (Figuras 2.1 y 3.1).

# ANEXO C. PRESENCIA DE Ca EN EL SUELO ENMENDADO CON SFT

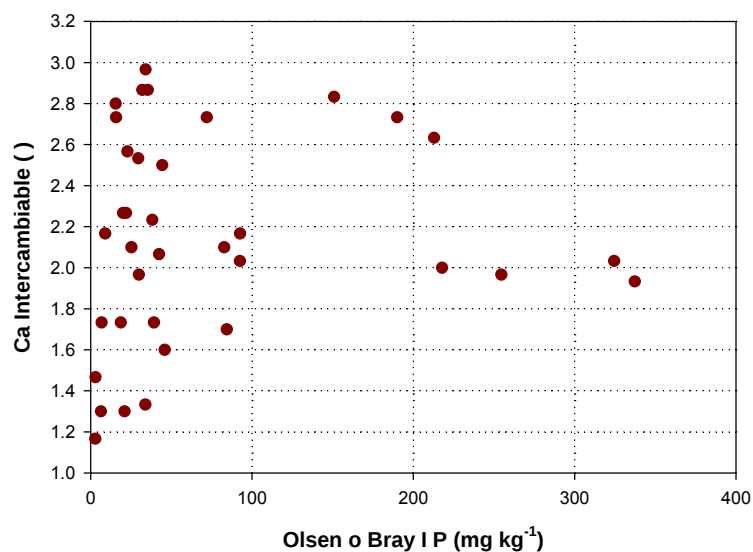


Figura C.1. Relación entre la prueba de P en el suelo y la concentración de Ca intercambiable.

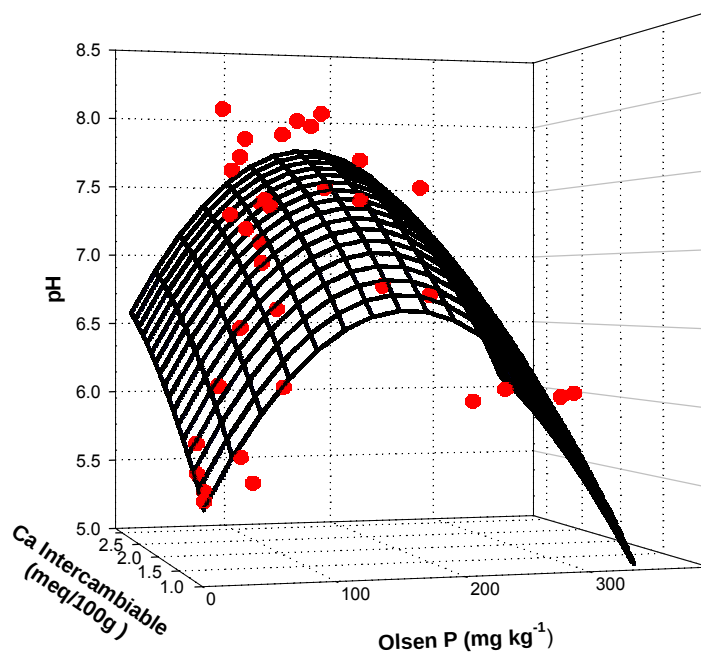


Figura C.2. Relación entre la prueba de P en el suelo Olsen, la concentración de Ca intercambiable y el pH.

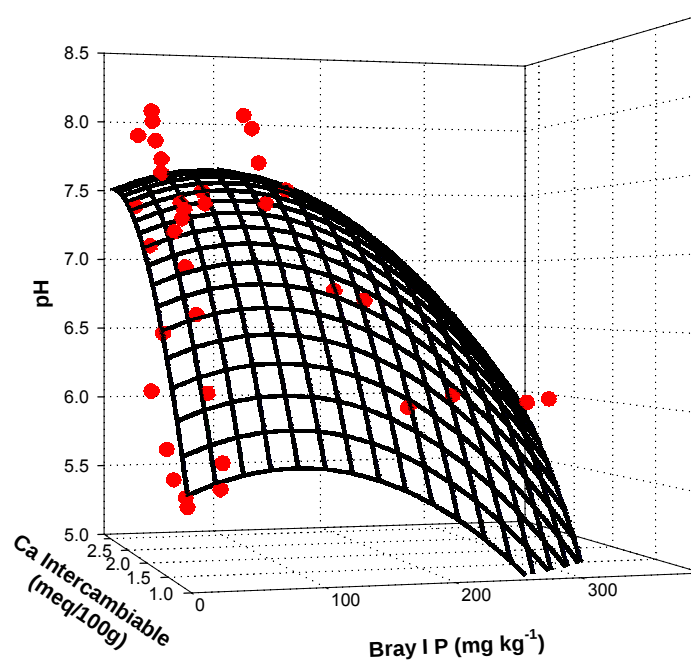


Figura C.3. Relación entre la prueba de P en el suelo Bray I, la concentración de Ca intercambiable y el pH.

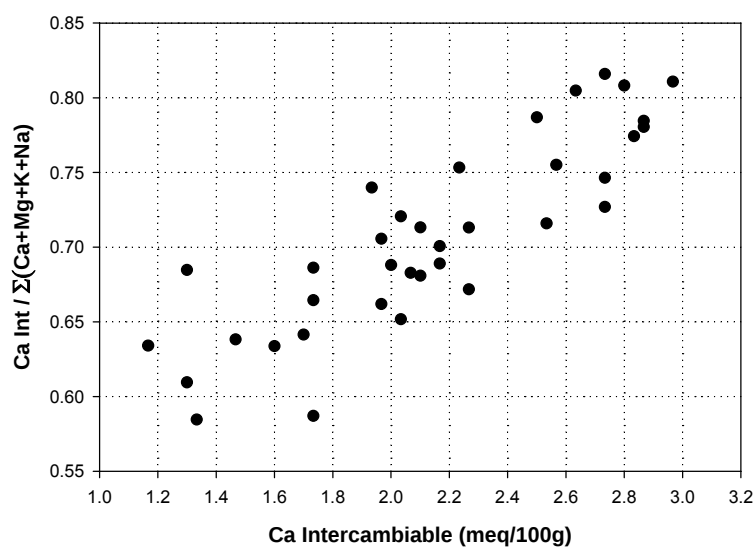
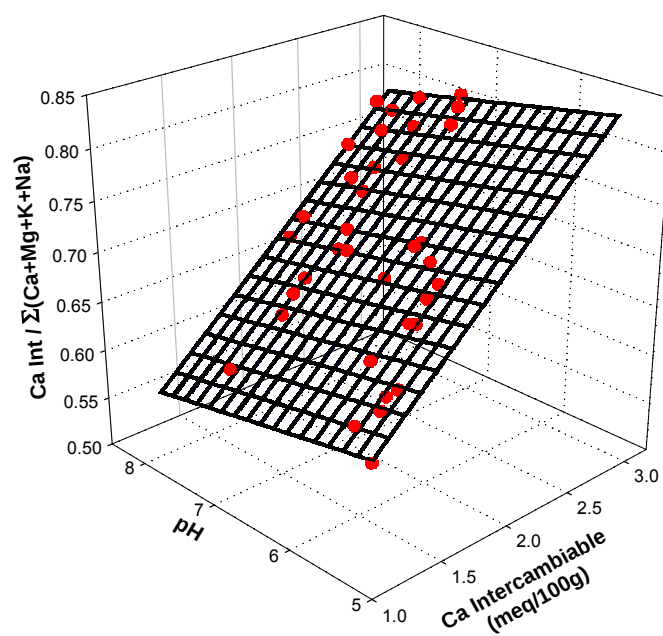


Figura C.4. Relación entre la concentración de Ca intercambiable y la suma de cationes intercambiables.



●  $[\text{Ca Int} / \Sigma(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K}+\text{Na})] = 0.5499 + 0.1261 \cdot \text{Ca} - 0.0165 \cdot \text{pH}$   
 $R^2 = 0.77$

Figura C.5. Relación entre la concentración de Ca intercambiable, el pH y el %Ca intercambiable.

## ANEXO D. EFECTO DE VARIABLES TOPOGRÁFICAS E HIDROLÓGICAS SOBRE RELACIÓN DP/TP EN ESCORRENTÍA

Se evaluó el efecto de factores topográficos e hidrológicos del suelo sobre la fracción DP/TP para predios enmendados con superfosfato triple (SFT) (Figura D.1.). Una mayor cobertura de la superficie del suelo incrementó la fracción disuelta de fósforo (DP) en la escorrentía, esto debido a que una mayor cobertura de la superficie reduce la dispersión y arrastre partículas en suspensión en la escorrentía, condición que limita la readsorción de P por los sedimentos suspendidos (SS). Una mayor cobertura del suelo también reduce la lámina de escorrentía, factor que reduciría la concentración de la fracción de P, por efecto de dilución.

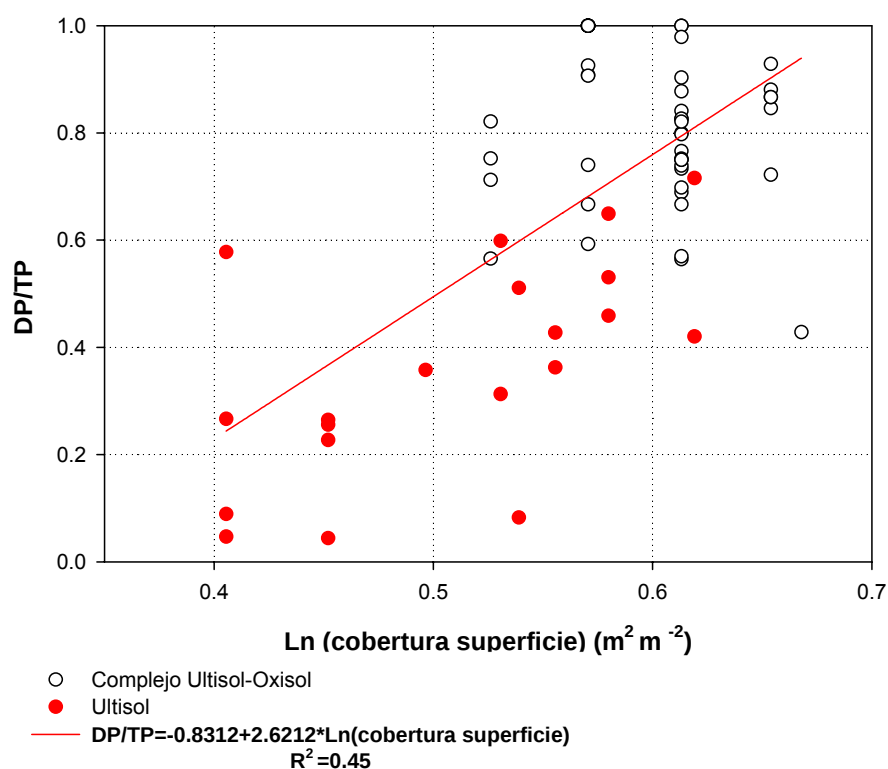


Figura D.1. Relación entre el grado de cobertura de la superficie del suelo y la fracción DP/TP en la escorrentía para dos suelos de Puerto Rico

El incremento en el contenido de humedad antecedente del suelo ( $Q$ ) reduce la fracción relativa de la concentración de DP en la escorrentía. Un suelo con mayor contenido de humedad, permite un mayor volumen de escorrentía, permitiendo un efecto de dilución de DP. También hay un leve incremento en la concentración de SS, condición que reduce la fracción DP.

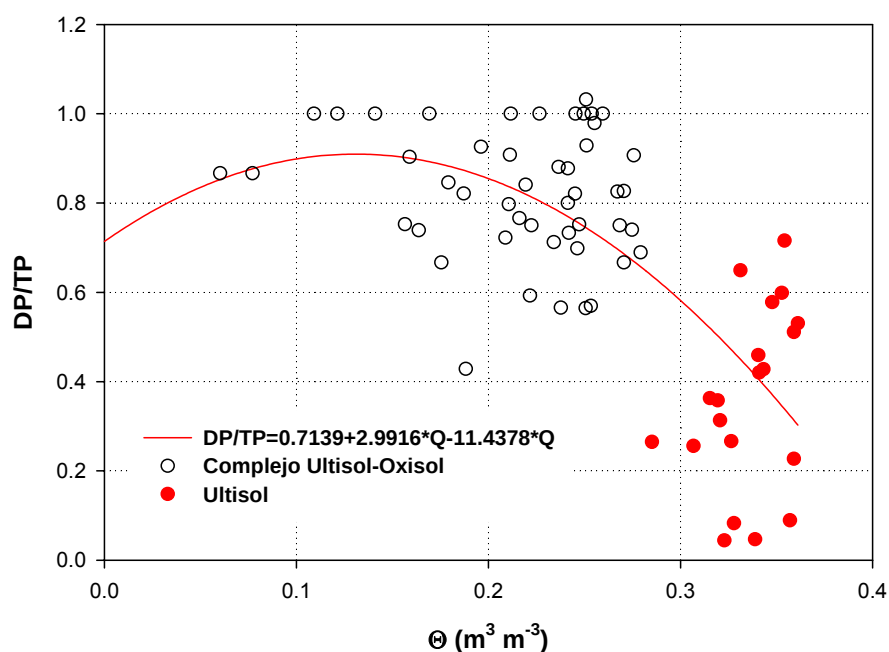


Figura D.2. Relación entre el contenido de humedad antecedente del suelo y la fracción DP/TP en la escorrentía para dos suelos de Puerto Rico

El grado de inclinación de un terreno favorece el tiempo de respuesta y el volumen de escorrentía superficial, con ello una mayor concentración de SS. El incremento en la pendiente de un terreno, reduce la fracción porcentual de DP respecto de la concentración total de P (TP) en la escorrentía.

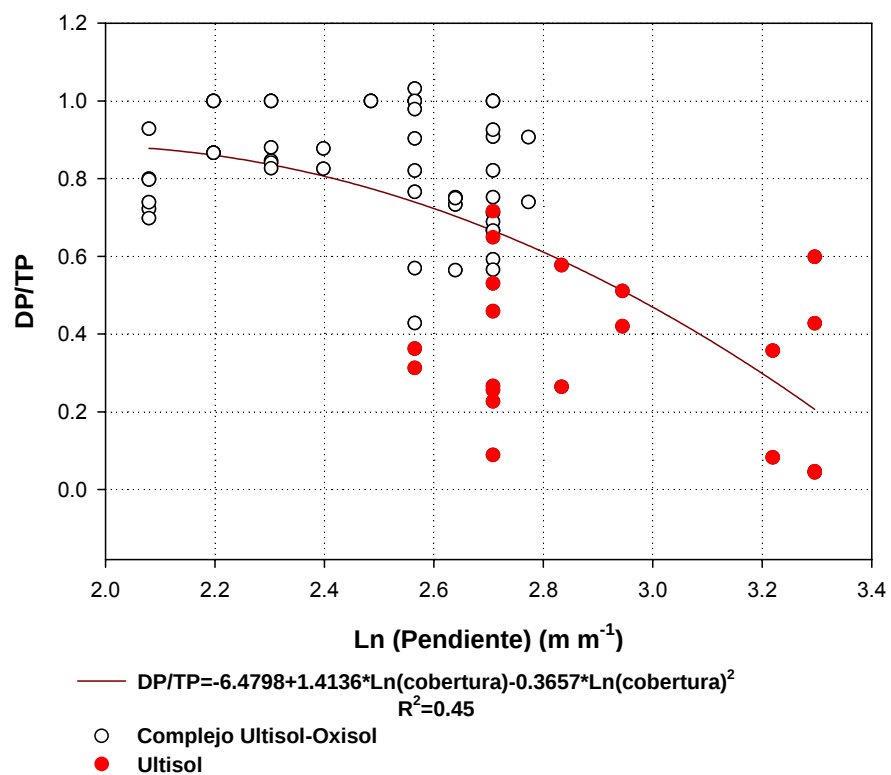


Figura D.3. Relación entre la pendiente del terreno y la fracción DP/TP en la escorrentía para dos suelos de Puerto Rico

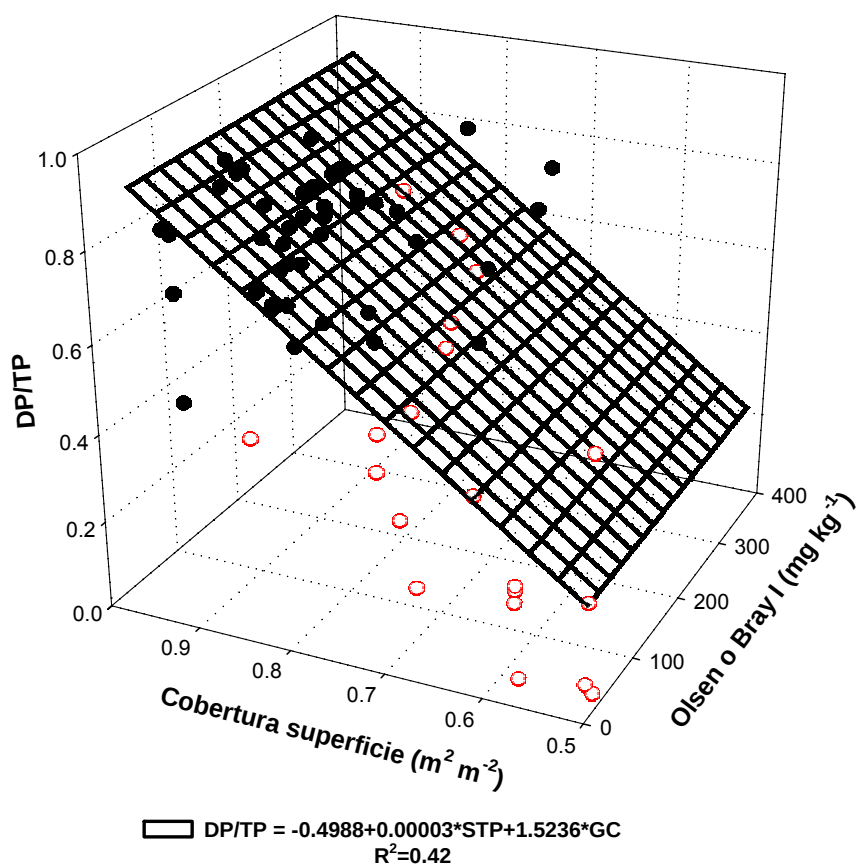


Figura D.4. Relación entre la prueba de P del suelo, el grado de cobertura de la superficie del suelo y la fracción DP/TP en la escorrentía para dos suelos en Puerto Rico

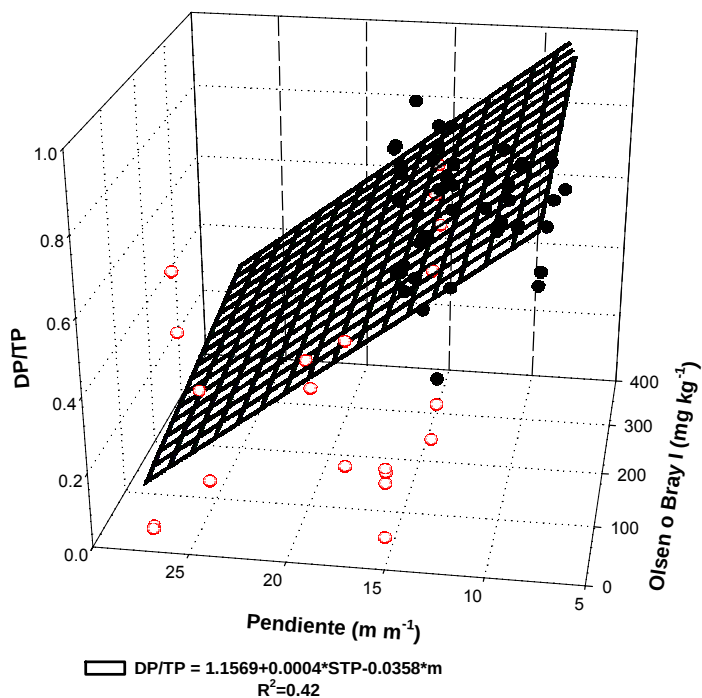


Figura D.5. Relación entre la prueba de P en el suelo, la pendiente y la fracción DP/TP en la escorrentía para dos suelos en Puerto Rico

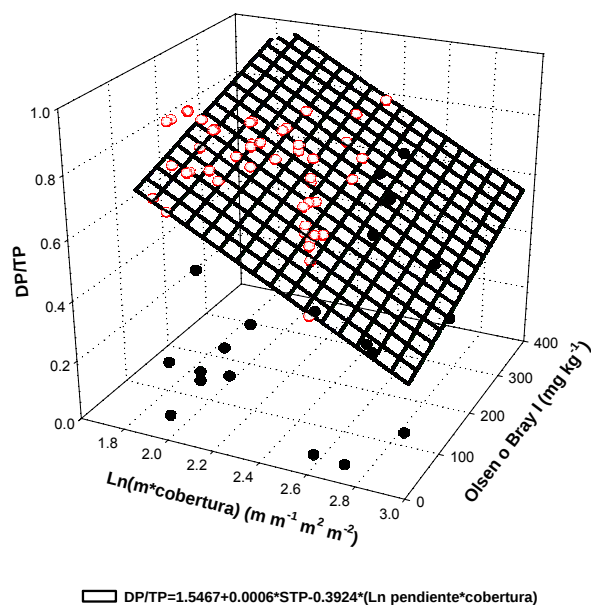


Figura D.6. Relación entre la prueba de P en el suelo, la pendiente, la cobertura y la fracción DP/TP en la escorrentía para dos suelos en Puerto Rico

## ANEXO E. PÉRDIDA DE P EN PREDIOS CON ENMIENDA RECIÉN APLICADA

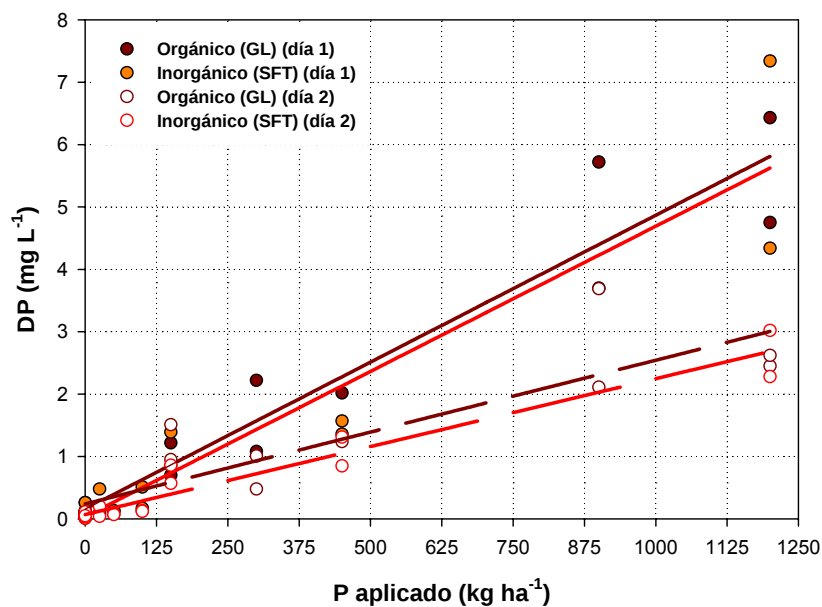


Figura E.1. Relación entre la cantidad de P orgánico (GL) e inorgánico (SFT) aplicado y la concentración de DP en la escorrentía.

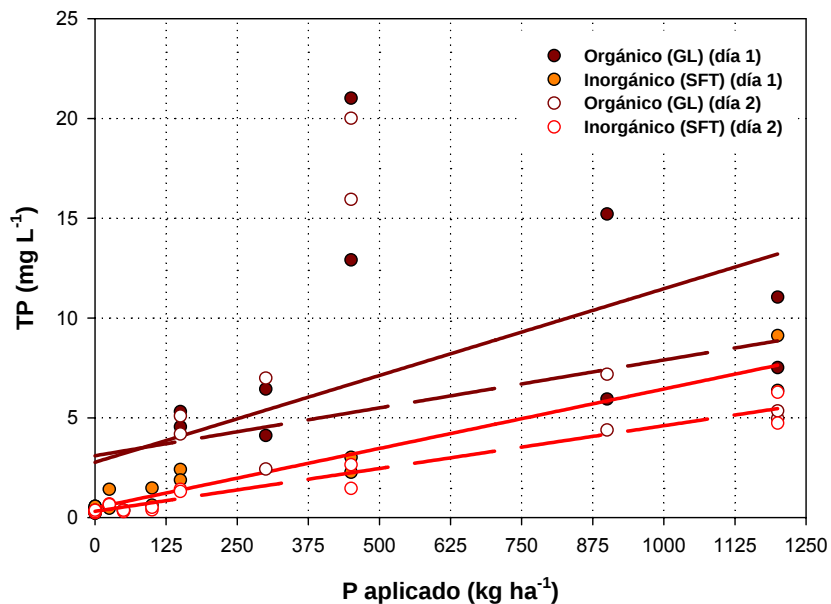


Figura E.2. Relación entre la cantidad de P orgánico (GL) e inorgánico (SFT) aplicado y la concentración de DP en la escorrentía.

Tabla E.1. Concentración promedio de P y SS en la escorrentía tras 30 minutos de flujo, para cada tipo de enmienda

| Parámetro                | Día 1  |        |        | Día 2  |         |        |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
|                          | T      | SFT    | GL     | T      | SFT     | GL     |
| DP (mg L <sup>-1</sup> ) | 0.11 a | 0.67 a | 4.34 b | 0.05 a | 0.42 a  | 3.04 b |
| TP (mg L <sup>-1</sup> ) | 0.41 a | 1.43 a | 9.13 b | 0.30 a | 0.97 a  | 7.30 b |
| DP/TP ( )                | 0.26   | 0.40   | 0.45   | 0.18 a | 0.35 ab | 0.39 b |
| SS (g L <sup>-1</sup> )  | 0.30 a | 0.39 a | 1.49 b | 0.26 a | 0.30 a  | 1.20 b |

Valores seguidos de la misma letra en una fila no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de la fuente de enmienda

Tabla E.2. Parámetros hidrológicos generados a una intensidad de 70 mm h<sup>-1</sup>.

| Parámetro                 | Día 1   |         |        | Día 2  |       |        |
|---------------------------|---------|---------|--------|--------|-------|--------|
|                           | T       | SFT     | GL     | T      | SFT   | GL     |
| Tiempo de respuesta (min) | 11.60 b | 8.71 ab | 3.36 a | 4.03 * | 4.33  | 2.17 * |
| Duración del evento (min) | 41.6 b  | 38.7 ab | 33.4 a | 34.0 * | 34.3  | 32.2 * |
| Escorrentía (E) (mm)      | 25.96   | 27.36   | 33.61  | 21.98  | 21.48 | 32.84  |
| ( $\Theta$ ) (%)          | 27 a    | 28 a    | 33 b   | 31 a   | 31 a  | 35 b   |
| Relación E/P (%)          | 0.47 a  | 0.50 a  | 0.84 b | 0.65   | 0.69  | 0.90   |

Valores seguidos de la misma letra en una fila no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de la fuente de enmienda. Valores seguidos de \* para una misma fuente de enmienda presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto del día de simulación.

Tabla E.3. Descarga promedio de P y SS en la escorrentía tras 30 minutos de flujo, para cada tipo de enmienda

| Parámetro                 | Día 1   |          |           | Día 2   |          |           |
|---------------------------|---------|----------|-----------|---------|----------|-----------|
|                           | T       | SFT      | GL        | T       | SFT      | GL        |
| DP (g ha <sup>-1</sup> )  | 20.48 a | 162.84 a | 1414.47 b | 12.65   | 126.71   | 1071.20   |
| TP (g ha <sup>-1</sup> )  | 95.55 a | 342.26 a | 2949.99 b | 78.78 a | 287.48 a | 2518.14 b |
| SS (kg ha <sup>-1</sup> ) | 73.12 a | 87.35 a  | 499.70 b  | 68.29 a | 78.13 a  | 415.80 b  |

Valores seguidos de la misma letra en una fila no presentan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) por efecto de la fuente de enmienda.

Tabla E.4. Parámetros de regresión entre la concentración de DP y TP en la escorrentía y la tasa de aplicación de enmienda.

| Día 1              |                                 |                | Día 2                          |                |
|--------------------|---------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|
| Fuente de Enmienda | Ecuación                        | R <sup>2</sup> | Ecuación                       | R <sup>2</sup> |
| GL                 | $DP = 0.1562 + 0.0047 \cdot O$  | 0.93           | $DP = 0.2389 + 0.0023 \cdot O$ | 0.80           |
| SFT                | $DP = 0.00341 + 0.0047 \cdot I$ | 0.90           | $DP = 0.0684 + 0.0022 \cdot I$ | 0.94           |
| GL                 | $TP = 2.7714 + 0.0087 \cdot O$  | 0.40           | $TP = 3.0979 + 0.0048 \cdot O$ | 0.92           |
| SFT                | $TP = 0.4838 + 0.0060 \cdot I$  | 0.40           | $TP = 0.3107 + 0.0043 \cdot I$ | 0.94           |

## ANEXO F. FORMATOS

**“Transporte de fósforo y sedimentos bajo simulación de lluvia y flujo superficial”**



Parcela No. \_\_\_\_ - Simulación No. \_\_\_\_ - Fecha \_\_\_\_ - Hora \_\_\_\_

Presión \_\_\_\_\_ psi - Aforo \_\_\_\_\_ l/m - P \_\_\_\_\_ ppm

| Humedad Inicial | Parcela 1 | Parcela 2 |
|-----------------|-----------|-----------|
| Medición 1      |           |           |
| Medición 2      |           |           |
| Medición 3      |           |           |
| Peso húmedo     |           |           |
| Peso seco       |           |           |

Inicio de esorrentía Parcela 1 \_\_\_\_\_

Inicio de esorrentía Parcela 2 \_\_\_\_\_

| Tiempo después de iniciar esorrentía | Tiempo (min) | Parcela 1 (Kg) | Parcela 2 (Kg) |
|--------------------------------------|--------------|----------------|----------------|
| 1'                                   |              |                |                |
| 2'                                   |              |                |                |
| 3'                                   |              |                |                |
| 4'                                   |              |                |                |
| 5'                                   |              |                |                |
| 6'                                   |              |                |                |
| 7'                                   |              |                |                |
| 8'                                   |              |                |                |
| 9'                                   |              |                |                |
| 10'                                  |              |                |                |
| 11                                   |              |                |                |
| 12'                                  |              |                |                |
| 13'                                  |              |                |                |
| 14'                                  |              |                |                |
| 15'                                  |              |                |                |

| Tiempo después de iniciar esorrentía | Tiempo (min) | Parcela 1 (Kg) | Parcela 2 (Kg) |
|--------------------------------------|--------------|----------------|----------------|
| 16'                                  |              |                |                |
| 17'                                  |              |                |                |
| 18'                                  |              |                |                |
| 19'                                  |              |                |                |
| 20'                                  |              |                |                |
| 21'                                  |              |                |                |
| 22'                                  |              |                |                |
| 23'                                  |              |                |                |
| 24'                                  |              |                |                |
| 25'                                  |              |                |                |
| 26                                   |              |                |                |
| 27'                                  |              |                |                |
| 28'                                  |              |                |                |
| 29'                                  |              |                |                |
| 30'                                  |              |                |                |

| Tiempo (min) | Parcela 1 (Kg) | Parcela 2 (Kg) |
|--------------|----------------|----------------|
|              |                |                |
|              |                |                |
|              |                |                |
|              |                |                |

|               | Parcela 1 | Parcela 2 |
|---------------|-----------|-----------|
| Pluviógrafo 1 |           |           |
| Pluviógrafo 2 |           |           |
| Pluviógrafo 3 |           |           |

Observaciones \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Evaluación de uniformidad y volumen de agua

Presión

psi

Registro

Ubicación de boquilla

m

Hora Inicio

Hora Finaliza

Tiempo de prueba

min

Espaciamiento filas

Espaciamiento columnas

Comentarios

Volumen de agua (ml)

|   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 |   |   |   |   |   |   |
| 2 |   |   |   |   |   |   |
| 3 |   |   |   |   |   |   |
| 4 |   |   |   |   |   |   |
| 5 |   |   |   |   |   |   |
| 6 |   |   |   |   |   |   |
| 7 |   |   |   |   |   |   |
| 8 |   |   |   |   |   |   |

**ANEXO G. PARÁMETROS DE CORRELACIÓN LINEAL ENTRE DP Y LA PRUEBA DE SUELO OLSEN Y BRAY I**  
**SERIE HUMATAS-CONSUMO-DAGUEY (COMPLEJO ULTISOL-OXISOL)**

| Día | Tiempo de<br>escorrentía | OLSEN     |        |                   |                | BRAY I    |                   |                |
|-----|--------------------------|-----------|--------|-------------------|----------------|-----------|-------------------|----------------|
|     |                          | Parámetro |        | Error<br>estándar | R <sup>2</sup> | Parámetro | Error<br>estándar | R <sup>2</sup> |
| 1   | 10                       | int       | 0.0459 | 0.0927            | 0.8            | 0.372     | 0.0649            | 0.84           |
|     |                          | pend      | 0.0092 | 0.0007            |                | 0.01      | 0.0007            |                |
|     | 20                       | int       | 0.0995 | 0.0669            | 0.79           | 0.3253    | 0.0432            | 0.85           |
|     |                          | pend      | 0.0064 | 0.0005            |                | 0.0072    | 0.0005            |                |
|     | 30                       | int       | 0.0942 | 0.0452            | 0.84           | 0.2816    | 0.0325            | 0.87           |
|     |                          | pend      | 0.0056 | 0.0004            |                | 0.0062    | 0.0004            |                |
| 2   | 10                       | int       | 0.2056 | 0.0894            | 0.41           | 0.3501    | 0.074             | 0.39           |
|     |                          | pend      | 0.0035 | 0.0006            |                | 0.0035    | 0.0006            |                |
|     | 20                       | int       | 0.1562 | 0.0654            | 0.52           | 0.2874    | 0.0551            | 0.49           |
|     |                          | pend      | 0.0032 | 0.0004            |                | 0.0031    | 0.0005            |                |
|     | 30                       | int       | 0.1513 | 0.0602            | 0.45           | 0.257     | 0.0503            | 0.42           |
|     |                          | pend      | 0.0027 | 0.0004            |                | 0.0027    | 0.0005            |                |

**PARÁMETROS DE CORRELACIÓN LINEAL ENTRE DP Y LA PRUEBA DE SUELO OLSEN Y BRAY I PARA EL  
SERIE HUMATAS (ULTISOL) – ENMIENDA ORGÁNICA**

| Día | Tiempo de<br>escorrentía | OLSEN     |         |                   |                | BRAY I    |                   |                |
|-----|--------------------------|-----------|---------|-------------------|----------------|-----------|-------------------|----------------|
|     |                          | Parámetro |         | Error<br>estándar | R <sup>2</sup> | Parámetro | Error<br>estándar | R <sup>2</sup> |
| 1   | 10                       | int       | -0.3344 | 0.1872            | 0.87           | 0.0358    | 0.1225            | 0.91           |
|     |                          | pend      | 0.0204  | 0.0025            |                | 0.0135    | 0.0013            |                |
|     | 20                       | int       | -0.3923 | 0.2994            | 0.76           | -0.0316   | 0.1807            | 0.86           |
|     |                          | pend      | 0.0214  | 0.0041            |                | 0.015     | 0.002             |                |
|     | 30                       | int       | -0.1205 | 0.1567            | 0.72           | 0.0366    | 0.1234            | 0.80           |
|     |                          | pend      | 0.0156  | 0.0022            |                | 0.0112    | 0.0013            |                |
| 2   | 10                       | int       | -0.526  | 0.4699            | 0.70           | -0.0622   | 0.3286            | 0.78           |
|     |                          | pend      | 0.029   | 0.0055            |                | 0.0196    | 0.003             |                |
|     | 20                       | int       | -0.4195 | 0.4418            | 0.65           | -0.0288   | 0.316             | 0.74           |
|     |                          | pend      | 0.0247  | 0.0052            |                | 0.0168    | 0.0029            |                |
|     | 30                       | int       | -0.1242 | 0.2314            | 0.66           | 0.0538    | 0.1794            | 0.75           |
|     |                          | pend      | 0.0193  | 0.0033            |                | 0.0141    | 0.0019            |                |

**PARÁMETROS DE CORRELACIÓN LINEAL ENTRE DP Y LA PRUEBA DE SUELO OLSEN Y BRAY I PARA EL  
SERIE HUMATAS (ULTISOL) – ENMIENDA INORGÁNICA**

| Día | Tiempo de<br>escorrentía | OLSEN     |                   |                |      | BRAY I    |                   |                |
|-----|--------------------------|-----------|-------------------|----------------|------|-----------|-------------------|----------------|
|     |                          | Parámetro | Error<br>estándar | R <sup>2</sup> |      | Parámetro | Error<br>estándar | R <sup>2</sup> |
| 1   | 10                       | int       | -0.0878           | 0.3035         | 0.81 | 0.1553    | 0.2617            | 0.83           |
|     |                          | pend      | 0.0131            | 0.0019         |      | 0.0108    | 0.0014            |                |
|     | 20                       | int       | -0.0784           | 0.2812         | 0.8  | 0.116     | 0.2481            | 0.82           |
|     |                          | pend      | 0.0112            | 0.0017         |      | 0.0093    | 0.0013            |                |
|     | 30                       | int       | 0.0157            | 0.1033         | 0.87 | 0.1155    | 0.0909            | 0.88           |
|     |                          | pend      | 0.009             | 0.0008         |      | 0.0077    | 0.0006            |                |
| 2   | 10                       | int       | -0.0981           | 0.2309         | 0.78 | 0.0759    | 0.2035            | 0.80           |
|     |                          | pend      | 0.0092            | 0.0014         |      | 0.0076    | 0.0011            |                |
|     | 20                       | int       | -0.1215           | 0.2325         | 0.75 | 0.039     | 0.2052            | 0.77           |
|     |                          | pend      | 0.0085            | 0.0014         |      | 0.007     | 0.0011            |                |
|     | 30                       | int       | -0.0129           | 0.0989         | 0.82 | 0.0674    | 0.0894            | 0.83           |
|     |                          | pend      | 0.0072            | 0.0008         |      | 0.0061    | 0.0006            |                |

## ANEXO H. FOTOGRAFÍAS



FOTO H.1. Montaje del simulador de lluvia



FOTO H.2. Equipamiento hidráulico del simulador



FOTO H.3. Vista de la estructura del simulador y de la evaluación de uniformidad de la lluvia simulada



FOTO H.4 Construcción de colector para evaluar lámina de lluvia simulada sobre el área neta



FOTO H.5. Evaluación de la lámina neta aplicada sobre una subparcela



Foto H.6. Construcción de canaleta de colección de flujo



FOTO H.7. Establecimiento de parcela para desarrollo de prueba de simulación



FOTO H.8. Vista general de equipo de simulación



FOTO H.9. Muestreo preliminar de una prueba de simulación

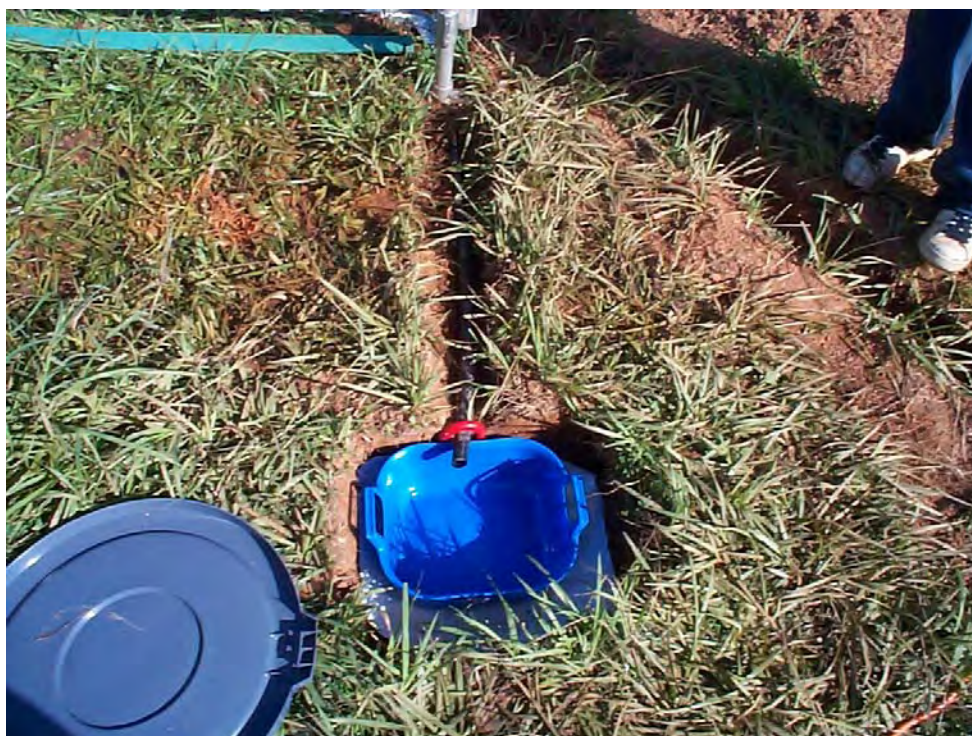


FOTO H.10. Recolección de lluvia simulada



FOTO H.11. Determinación del flujo de esorrentía



FOTO H.12. Acumulación de esorrentía en prueba de simulación



FOTO H.13. Vista general de predios en la EEA Corozal



FOTO H.14. Caracterización taxonómica del suelo en EEA Corozal

# ANEXO I. DESCRIPCIÓN TAXONÓMICA DEL COMPLEJO OXISOL-ULTISOL HUMATAS PEDON DESCRIPTION

**Print Date:** 7/31/2003 **Country:**

**Description Date:** 17/7/2003 **State:** Puerto Rico

**Describer:** **County:** Mayaguez

**Site ID:** **MLRA:**

**Site Note:** **Soil Survey Area:** PR684 -- Mayaguez Area, Puerto Rico  
Western Part

**Pedon ID:** **Map Unit:**

**Pedon Note:**

**Location Description:** West Soil Conservation District, Puerto Rico, Alzamora Farm University of Puerto Rico – RUM.

**Lab Pedon #:** **Legal Description:**

**Soil Name as**

**Described/Sampled:** **Latitude:** 18 degrees 13 minutes 19.4 seconds north  
Humatas

**Soil Name as** **Longitude:** 67 degrees 8 minutes 48.5 seconds west  
**Correlated:**

**Classification:** **Datum:** NAD 83

**Pedon Purpose:** full pedon description

**Taxon Kind:** series

**Associated Soils:**

**Primary Earth Cover:** Grass and herbaceous cover

**Secondary Earth Cover:**

**Existing Vegetation:** Fruit and grass

**Cross Slope Shape:** Convex **Bedrock Fracture Interval:**

**Particle Size Control Section:** **Surface Fragments:**

A - 0 to 2 in.; brown (7.5YR 4/4) clay; weak very fine and medium subangular blocky structure; friable, slightly sticky, slightly plastic; moderately few very fine and fine roots. fine pores.

Ap - 2 to 5 in.; strong brown (7.5YR 4/6) clay; weak very fine and medium subangular blocky structure; friable, slightly sticky, slightly plastic; few fine roots; fine pores.

BT<sub>1</sub> - 5 to 13.5 in.; strong brown (7.5YR 4/6) clay; weak very fine subangular blocky structure; very friable, slightly sticky, slightly plastic; many fine pores; very few patchy clay films.

BT<sub>2</sub> – 13.5 to 22.6 in.; strong brown (7.5YR 5/6) clay; weak very fine subangular blocky structure; very friable, nonsticky, slightly plastic; many fine pores; few (10 percent) patchy clay films.

BT<sub>3</sub> – 22.6 to 27 in.; yellowish red (5YR 5/8) clay; weak very fine subangular blocky structure; friable, nonsticky, slightly plastic; many fine pores; common to many clay films; small amount of saprolite.

BT<sub>4</sub> – 27 to 41 in.; red (2.5YR 5/8) clay; weak fine subangular blocky structure; friable, nonsticky, slightly plastic; many fine pores; many clay films; small amount of saprolite.

C - 41 to 50.5 in.; red (2.5YR 4/8) and light red (2.5 YR 7/8) clay loam??; fine subangular blocky structure; friable, nonsticky, nonplastic; many fine pores.

#### **DAGUEY PEDON DESCRIPTION**

**Print Date:**

7/31/2003

**Country:**

**Description Date:**

17/7/2003

**State:** Puerto Rico

**Describer:**

**County:** Mayaguez

**Site ID:**

**MLRA:**

**Site Note:**

**Soil Survey Area:** PR684 -- Mayaguez Area, Puerto Rico Western Part

**Location Description:** West Soil Conservation District, Puerto Rico, Finca Alzamora - Universidad de Puerto Rico – RUM.

**Soil Name as**

**Described/Sampled:** **Latitude:** 18 degrees 13 minutes 12.7 seconds north Daguey

**Soil Name as**

**Correlated:**

**Longitude:** 67 degrees 8 minutes 51.8 seconds west

**Classification:**

**Datum:** NAD 83

**Pedon Purpose:** full pedon description

**Taxon Kind:** series

**Primary Earth Cover:** Grass and herbaceous cover

**Existing Vegetation:** Fruit and grass

Ap - 0 to 5 in.; reddish brown (5YR 5/4) interior clay and yellowish red (5YR 5/6) clay; moderate fine subangular blocky, and moderate fine granular structure; friable, moderately sticky, moderately plastic; common fine roots throughout.

A - 5 to 8 in.; reddish brown (5YR 4/4) interior clay and reddish brown (5YR 5/4) clay; moderate fine subangular blocky structure; friable, moderately sticky, moderately plastic; few fine roots and few medium roots throughout; few fine tubular pores.

Bt<sub>1</sub> - 8 to 19 in.; (transition) red (2.5YR 4/8) interior clay, dark reddish brown (2.5YR 3/4) clay; moderate medium subangular blocky; friable, moderately sticky, moderately plastic; common fine roots throughout; few fine tubular pores.

Bt<sub>2</sub> - 19 to 27 in.; dark reddish brown (2.5YR 3/4) clay; medium subangular blocky and fine subangular blocky structure; friable to firm, moderately sticky, moderately plastic; few medium roots throughout; common fine tubular pores; more than 20% clay films.

Bt<sub>3</sub> - 27 to 39 in.; red (2.5YR 4/6) clay; moderate medium subangular blocky; friable to firm, hard, moderately sticky, moderately plastic; few fine roots throughout; common fine tubular pores; more than 20% clay films.

Bt<sub>4</sub> - 39 to 53 in.; red (2.5YR 4/6) interior clay, red (2.5YR 5/6) clay; medium subangular blocky, and fine subangular blocky structure; friable to firm, moderately sticky, moderately plastic; few fine roots throughout; few fine tubular pores; more than 20% percent clay.

Bt<sub>5</sub> - 53 to 68 in.; red (2.5YR 4/6) clay; medium subangular blocky structure; friable, moderately sticky, moderately plastic; few fine roots throughout; few fine tubular pores; more than 20% clay films; small amount of saprolite.

Bt<sub>6</sub> - 68 to 88 in.; red (2.5YR 4/6) clay loam??; medium subangular blocky structure; friable, moderately sticky, moderately plastic; few fine roots throughout; few fine tubular pores; more than 20% clay films; 20 - 40% (5YR 7/8) medium and large highly weathered fragments of saprolite.

C > 88 in.; red (2.5YR 4/8) clay loam??; medium subangular blocky structure; friable, moderately sticky, moderately plastic; few fine roots throughout; few fine tubular pores; more than 20% clay films; >40% (5YR 7/8) medium and large highly weathered fragments of saprolite.

## CONSUMO PEDON DESCRIPTION

**Print Date:**

7/31/2003

**Country:****Description Date:**

17/7/2003

**State:** Puerto Rico**Describer:****County:** Mayaguez**Site Note:****Soil Survey Area:** PR684 -- Mayaguez Area, Puerto Rico  
Western Part**Location Description:** West Soil Conservation District, Puerto Rico, Finca  
Alzamora Universidad de Puerto Rico – RUM.**Lab Pedon #:****Legal Description:****Soil Name as****Described/Sampled:** **Latitude:** 18 degrees 13 minutes \*\* seconds north  
Consumo**Soil Name as****Correlated:****Longitude:** 67 degrees 8 minutes \*\* seconds west**Classification:****Datum:** NAD 83**Pedon Purpose:** full pedon description**Taxon Kind:** series**Primary Earth Cover:** Grass and herbaceous cover**Existing Vegetation:** Fruit and grass**Cross Slope Shape:** Convex **Bedrock Fracture Interval:**

Ap - 0 to 3 in.; yellowish red (5YR 4/6) clay; fine subangular blocky structure; friable, slightly sticky, slightly plastic; many fine roots and common medium roots throughout.

Bt<sub>1</sub> - 3 to 9 in.; yellowish red (5YR 5/6) clay; medium subangular blocky structure; friable, slightly sticky, moderately plastic; common fine roots throughout and few medium roots throughout; few fine tubular pores; more than 40% reddish brown (5YR 4/4) clay films; few unspecified fragments.

Bt<sub>2</sub> - 9 to 18 in.; yellowish red (5YR 5/6) clay; moderate medium subangular blocky structure; friable, slightly sticky, moderately plastic; common fine roots throughout and few medium roots throughout; few fine tubular pores; 20% reddish brown (5YR 4/4) clay films; >40% (5YR 7/8) medium and large highly weathered fragments of saprolite.

C - > 18 in. red (5YR 5/6) clay loam??; medium subangular blocky structure; friable, sticky, plastic; few fine roots throughout; few fine tubular pores; more than 20% clay films; >40% (5YR 7/8) medium and large highly weathered fragments of saprolite.

## ANEXO J. DESCRIPCIÓN TAXONÓMICA DEL ULTISOL

### \*\*\* Primary Characterization Data \*\*\* ( COROZAL County, Puerto Rico )

Print Date: August 25, 2004

Pedon ID: S04PR-047-001

Sampled as on January 26, 2004: Humatas ; Very-fine, parasesquic, isohyperthermic Typic Haplohumult  
Revised to :

SSL - Project C2004USPR103 Cabo Rojo, Corozal, San Sebast  
- Site ID S04PR-047-001 Lat: 18° 19' 8.20" north Long: 66° 21' 46.10" west MLRA: 270  
- Pedon No. 04N0611  
- General Methods 1B1A, 2A1, 2B

United States Department of Agriculture  
Natural Resources Conservation Service  
National Soil Survey Center  
Soil Survey Laboratory  
Lincoln, Nebraska 68508-3866

| Layer    | Horizon | Orig Hzn | Depth (cm) | Field Label 1   | Field Label 2 | Field Label 3 | Field Texture | Lab Texture |
|----------|---------|----------|------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| 04N03392 | Ap1     |          | 0-10       | S04PR-047-001-1 |               |               | cl            | c           |
| 04N03393 | Ap2     |          | 10-40      | S04PR-047-001-2 |               |               | c             | c           |
| 04N03394 | Bt1     |          | 40-56      | S04PR-047-001-3 |               |               | c             | c           |
| 04N03395 | Bt2     |          | 56-82      | S04PR-047-001-4 |               |               | c             | c           |
| 04N03396 | Bt3     |          | 82-116     | S04PR-047-001-5 |               |               | c             | c           |
| 04N03397 | BC      |          | 116-158    | S04PR-047-001-6 |               |               | c             | c           |
| 04N03398 | C       |          | 158-200    | S04PR-047-001-7 |               |               | sicl          | c           |

| Calculation Name             | Pedon Calculations | Result | Units of Measure |
|------------------------------|--------------------|--------|------------------|
| LE, Whole Soil, Summed to 1m |                    | 6.5    | cm/m             |

| PSDA & Rock Fragments |            |      |      | -1-                                          | -2-  | -3-  | -4-              | -5-             | -6-                        | -7-    | -8-                        | -9-    | -10-   | -11-   | -12-   | -13-                         | -14- | -15-                             | -16- | -17-  |
|-----------------------|------------|------|------|----------------------------------------------|------|------|------------------|-----------------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|------------------------------|------|----------------------------------|------|-------|
|                       |            |      |      | (- - - - - Total - - - - -)                  |      |      | (- - Clay - - -) |                 | (- - - - - Silt - - - - -) |        | (- - - - - Sand - - - - -) |        |        |        |        | ( Rock Fragments (mm) )      |      |                                  |      |       |
|                       |            |      |      | Clay                                         | Silt | Sand | Fine             | CO <sub>3</sub> | Fine                       | Coarse | VF                         | F      | M      | C      | VC     | (- - - - - Weight - - - - -) |      |                                  |      | >2 mm |
|                       |            |      |      | <                                            | .002 | .05  | <                | <               | .002                       | .02    | .05                        | .10    | .25    | .5     | 1      | 2                            | 5    | 20                               | .1-  | wt %  |
|                       |            |      |      | .002                                         | -.05 | -2   | .0002            | .002            | -.02                       | -.05   | -.10                       | -.25   | -.50   | -1     | -2     | -5                           | -20  | -75                              | 75   | whole |
| Layer                 | Depth (cm) | Horz | Prep | (- - - - - % of <2mm Mineral Soil - - - - -) |      |      |                  |                 |                            |        |                            |        |        |        |        |                              |      | (- - - - - % of <75mm - - - - -) |      | soil  |
|                       |            |      |      | PSDAr1                                       |      |      | PSDAr1           |                 | PSDAr1                     |        | PSDAr1                     | PSDAr1 | PSDAr1 | PSDAr1 | PSDAr1 |                              |      |                                  |      |       |
| 04N03392              | 0-10       | Ap1  | S    | 42.4                                         | 35.9 | 21.7 | 19.0             |                 | 24.8                       | 11.1   | 9.0                        | 9.1    | 3.2    | 0.4    | tr     |                              |      |                                  | 13   |       |
| 04N03393              | 10-40      | Ap2  | S    | 44.6                                         | 34.0 | 21.4 | 18.9             |                 | 24.6                       | 9.4    | 8.3                        | 7.8    | 4.2    | 0.9    | 0.2    |                              |      |                                  | 13   |       |
| 04N03394              | 40-56      | Bt1  | S    | 59.5                                         | 26.4 | 14.1 | 27.2             |                 | 19.3                       | 7.1    | 4.5                        | 5.8    | 2.9    | 0.7    | 0.2    |                              |      |                                  | 10   |       |
| 04N03395              | 56-82      | Bt2  | S    | 63.4                                         | 23.9 | 12.7 | 28.0             |                 | 18.5                       | 5.4    | 4.4                        | 5.5    | 2.1    | 0.6    | 0.1    |                              |      |                                  | 8    |       |
| 04N03396              | 82-116     | Bt3  | S    | 60.3                                         | 28.4 | 11.3 | 27.1             |                 | 23.3                       | 5.1    | 5.0                        | 4.3    | 1.5    | 0.4    | 0.1    |                              |      |                                  | 6    |       |
| 04N03397              | 116-158    | BC   | S    | 46.1                                         | 35.3 | 18.6 | 17.7             |                 | 29.8                       | 5.5    | 6.1                        | 6.4    | 4.7    | 1.3    | 0.1    |                              |      |                                  | 13   |       |
| 04N03398              | 158-200    | C    | S    | 42.6                                         | 36.6 | 20.8 | 15.5             |                 | 29.3                       | 7.3    | 6.8                        | 8.7    | 4.1    | 1.1    | 0.1    |                              |      |                                  | 14   |       |

## \*\*\* Primary Characterization Data \*\*\*

Pedon ID: S04PR-047-001

( COROZAL County, Puerto Rico )

Print Date: August 25, 2004

Sampled As : Humatas

Very-fine, parasesquic, isohyperthermic Typic Haplohumult

USDA-NRCS-NSSC-National Soil Survey Laboratory

; Pedon No. 04N0611

| Water Dispersible PSDA |               |      |      | -1-                                     | -2-  | -3-  | -4-              | -5-             | -6-                | -7-  | -8-                        | -9-    | -10-   | -11-   | -12-   |
|------------------------|---------------|------|------|-----------------------------------------|------|------|------------------|-----------------|--------------------|------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                        |               |      |      | (- - - - - Water Dispersible - - - - -) |      |      |                  |                 |                    |      |                            |        |        |        |        |
|                        |               |      |      | (- - - - - Total - - - - -)             |      |      | (- - Clay - - -) |                 | (- - - Silt - - -) |      | (- - - - - Sand - - - - -) |        |        |        |        |
|                        |               |      |      | Clay                                    | Silt | Sand | F                | CO <sub>3</sub> | F                  | C    | VF                         | F      | M      | C      | VC     |
|                        |               |      |      | <                                       | .002 | .05  | <                | <               | .002               | .02  | .05                        | .10    | .25    | .5     | 1      |
|                        |               |      |      | .002                                    | .05  | .2   | .0002            | .002            | .02                | .05  | .10                        | .25    | .50    | .1     | .2     |
| Layer                  | Depth<br>(cm) | Horz | Prep | (- - - - - % of <2mm - - - - -)         |      |      |                  |                 |                    |      |                            |        |        |        |        |
|                        |               |      |      | PSDAw1                                  |      |      | PSDAw1           |                 | PSDAw1             |      | PSDAw1                     | PSDAw1 | PSDAw1 | PSDAw1 | PSDAw1 |
| 04N03392               | 0-10          | Ap1  | S    | 26.1                                    | 44.1 | 29.8 |                  |                 | 32.6               | 11.5 | 11.4                       | 12.6   | 4.7    | 1.0    | 0.1    |
| 04N03393               | 10-40         | Ap2  | S    | 31.8                                    | 44.4 | 23.8 |                  |                 | 33.1               | 11.3 | 9.7                        | 8.6    | 4.3    | 1.0    | 0.2    |

| Bulk Density & Moisture |               |      |      | -1-                              | -2-   | -3-   | -4-                                 | -5- | -6-   | -7-    | -8-      | -9-   | -10-                               | -11-    | -12-                 | -13-     |
|-------------------------|---------------|------|------|----------------------------------|-------|-------|-------------------------------------|-----|-------|--------|----------|-------|------------------------------------|---------|----------------------|----------|
|                         |               |      |      | (Bulk Density)                   |       | Cole  | (- - - - - Water Content - - - - -) |     |       |        |          |       | WRD                                | Aggst   |                      |          |
|                         |               |      |      | 33                               | Oven  | Whole | 6                                   | 10  | 33    | 1500   | 1500 kPa | Ratio | Whole                              | Stabl   | (- - Ratio/Clay - -) |          |
|                         |               |      |      | kPa                              | Dry   | Soil  | kPa                                 | kPa | kPa   | kPa    | Moist    | AD/OD | Soil                               | 2-0.5mm | CEC7                 | 1500 kPa |
|                         |               |      |      | (- - - g cm <sup>-3</sup> - - -) |       |       | (- - - - - pct of < 2mm - - - - -)  |     |       |        |          |       | cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> % |         |                      |          |
| Layer                   | Depth<br>(cm) | Horz | Prep | DbWR1                            | DbWR1 |       |                                     |     | DbWR1 | WR15b1 |          | ADOD1 |                                    |         |                      |          |
|                         |               |      |      |                                  |       |       |                                     |     |       |        |          |       |                                    |         |                      |          |
| 04N03392                | 0-10          | Ap1  | S    | 1.19                             | 1.52  | 0.085 |                                     |     | 38.0  | 20.8   |          | 1.016 | 0.20                               |         | 0.31                 | 0.49     |
| 04N03393                | 10-40         | Ap2  | S    | 1.29                             | 1.55  | 0.063 |                                     |     | 31.9  | 22.5   |          | 1.016 | 0.12                               |         | 0.23                 | 0.50     |
| 04N03394                | 40-56         | Bt1  | S    | 1.26                             | 1.48  | 0.055 |                                     |     | 33.6  | 27.0   |          | 1.019 | 0.08                               |         | 0.21                 | 0.45     |
| 04N03395                | 56-82         | Bt2  | S    | 1.21                             | 1.46  | 0.065 |                                     |     | 37.6  | 29.1   |          | 1.022 | 0.10                               |         |                      | 0.46     |
| 04N03396                | 82-116        | Bt3  | S    | 1.26                             | 1.52  | 0.065 |                                     |     | 36.0  | 28.5   |          | 1.024 | 0.09                               |         |                      | 0.47     |

|          |         |    |   |      |      |       |  |      |      |  |       |      |  |      |
|----------|---------|----|---|------|------|-------|--|------|------|--|-------|------|--|------|
| 04N03397 | 116-158 | BC | S | 1.38 | 1.51 | 0.030 |  | 29.5 | 22.4 |  | 1.017 | 0.10 |  | 0.49 |
| 04N03398 | 158-200 | C  | S | 1.35 | 1.50 | 0.036 |  | 32.0 | 22.9 |  | 1.019 | 0.12 |  | 0.54 |

### \*\*\* Primary Characterization Data \*\*\*

Pedon ID: S04PR-047-001

( COROZAL County, Puerto Rico )

Print Date: August 25, 2004

Sampled As : Humatas

Very-fine, parasesquic, isohyperthermic Typic Haplohumult

USDA-NRCS-NSSC-National Soil Survey Laboratory

; Pedon No. 04N0611

|               |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Water Content | -1- | -2- | -3- | -4- | -5- | -6- | -7- | -8- | -9- | -10- | -11- | -12- | -13- |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|

|       |            |      |      | (-- Atterberg --)    |        | (- - - - - Bulk Density - - - - -)       |       | (- - - - - Water Content - - - - -) |       |       |                                      |     |     |     |     |     |
|-------|------------|------|------|----------------------|--------|------------------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|-------|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|       |            |      |      | (- - - Limits - - -) |        | Field                                    | Recon | Recon                               | Field | Recon | (- - - - - Sieved Samples - - - - -) |     |     |     |     |     |
|       |            |      |      | LL                   | PI     |                                          | 33    | Oven                                |       | 33    | 6                                    | 10  | 33  | 100 | 200 | 500 |
|       |            |      |      |                      |        |                                          | kPa   | Dry                                 |       | kPa   | kPa                                  | kPa | kPa | kPa | kPa | kPa |
| Layer | Depth (cm) | Horz | Prep | pct <0.4mm           |        | (- - - - - g cm <sup>-3</sup> - - - - -) |       | (- - - - - % of < 2mm - - - - -)    |       |       |                                      |     |     |     |     |     |
|       |            |      |      | AttBg1               | AttBg1 |                                          | DbWR3 | DbWR3                               |       | DbWR3 |                                      |     |     |     |     |     |

|          |         |     |   |    |    |      |      |      |
|----------|---------|-----|---|----|----|------|------|------|
| 04N03392 | 0-10    | Ap1 | S | 52 | 21 | 1.09 | 1.30 | 39.0 |
| 04N03393 | 10-40   | Ap2 | S |    |    | 1.19 | 1.40 | 33.2 |
| 04N03394 | 40-56   | Bt1 | S | 63 | 34 |      |      |      |
| 04N03396 | 82-116  | Bt3 | S | 73 | 37 |      |      |      |
| 04N03398 | 158-200 | C   | S | 55 | 23 |      |      |      |

|                      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Carbon & Extractions | -1- | -2- | -3- | -4- | -5- | -6- | -7- | -8- | -9- | -10- | -11- | -12- | -13- | -14- | -15- | -16- | -17- | -18- |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

|       |       |      |      | (- - - - - Total - - - - -)      |        |        | Org | C/N   | (- - - Dith-Cit Ext - - -) |                                  |     | (- - - - - Acid Oxalate Extraction - - - - -) |      |    |    |                     |                                  | (- - - Na Pyro-Phosphate - - -) |    |    |    |
|-------|-------|------|------|----------------------------------|--------|--------|-----|-------|----------------------------|----------------------------------|-----|-----------------------------------------------|------|----|----|---------------------|----------------------------------|---------------------------------|----|----|----|
|       | Depth |      |      | C                                | N      | S      | C   | Ratio | Fe                         | Al                               | Mn  | Al+½Fe                                        | ODOE | Fe | Al | Mn                  | Si                               | C                               | Fe | Al | Mn |
| Layer | (cm)  | Horz | Prep | (- - - - - % of <2 mm - - - - -) |        |        |     |       |                            | (- - - - - % of < 2mm - - - - -) |     |                                               |      |    |    | mg kg <sup>-1</sup> | (- - - - - % of < 2mm - - - - -) |                                 |    |    |    |
|       |       |      |      | TotNCS                           | TotNCS | TotNCS |     |       | DC1                        | DC1                              | DC1 |                                               |      |    |    |                     |                                  |                                 |    |    |    |

|          |        |     |   |      |       |      |    |     |     |    |
|----------|--------|-----|---|------|-------|------|----|-----|-----|----|
| 04N03392 | 0-10   | Ap1 | S | 2.53 | 0.233 | 0.03 | 11 | 3.3 | 0.3 | -- |
| 04N03393 | 10-40  | Ap2 | S | 1.53 | 0.188 | 0.02 | 8  | 3.4 | 0.4 | -- |
| 04N03394 | 40-56  | Bt1 | S | 0.87 | 0.116 | 0.03 | 7  | 4.0 | 0.6 | -- |
| 04N03395 | 56-82  | Bt2 | S | 0.76 | 0.107 | 0.02 | 7  | 3.8 | 0.5 | -- |
| 04N03396 | 82-116 | Bt3 | S | 0.53 | 0.120 | 0.02 | 4  | 4.3 | 0.7 | -- |

\*\*\* Primary Characterization Data \*\*\*  
( COROZAL County, Puerto Rico )

Very-fine, parasesquic, isohyperthermic Typic Haplohumult

: Pedon No. 04N0611

[illegible]

## \*\*\* Primary Characterization Data \*\*\*

Pedon ID: S04PR-047-001

( COROZAL County, Puerto Rico )

Print Date: August 25, 2004

Sampled As : Humatas

Very-fine, parasesquic, isohyperthermic Typic Haplohumult

USDA-NRCS-NSSC-National Soil Survey Laboratory

; Pedon No. 04N0611

| pH & Carbonates |            |      |      | -1-               | -2-                          | -3-                    | -4- | -5-   | -6-                  | -7-                    | -8-                                     | -9-   | -10-   | -11-                        |
|-----------------|------------|------|------|-------------------|------------------------------|------------------------|-----|-------|----------------------|------------------------|-----------------------------------------|-------|--------|-----------------------------|
|                 |            |      |      | (----- pH -----)  |                              |                        |     |       | (-- Carbonate --)    |                        | (-- Gypsum ---)                         |       |        |                             |
|                 |            |      |      | CaCl <sub>2</sub> |                              | H <sub>2</sub> O       |     | Sat   | As CaCO <sub>3</sub> |                        | As CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O |       | Resist |                             |
| Layer           | Depth (cm) | Horz | Prep | KCl               | 0.01M 1:2 pH <sub>Rou1</sub> | 1:1 pH <sub>Rou1</sub> |     | Paste | Sulf                 | NaF pH <sub>NaF1</sub> | <2mm Carb1                              | <20mm | <2mm   | <20mm ohms cm <sup>-1</sup> |
| 04N03392        | 0-10       | Ap1  | S    |                   | 5.3                          | 5.8                    |     |       |                      | 8.6                    |                                         |       |        |                             |
| 04N03393        | 10-40      | Ap2  | S    |                   | 5.1                          | 5.5                    |     |       |                      | 8.6                    |                                         |       |        |                             |
| 04N03394        | 40-56      | Bt1  | S    |                   | 4.5                          | 5.0                    |     |       |                      | 9.2                    |                                         |       |        |                             |
| 04N03395        | 56-82      | Bt2  | S    |                   | 4.4                          | 4.7                    |     |       |                      | 9.4                    |                                         |       |        |                             |
| 04N03396        | 82-116     | Bt3  | S    |                   | 4.2                          | 4.5                    |     |       |                      | 9.4                    |                                         |       |        |                             |
| 04N03397        | 116-158    | BC   | S    |                   | 4.1                          | 4.4                    |     |       |                      | 9.3                    | tr                                      |       |        |                             |
| 04N03398        | 158-200    | C    | S    |                   | 4.2                          | 4.4                    |     |       |                      | 9.1                    |                                         |       |        |                             |

Phosphorous

|          |            |      |      | (----- Phosphorous -----) |                                   |        |        |        |                  |             |             |                      |  |  |
|----------|------------|------|------|---------------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|------------------|-------------|-------------|----------------------|--|--|
|          |            |      |      | Melanic NZ Index          | Acid Oxal                         | Bray 1 | Bray 2 | Olsen  | H <sub>2</sub> O | Citric Acid | Mehlich III | Extr NO <sub>3</sub> |  |  |
| Layer    | Depth (cm) | Horz | Prep | %                         | (----- mg kg <sup>-1</sup> -----) |        |        |        |                  |             |             |                      |  |  |
|          |            |      |      | NZPRe1                    |                                   | Bray11 |        | POIsn1 |                  |             |             | NO3KC1               |  |  |
| 04N03392 | 0-10       | Ap1  | S    | 33                        |                                   | 1.0    |        | 11.0   |                  |             |             | 0.37                 |  |  |
| 04N03393 | 10-40      | Ap2  | S    | 29                        |                                   | 0.5    |        | 2.0    |                  |             |             | 8.77                 |  |  |
| 04N03394 | 40-56      | Bt1  | S    | 42                        |                                   | 0.1    |        | 0.9    |                  |             |             | 1.96                 |  |  |
| 04N03395 | 56-82      | Bt2  | S    | 50                        |                                   | tr     |        | --     |                  |             |             | 1.18                 |  |  |
| 04N03396 | 82-116     | Bt3  | S    | 53                        |                                   | tr     |        | 1.6    |                  |             |             | 0.27                 |  |  |

04N03397 116-158 BC S 39 0.3 -- 0.26  
 04N03398 158-200 C S 42 0.7 -- 0.55

\*\*\* Primary Characterization Data \*\*\*

Pedon ID: S04PR-047-001

( COROZAL County, Puerto Rico )

Print Date: August 25, 2004

Sampled As : Humatas

Very-fine, parasesquic, isohyperthermic Typic Haplohumult

USDA-NRCS-NSSC-National Soil Survey Laboratory

; Pedon No. 04N0611

| Clay Mineralogy (<.002 mm) |         |      |       | -1-   | -2-  | -3-  | -4-  | -5-  | -6-             | -7- | -8- | -9- | -10- | -11-             | -12-                           | -13-                           | -14- | -15- | -16-               | -17-              | -18-  |     |      |      |
|----------------------------|---------|------|-------|-------|------|------|------|------|-----------------|-----|-----|-----|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|--------------------|-------------------|-------|-----|------|------|
|                            |         |      |       | X-Ray |      |      |      |      | Thermal         |     |     |     |      | Elemental        |                                |                                |      |      | EGME               |                   | Inter |     |      |      |
|                            |         |      |       |       |      |      |      |      |                 |     |     |     |      | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | CaO  | K <sub>2</sub> O   | Na <sub>2</sub> O | Retn  | pre | ta   | tion |
| Layer                      | Depth   | Horz | Fract | Xray1 |      |      |      |      | (----- % -----) |     |     |     |      | (----- % -----)  |                                |                                |      |      | mg g <sup>-1</sup> |                   |       |     |      |      |
| 04N03392                   | 0-10    | Ap1  | tcl   | KK 3  | MM 1 | GE 1 | MI 1 | QZ 1 |                 |     |     |     |      |                  |                                |                                |      |      |                    |                   |       |     | CMIX |      |
|                            |         |      |       | LE 1  |      |      |      |      |                 |     |     |     |      |                  |                                |                                |      |      |                    |                   |       |     |      |      |
| 04N03393                   | 10-40   | Ap2  | tcl   | KK 3  | VR 1 | GE 1 | LE 1 | QZ 1 |                 |     |     |     |      |                  |                                |                                |      |      |                    |                   |       |     | CMIX |      |
| 04N03394                   | 40-56   | Bt1  | tcl   | KK 2  | KH 2 | VR 2 | GE 1 | HE 1 |                 |     |     |     |      |                  |                                |                                |      |      |                    |                   |       |     | CMIX |      |
|                            |         |      |       | QZ 1  |      |      |      |      |                 |     |     |     |      |                  |                                |                                |      |      |                    |                   |       |     |      |      |
| 04N03395                   | 56-82   | Bt2  | tcl   | KH 3  | KK 1 | GE 1 | VR 1 | HE 1 |                 |     |     |     |      |                  |                                |                                |      |      |                    |                   |       |     | CMIX |      |
|                            |         |      |       | QZ 1  |      |      |      |      |                 |     |     |     |      |                  |                                |                                |      |      |                    |                   |       |     |      |      |
| 04N03396                   | 82-116  | Bt3  | tcl   | KH 3  | KK 1 | MM 1 | GE 1 | HE 1 |                 |     |     |     |      |                  |                                |                                |      |      |                    |                   |       |     | CMIX |      |
|                            |         |      |       | QZ 1  |      |      |      |      |                 |     |     |     |      |                  |                                |                                |      |      |                    |                   |       |     |      |      |
| 04N03397                   | 116-158 | BC   | tcl   | KH 3  | KK 1 | MM 1 | GE 1 | HE 1 |                 |     |     |     |      |                  |                                |                                |      |      |                    |                   |       |     | CMIX |      |
|                            |         |      |       | QZ 1  |      |      |      |      |                 |     |     |     |      |                  |                                |                                |      |      |                    |                   |       |     |      |      |
| 04N03398                   | 158-200 | C    | tcl   | KH 2  | GE 1 | KK 1 | MI 1 | HE 1 |                 |     |     |     |      |                  |                                |                                |      |      |                    |                   |       |     | CMIX |      |
|                            |         |      |       | QZ 1  |      |      |      |      |                 |     |     |     |      |                  |                                |                                |      |      |                    |                   |       |     |      |      |

FRACTION INTERPRETATION:

tcl - Total Clay, <0.002 mm

MINERAL INTERPRETATION:

GE - Goethite

HE - Hematite

KH - Halloysite

KK - Kaolinite

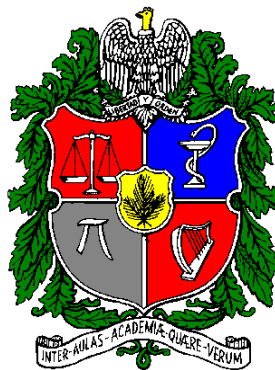
LE - Lepidocrocite

MI - Mica

MM - Montmorillonite-Mica

QZ - Quartz

VR - Vermiculite



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



Un paso más.... aún continúa el camino