

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE CIENCIAS

Tesis para optar al Título de Magister en Ciencias Ambientales

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA
INTENSIFICACIÓN DEL USO DEL SUELO
SOBRE LA EROSIÓN HÍDRICA EN SISTEMAS
AGRÍCOLAS DEL URUGUAY:**

Aplicación del Modelo WEPP

AUTORA: Lic. Biól. Gabriella Jorge

Orientador: Ing. Agr. (PhD) Mario Pérez Bidegain

Coorientador: Dr. Marcel Achkar Borrás

Montevideo - Uruguay

Abril 2012

PÁGINA DE APROBACIÓN

Orientadores:

Ing. Agr. (PhD) Mario Pérez Bidegain
Orientador

Dr. Marcel Achkar Borrás
Coorientador

Tribunal:

Ing. Agr. (PhD) Daniel Panario

Ing. Agr. (PhD) José Terra

Ing. Agr. (PhD) Fernando García Préchac

Autora:

Lic. Biól. Gabriella Jorge

Calificación:

Montevideo- Uruguay- 10 de abril 2012

*A mi madre,
luchadora incansable,
quien me ha enseñado tantas cosas,
y entre ellas a no bajar los brazos para
poder alcanzar las metas que uno se propone.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer...

a mi madre, Nanina, por el incesante apoyo

a mi hija Ailén, por comprenderme

a las abuelas, a mi hermano Gerardo, a Graciela, a Adriana y a Ana Clara, por acompañar a Ailén

a mi familia, por estimularme a siempre seguir avanzando y por bajarme a tierra cuando fue necesario

a la Maestría de Ciencias Ambientales, por la formación que me brindó

a la ANII por financiarme la maestría

a mis orientadores, Mario Pérez y Marcel Achkar, por su paciencia y sus aportes sensatos

a Nicolás Vázquez, por acompañarme en la primer etapa del proceso de investigación y la tediosa recopilación y digitalización de bases de datos.

a Álvaro Califra, Andrés Beretta, Leticia Martínez y Marcelo Ferrando por su apoyo en lo que respecta a temas de edafología, hidrología y manejo de software

a Mariana Hill y Carlos Clérico, por sus aportes y apoyo con las simulaciones de EROSION 5

a John Laflen, Jim Frankemberger y Dennis Flanagan, por asesoramiento frente a las dudas referidas al funcionamiento del modelo WEPP

a José Terra y Marcelo Schusselin, por aportar datos de los ensayos de INIA.

a Oswaldo Ernst, Siri, y Luis Viega, por asesoramiento en cultivos y manejos

a José Furest, Teresa Calistro y Mauricio Ceroni, por facilitarme datos climáticos

a Carolina Munka, Madelaine Renom y Mario Bidegain

a Viveka Sabaj por alentarme y por el apoyo metodológico

a Martín Bollazzi, por el asesoramiento para los análisis estadísticos

a Alice Altesor por leernos el cuento de Borges en su clase de ecología

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	4
HIPÓTESIS y PREDICCIONES	6
OBJETIVOS	7
1. CAPÍTULO 1 Modelación de Escurrimiento, de Erosión y de Variables Climáticas	8
1.1 Ecuación Universal de Pérdida de Suelos.....	9
1.2 WEPP	10
1.3 CLIGEN	16
2. CAPÍTULO 2 Ajuste y validación del modelo WEPP para suelos representativos de la zona agrícola litoral oeste, y lomadas del este del Uruguay.....	19
2.1 Introducción	19
2.1.1 Validación de modelos de escurrimiento y erosión	19
2.1.2 Análisis de Sensibilidad y Calibración	23
2.2 Materiales y métodos.....	26
2.2.1 Sitios.....	26
2.2.2 Medición de escurrimiento y erosión.....	26
2.2.3 Sistemas de uso y manejo	27
2.2.4 Preparación de bases de datos y simulación.....	28
2.2.5 Software.....	30
2.2.6 Análisis Estadísticos	30
2.3 Resultados	32
2.3.1 Escurrimiento y erosión anual media	32
2.3.2 Escurrimiento y erosión anual	36
2.3.3 Eventos de escurrimiento.....	39
2.4 Discusión	41
2.4.1 Precisión de estimación de escurrimiento y erosión anual media previo a un ajuste.....	41
2.4.2 Criterios de ajuste de parámetros	42
2.4.3 Precisión de estimación de escurrimiento y erosión anual media posterior al ajuste.....	44
2.4.4 Dificultades en la estimación del escurrimiento: posibles fuentes de error	45
2.4.5 Precisión de estimación de escurrimiento en parcelas con repeticiones	48

2.4.6	Evaluación de modelos de erosión para Uruguay: herramientas y proyección	49
3.	CAPÍTULO 3 Estimación de la erosión bajo diferentes sistemas de rotaciones con soja en suelos representativos del litoral oeste	52
3.1	Introducción	52
3.1.1	Intensificación del uso de los suelos agrícolas del Uruguay	52
3.1.2	Simulaciones de erosión como herramienta para la toma de decisiones respecto al uso y manejo de los suelos agrícolas del Uruguay	54
3.2	Materiales y métodos.....	57
3.2.1	Sitio	57
3.2.2	Sistema de uso y manejo	58
3.2.3	Preparación de bases de datos y simulación	58
3.2.4	Análisis de datos	60
3.2.5	Software.....	61
3.3	Resultados	62
3.3.1	Evaluación del Generador Climático (CLIGEN)	62
3.3.2	Evaluación de la erosión simulada bajo diferentes sistemas de rotaciones con soja en suelos representativos del litoral oeste	68
3.4	Discusión	74
3.4.1	Evaluación del Generador Climático (CLIGEN)	74
3.4.2	Evaluación de la erosión simulada bajo diferentes sistemas de rotaciones con soja en suelos representativos del litoral oeste.....	75
3.4.3	Evaluación de erosión para Uruguay: dónde y cómo poner el límite	79
	CONCLUSIONES	82
	Resultados y aportes principales de esta Tesis.....	82
	Recomendaciones	84
	BIBLIOGRAFÍA.....	86
	ANEXOS	91

RESUMEN

La intensificación de la agricultura en Uruguay tiene características sin precedentes, con el cultivo de soja como principal protagonista. Este fenómeno aumenta la presión sobre nuestro recurso suelo. Dado el impacto ambiental y económico que genera la erosión, es necesario contar con herramientas de predicción que permitan la planificación del uso y manejo del suelo tendiente a su conservación. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, empleada en Uruguay, es un modelo empírico que estima promedios anuales de erosión. El modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP), sin antecedentes de uso en Uruguay, conceptualiza la erosión en base a los procesos involucrados en el suelo. El objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto en el suelo de diversos manejos de agricultura intensiva en el litoral oeste del Uruguay, aplicando el modelo de erosión WEPP. Para ello se ajustó y validó este modelo para estimaciones de erosión de los suelos representativos de la zona agrícola litoral oeste, y lomadas del este del Uruguay; y se identificaron áreas específicas del modelo que deben ser ajustadas para las condiciones locales. En la evaluación, los manejos con laboreo reducido o soja continua resultaron altamente no sustentables, mientras que las rotaciones con siembra directa y pasturas mostraron valores de erosión menores al valor de tolerancia (T). La erosión anual media y el riesgo de erosión aumentó con el largo y el porcentaje de la pendiente, restringiendo la utilización de ciertas rotaciones a laderas con baja pendiente. Se destaca la potencialidad de la utilización de WEPP en el desarrollo de criterios de evaluación de sustentabilidad del uso y manejo del suelo, alternativos al nivel de tolerancia T de unidades de erosión promedio anual, incluyendo los conceptos de probabilidad de erosión y períodos de retorno. Esto permitirá realizar un análisis más completo del efecto ambiental de este fenómeno.

Palabras Clave: Erosión - WEPP – Soja

INTRODUCCIÓN

La agricultura del Uruguay ha tenido un proceso de intensificación y de expansión hacia zonas marginales, cuyos suelos tienen limitantes en la capacidad de uso para soportar un sistema de agricultura continua, aumentando de esta manera el riesgo de erosión (Terra et al., 2009). El cultivo de soja ha liderado este proceso de intensificación. Si bien en Uruguay el cultivo se realiza en siembra directa y en rotación con otros cultivos, manejos que reducen la erosión, esto en algunas situaciones no es suficiente para mantener la erosión en los límites de tolerancia.

Los efectos de la erosión se manifiestan en el ambiente en su conjunto, no solamente en el suelo que es erosionado (efectos *in situ*), sino también en los cuerpos de agua receptores y a nivel de la atmósfera (efectos fuera del sitio). Los impactos en el sitio comprenden la pérdida o redistribución del suelo dentro de un predio, la pérdida de materia orgánica y de nutrientes así como la degradación de propiedades físicas. Estas condiciones hacen a los suelos más vulnerables a condiciones extremas, de sequía o eventos de lluvia intensos. Los efectos fuera del sitio se deben a los sedimentos transportados aguas abajo, los cuales reducen la capacidad de ríos, arroyos y represas, aumentando el riesgo de inundación y representan una fuente de contaminación difusa. Asimismo, existen efectos a nivel global debido al aporte de CO₂ a la atmósfera a través de la oxidación acelerada de la materia orgánica del suelo, fomentada por la erosión (Morgan 2006).

A fin de evitar o por lo menos mitigar estos impactos la erosión debe ser controlada. Es más sensato, ambientalmente y económicamente, prevenir la erosión en zonas vulnerables, que recuperar zonas ya erosionadas. Surgen las interrogantes de ¿mitigar en qué medida? ¿Cómo y qué cuantificar? Si bien gran parte de las respuestas a estas preguntas surgirán de definiciones éticas y políticas, estas definiciones necesitan el apoyo de herramientas de predicción, modelos de simulación de erosión.

Se espera que estos modelos den estimaciones precisas y que contemplen las variaciones espaciales y temporales que tiene el fenómeno de la erosión. El modelo utilizado en nuestro país actualmente, La Ecuación Universal de Suelos, ofrece estimaciones de promedios anualizados, los cuales han sido útiles para establecer un criterio primario con el foco en la conservación de la productividad del suelo. En la medida que la preocupación ambiental comienza a crecer, y que se reconocen los múltiples efectos de la erosión en el ambiente, surge la necesidad de respuestas más allá de los promedios anuales, incluyendo probabilidades de erosión total anual o probabilidades de eventos de erosión extremos. El modelo WEPP abre una gama nueva de posibilidades ofreciendo respuestas a las preguntas antes planteadas, por lo que su aplicación en nuestro país resulta de gran interés.

La hipótesis general de trabajo manejada fue que la utilización del modelo de simulación de erosión hídrica WEPP permite evaluar el impacto de diferentes sistemas agrícolas respecto a la erosión hídrica producida. Por lo tanto, se plantea como objetivo evaluar el impacto sobre

la erosión hídrica de diversos manejos de agricultura intensiva en el litoral oeste del Uruguay, aplicando el modelo WEPP. Los manejos considerados comprenden rotaciones de cultivos con pasturas en distinta proporción, con mínimo laboreo o con siembra directa. Se espera que este trabajo signifique un aporte en el desarrollo del ajuste de este modelo para su uso en nuestro país, y que contribuya para una mejor estimación de la erosión, que ofrezca más elementos a la hora de la toma de decisión, que redunde en una mejora del cuidado de nuestros suelos y de nuestro ambiente.

Por lo tanto, en esta Tesis, en un primer capítulo se describen los modelos de La Ecuación Universal de Suelos y WEPP y el generador climático CLIGEN (acoplado a WEPP); en el segundo capítulo se ajusta y valida el modelo WEPP para suelos del Uruguay; y en el tercer capítulo se aplica, tomando en cuenta las limitantes, al caso de rotaciones agrícolas con soja en suelos del litoral oeste del Uruguay.

HIPÓTESIS y PREDICCIONES

Hipótesis 1- El modelo WEPP estima eficientemente la erosión de los suelos representativos de la zona agrícola litoral oeste, y lomadas del este del Uruguay.

Predicción 1.1- La erosión simulada con el modelo WEPP será similar a la erosión medida, con un nivel aceptable de error

Predicción 1.2- La erosión simulada con el modelo WEPP presentará una precisión comparable a la erosión estimada con USLE/RUSLE.

Hipótesis 2- El generador climático CLIGEN simula eficientemente el clima del sur del litoral oeste del Uruguay.

Predicción 2.1- Las variables climáticas simuladas con CLIGEN serán similares a las medidas, con un nivel aceptable de error.

Hipótesis 3- El modelo WEPP muestra sensibilidad a la reducción de la erosión producida por los manejos con siembra directa y rotaciones con praderas.

Predicción 3.1- Rotaciones de cultivos que incluyen praderas o siembra directa tendrán menor erosión anual media simulada con WEPP que las rotaciones con cultivos continuos o laboreo reducido, respectivamente.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar el impacto de sistemas agrícolas intensivos que incluyan soja sobre la erosión hídrica de suelos del Uruguay

Objetivos Específicos

1. Ajustar y validar el modelo WEPP para los suelos representativos de la zona agrícola litoral oeste, y lomadas del este del país, y para el caso particular del cultivo de soja, empleando la base de datos existente en Uruguay.
2. Validar el uso del generador climático CLIGEN para el clima del sur del litoral oeste del Uruguay.
3. Estimar la erosión bajo diferentes sistemas de rotaciones con soja en suelos representativos del litoral oeste.

1. CAPÍTULO 1

Modelación de Escurrimiento, de Erosión y de Variables Climáticas

En aquel imperio, el arte de la cartografía logró tal perfección que el mapa de una sola provincia ocupaba toda una ciudad, y el mapa del imperio, toda una provincia.

Con el tiempo, estos mapas desmesurados no satisficieron y los colegios de cartógrafos levantaron un mapa del imperio, que tenía el tamaño del imperio y coincidía puntualmente con él.

Menos adictas al estudio de la cartografía, las generaciones siguientes entendieron que ese dilatado mapa era inútil y no sin impiedad lo entregaron a las inclemencias del sol y los inviernos.

En los desiertos del oeste perduran despedazadas ruinas del mapa, habitadas por animales y por mendigos; en todo el país no hay otra reliquia de las disciplinas geográficas.

"Del rigor en la ciencia", Jorge Luis Borges
Suárez Miranda: Viajes de varones prudentes,
libro cuarto, cap. XLV, Lérica, 1658.

Para poder entender o explicar los fenómenos naturales se ha recurrido históricamente a modelos, los cuales, al simplificar la realidad, facilitan el entendimiento de la misma. Gregory y Walling (1973; en Morgan 2006) clasifican los modelos digitales o matemáticos en tres categorías: los empíricos, los de base física, y los estocásticos.

Los modelos empíricos, establecen relaciones entre datos, basándose en relaciones estadísticamente significativas, más allá de las leyes generales de la física. Los basados en la física, toman en cuenta las leyes de conservación de masa y energía, por lo general a través de la ecuación de continuidad. Utilizan, además, ecuaciones matemáticas para describir los procesos naturales que determinan los valores de las variables de respuesta, en función de las de entrada. Sin embargo, cada una de estas ecuaciones también incluye componentes empíricos. Los modelos estocásticos generan secuencias sintéticas de datos a partir de las características de una muestra de datos existente. Clarke (1973; en Haan et al., 1982) distingue estos últimos de los determinísticos, cuando al menos alguna de las variables es consideradas como aleatoria con distribución probabilística. Según esta clasificación, los dos casos primeros corresponderían a modelos determinísticos. Los modelos estocásticos pueden

resultar útiles para utilizar en combinación con los basados en procesos naturales, en particular cuando sólo hay datos disponibles para una corta ventana temporal.

Al realizar predicciones en sentido determinístico o probabilístico bajo ciertas condiciones, los modelos representan herramientas útiles para los decisores. En el caso del uso y manejo del suelo, los modelos de escurrimiento y erosión pueden auxiliar la toma de decisiones, ya sea a escala de un predio para la operación óptima del sistema, como a escalas más pequeñas para la elaboración de políticas públicas, en el marco del uso sustentable de los recursos. A medida que ha aumentado el conocimiento sobre los procesos que ocurren en el suelo, los modelos de erosión han podido evolucionar de empíricos a físicos, con mayor detalle en las variables de respuesta. No obstante, esta evolución se ve limitada por el incremento en el número y detalle de las variables de entrada que la descripción de los procesos va requiriendo (Haan et al., 1982). Cual lo plantea Borges en “Del rigor de la Ciencia”, no se puede dilatar excesivamente el mapa, sin que ello vaya en detrimento de su utilidad.

En esta tesis se trabajará con un modelo de cada una de las clases descritas por Gregory y Walling, 1973 (en Morgan 2006): un modelo de erosión empírico (Ecuación Universal de Pérdida de Suelos; Wischmeier y Smith, 1978); un modelo de escurrimiento y erosión basado en los procesos físicos (WEPP; Flanagan y Nearing, 1995); y un modelo estocástico de generación de estados del tiempo (CLIGEN; Nicks et al., 1995) desarrollado para ser utilizado en combinación con WEPP. Este primer capítulo abordará una breve descripción del funcionamiento de dichos modelos.

1.1 Ecuación Universal de Pérdida de Suelos

Este modelo empírico se desarrolló, a partir los años 50, en el Laboratorio de Suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (NSRL-USDA), relacionando ciertas variables de precipitación, del suelo y de su manejo, con las pérdidas de suelo por erosión, por medio de análisis de regresión múltiple a partir de resultados de miles de experimentos (Laflen y Moldenhauer, 2003). Ha sido hasta el momento el modelo de erosión más usado en nuestro país y en el mundo.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Wischmeier y Smith, 1978) y su versión revisada, RUSLE (Renard et al., 1997), estiman pérdidas medias de suelo por erosión no encauzada por unidad de superficie y año para períodos largos de tiempo, otorgando como variable de respuesta un promedio de erosión anual. La forma del modelo se presenta en la ecuación 1.1.

$$A = R * K * L * S * C * P \quad [1.1]$$

donde: A es pérdida de suelo por unidad de superficie por año; (unidades $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$); R es el factor erosividad de la lluvia; (unidades $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ año}^{-1}$); K es el factor erodabilidad del suelo; (unidades $\text{Mg hr MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$); L es el factor longitud de pendiente; S es el factor inclinación de la pendiente; C es el factor uso y manejo; y P es el factor prácticas de manejo. Los factores L , S , C , y P son adimensionales, representan la fracción con respecto a un estándar (largo de 22 m, inclinación de 9%, uso y manejo de un suelo desnudo arado a favor de la pendiente).

El factor de erosividad de la lluvia (R) es la energía cinética de la misma por la máxima intensidad de lluvia en 30 minutos y para el cálculo de la erodabilidad se utiliza la ecuación de pedotransferencia 1.2.

$$K = 2.8 \cdot 10^{-7} M^{1.14} (12 - a) + 4.3 \cdot 10^{-3} (b - 2 + 3.3 \cdot 10^{-3} (c - 3)) \quad [1.2]$$

donde M es un parámetro representativo de la granulometría; a es el porcentaje de materia orgánica; b es una codificación de la estructura y c una codificación de las clase de permeabilidad.

Según la revisión realizada por Durán y García Préchac (2007), estos modelos han sido ampliamente validados en Estados Unidos, y en el resto del mundo. En nuestro país se han llevado a cabo varios proyectos de investigación para la validación de cada uno de sus factores (García Préchac 1992; Terra y García Préchac 2001; Clérico y García Préchac 2001; Hill et al., 2008). Si bien el bajo requerimiento de variables de entrada y las interfaces computacionales que facilitan su empleo han popularizado su uso, este modelo presenta ciertas limitantes. Por ejemplo, no puede ser extrapolado a sitios con otras características ya que, al ser empírico, requiere experimentación previa para cada clima, suelo y manejo. Además, la variable de respuesta presenta poco detalle en la escala temporal (al ser un promedio anual para una serie larga de años, no permite realizar estimaciones para eventos puntuales) y la escala espacial (al no tomar en cuenta la sedimentación sólo brinda estimación de la erosión in situ y no de los efectos fuera del sitio; tampoco generaliza los resultados a nivel de cuenca, las estimaciones son sólo para laderas individuales) (Tiwari et al., 2000; Durán y García Préchac 2007). Con el fin de levantar estas limitantes es que se comienza en los años 80, en el mismo laboratorio de USDA, el desarrollo de un modelo con bases físicas que se describe a continuación.

1.2 WEPP

El proyecto de predicción de erosión hídrica del USDA (Water Erosion Prediction Project) culminó con la elaboración de un modelo basado en los procesos que ocurren en el suelo, condicionantes del escurrimiento y la erosión. Este modelo de simulación continua a paso diario, tomó su nombre, WEPP, por la sigla del nombre en inglés del proyecto que lo creó. Predice la erosión laminar y en canalículos, así como la carga y deposición de sedimentos, con su distribución temporal y espacial (Flanagan y Nearing, 1995). Puede emplearse con datos climáticos observados o generados por el generador climático desarrollado para este

modelo, CLIGEN, el cual se describe en la sección siguiente. El modelo WEPP cuenta con un componente de laderas individuales, así como uno de cuencas. Se ha desarrollado, además, una interfase en combinación con el Sistema de Información Geográfica (SIG), denominada GEO-WEPP (Renschler, 2003).

El modo de funcionamiento básico del modelo WEPP es el siguiente: estima diariamente estado del suelo y de la vegetación; si hay precipitación (lluvia o riego), calcula infiltración y escurrimiento; y con ello, calcula desagregación, transporte y deposición del sedimento. . En particular, estima el total de suelo desagregado por la lluvia y por el escurrimiento y lo compara con la capacidad de transporte total de la lluvia y de la escorrentía, si la capacidad de transporte supera el suelo desagregado, habrá erosión, de lo contrario ocurrirá deposición (Flanagan y Nearing, 1995), siguiendo el esquema original de los procesos de erosión hídrica de Meyer y Wischmeier (1969; en Morgan 2006).

Los principales datos de entrada para la versión de ladera son: **de clima** (datos diarios de temperatura máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y punto de rocío); **de precipitación** (lámina total, duración, tiempo al pico máximo de intensidad, relación intensidad pico a intensidad media, calculados a partir de la lámina cada 5, 10 o 15 minutos); **de topografía** (pendiente uniforme, convexa, cóncava o compleja, porcentaje de pendiente para cada punto y para segmentos); **de suelo** (materia orgánica, porcentaje de limo, arena y arcilla para cada profundidad, erodabilidad laminar y encauzada en pequeños canalículos, conductividad hidráulica efectiva en flujo saturado, esfuerzo cortante crítico); **y de manejo** (fechas y tipos de operaciones; la base de datos de operaciones similar al RUSLE y la base de datos de vegetación similar al EPIC, *Erosion-Productivity Impact Calculator*). Algunos de estos datos pueden ser estimados por el modelo empleando distintas funciones de pedotransferencia en base a otros datos del suelo y referidos a bases de datos compiladas por USDA.

Existe la posibilidad de elegir la unidad de tiempo en la que el usuario desea se expresen los datos de salida, pudiendo ser anual, mensual, diario o por un cierto periodo de tiempo. Las principales variables de respuesta que ofrece el modelo para la unidad de tiempo elegida son: estado del suelo y de la biomasa, rendimientos de los cultivos, escurrimiento, pérdida de suelo, cantidad y características del sedimento y ubicación de desagregación y deposición. La información se presenta en forma de tablas y de gráficas.

En el procesamiento de los datos de entrada, el modelo de erosión de WEPP aplica la ecuación de continuidad en estado estacionario, para el transporte de sedimento en los canalículos (ecuación 1.3).

$$\frac{dG}{dX} = D_r + D_i \quad [1.3]$$

donde G es la carga de sedimento; x es la distancia recorrida en la pendiente; D_r es la tasa de desagregación en los canalículos y D_i es la tasa de desagregación entre los canalículos.

La desagregación entre canalículos (*interrill*) sigue la siguiente ecuación:

$$D_i = K_i I q S_f ADJ \quad [1.4]$$

donde K_i es la erodabilidad interrill, I -intensidad de lluvia, q -tasa de escurrimiento, S_f - factor de la pendiente y ADJ -factores de ajuste

La desagregación en los canalículos (*rill*) ocurre cuando la carga de sedimento (G) es menor que la capacidad de transporte de sedimento (T_c) siguiendo la ecuación 1.5; mientras que, hay deposición cuando la carga de sedimento supera la capacidad de transporte de sedimento según la ecuación 1.6.

$$D_r = K_r(\tau_f - TC) \left[1 - \frac{G}{T_c} \right] \quad [1.5]$$

$$D_r = \frac{bV_f}{q}(T_c - G) \quad [1.6]$$

donde τ_f es esfuerzo cortante hidráulico, K_r erodabilidad del rill, TC esfuerzo cortante crítico¹, G carga de sedimento (kg/s m), T_c es capacidad de transporte (kg/m s), V_f -velocidad de caída del sedimento (m/s), q -descarga por unidad de ancho (m²/s), b - coeficiente de turbulencia inducido por la lluvia (0.5 para condiciones de precipitación, 1 para irrigación por goteo).

Finalmente, ocurrirá enriquecimiento de sedimento² debido a una diferencia en la velocidad de deposición de las distintas partículas según su tamaño, respondiendo a la Ley de Stokes (ecuación 1.7).

$$V_s = \frac{2}{9}(\partial p - \partial f) \frac{gR^2}{\mu} \quad [1.7]$$

donde V_s es la velocidad de sedimentación de la partícula o el agregado (m/s), g es gravedad (m/s²), ∂p es la densidad masa de las partículas (kg/m³), ∂f es la densidad masa del fluido(kg/m³), μ es la viscosidad dinámica del fluido (Pa s) y R es el radio de la partícula o agregado de suelo; (m)= .001 Pa s; $\partial p = 2650$ kg/m³ para partículas de suelo, 1600 kg/m³ para agregados, $\partial f=1000$ kg/m³ para el agua; g es 9.8 m/s².

Es decir, que se considera que la desagregación puede ocurrir por precipitación, dependiendo de la energía cinética del golpeteo de las gotas, o por escurrimiento cuando la fuerza que ejerce el flujo sobre el suelo supera la resistencia del mismo.

El transporte del sedimento lo calcula basándose en la ecuación de Yalin (ecuación 1.8) y dependerá de la capacidad de transporte T_c (ecuación 1.9).

$$\frac{T_c}{SG(rt)^{0.5}} = 0.635d \left[1 - \frac{1}{b}(1 + b) \right] \quad [1.8]$$

$$T_c = k_t \tau_f^{\frac{3}{2}} \quad [1.9]$$

donde $d=(Y/Y_c)-1$ (cuando $Y<Y_c$, $d=0$), $b=2.45(SG)0.4Yc0.5d$, $Y=RS/((SG-1)gh)$, SG -gravedad específica de las particular (sin unidades), d -diámetro de la partícula (m), g -aceleración de la gravedad (ms-2), r densidad del

¹ TC es un valor umbral, por debajo del cual no ocurre erosión del suelo.

² El enriquecimiento implica que el flujo termine con una mayor proporción de partículas de arcilla.

agua (kg m^{-3}), t -esfuerzo cortante del flujo (pa), R -radio hidráulico (m), S - pendiente, Y - esfuerzo cortante hidráulico (sin unidades), Y_c (esfuerzo cortante hidráulico al comienzo del movimiento), τ_f -esfuerzo cortante hidráulico, es decir la fuerza que ejerce el flujo sobre el suelo y k_t es el coeficiente de transporte.

Entonces, para que se simule erosión laminar, debe llover con una cierta intensidad y para que se simule erosión en canchales debe existir escurrimiento cuyo esfuerzo cortante supere el esfuerzo cortante crítico del suelo. El modelo simula escurrimiento cuando se dan dos condiciones: en primer lugar, que la tasa de precipitación exceda la de infiltración, y en segundo lugar, que se llene la capacidad de almacenaje por depresión debido a la rugosidad y la pendiente. En el modelo WEPP se asume que el flujo de escorrentía es Hortoniano y sigue la ecuación de Manning (ecuaciones 1.10 y 1.11).

$$V = \frac{1}{2} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S} \quad [1.10]$$

$$Q = VA \quad [1.11]$$

donde V es velocidad media (m/s), n -coeficiente de rugosidad de Manning, R -radio hidráulico ($R=A/WP$ donde A -sección transversal del flujo (m^2) y WP -perímetro húmedo (m), S -pendiente del canal (m/m), Q -tasa de flujo (m^3/s).

Otro supuesto para este modelo es que la infiltración ocurre en forma de pistón según la ecuación de Green-Ampt con las modificaciones realizadas por Mein-Larson (GAML) según lo presenta Chu (1978, en Stone et al., 1995), con factores que determinan si se genera encharcamiento para una intensidad de lluvia dada. La tasa de infiltración (f) se calcula según la ecuación 1.12.

$$f = K_e \left(1 + \frac{N_s}{F} \right) \quad [1.12]$$

donde K_e es conductividad hidráulica efectiva (mm/h), N_s el potencial de matriz efectivo (mm) y F la infiltración acumulada (mm).

La variable clave en este caso es la conductividad hidráulica efectiva (K_e), definida como tasa de infiltración final en estado estacionario dado encharcamiento de la microtopografía, y cuyo valor básico (el parámetro K_b) es constante para cada suelo al depender de sus características, como ser el contenido de arena, de arcilla y la capacidad de intercambio catiónico³ (ver ecuaciones 1.13 y 1.14). Físicamente, el valor de K_b debería ser el valor aproximado de K_e para el primer evento de lluvia luego de un laboreo de un suelo en barbecho (Alberts, et al., 1995). Este valor básico se va ajustando de manera continua por otras variables relativas al cultivo y al manejo del suelo. Esto mismo sucede con los valores de las variables de erodabilidad en y entre canchales y del esfuerzo cortante crítico (valor umbral, por debajo del

³ La capacidad de intercambio catiónico es un indicador indirecto de la conductividad hidráulica, ya que refleja la proporción de materia orgánica y de los tipos de arcilla presentes en el suelo, los cuales afectan directamente a la conductividad hidráulica.

cual no ocurre erosión del suelo), cuyos valores básicos (los parámetros K_{ib} , K_{rb} y TC_b), estimados a partir del contenido de arcilla, de arenas muy finas y de materia orgánica de cada suelo, son constantes en el tiempo (ver ecuaciones 1.15 a 1.20). Sin embargo, los valores de los parámetros son multiplicados en el modelo a paso diario, por factores de ajuste, que dependen de la cobertura, las raíces muertas y vivas, el sellado y encostrado, la pendiente y el congelado, entre otras barbecho (Alberts, et al., 1995).

Las estimaciones de K_b (mm/h) se realizan utilizando la ecuación 1.13 para suelos con contenido de arcilla menor o igual a 40%, y la ecuación 1.14 para suelos con contenido de arcilla mayor a 40%. Si el contenido de arena del suelo es mayor o igual a 30%, el modelo utiliza las ecuaciones 1.15, 1.16 y 1.17 para las estimaciones de K_{rb} , K_{ib} y TC_b , respectivamente; de lo contrario se utilizan las ecuaciones 1.18, 1.19 y 1.20 (Alberts et al., 1995).

$$K_b = -0.265 + 0.0086(100Ar)^{1.8} + 11.46CIC^{-0.75} \quad [1.13]$$

$$K_b = 0.0066e^{\left[\frac{2.44}{Ac}\right]} \quad [1.14]$$

$$K_{rb} = 0.00197 + 0.030Arm f + 0.03863e^{-184MO} \quad [1.15]$$

$$K_{ib} = 2728000 + 19210000Arm f \quad [1.16]$$

$$TC_b = 2.67 + 6.5Ac - 5.8Arm f \quad [1.17]$$

$$K_{rb} = 0.0069 + 0.134e^{-20Ac} \quad [1.18]$$

$$K_{ib} = 6054000 - 5513000Ac \quad [1.19]$$

$$TC_b = 3.5 \quad [1.20]$$

donde Ar es el contenido de arena en porcentaje; CIC es la capacidad de intercambio catiónico (en meq/100g; debiendo ser siempre mayor a 1meq/100g); Ac es la fracción del contenido de arcilla (se utiliza un valor máximo de 0.4 en ec. 2.11; se utiliza un valor mínimo de 0.1 en ec. 2.12); $Arm f$ es la fracción del contenido de arenas muy finas (se utiliza como valor máximo 0.4 en ec. 2.9; se utiliza un valor mínimo de 0.4 en ec. 2.8 y 2.10); y MO es la fracción del contenido de materia orgánica del suelo (se utiliza un valor mínimo de 0.0035 en ec. 2.8).

El modelo WEPP ha sido validado en Estados Unidos, el país donde fue desarrollado, (Ghidey y Alberts, 1996; Tiwari et al., 2000; Laflen et al., 2004; Rachman et al., 2008; Williams et al., 2010), y en el resto del mundo en países como China (Shen et al., 2009); India (Pandey et al., 2009; Verma, et al., 2010); Australia (Yu et al., 2003); Reino Unido (Brazier et al., 2000); Francia (Raclot y Albergel 2006); Italia (Pieri et al., 2007); España (Soto y Diaz-Fierros, 1998); Brasil (Maria et al., 2001; Gonçalves 2008; Amorim et al., 2010; dos Santos et al., 2010); y Chile (Stolpe, 2005). En Uruguay el trabajo con WEPP es aún incipiente (Jorge et al., 2010) y están realizándose varias tesis de maestría en torno a su validación y aplicación a nuestras condiciones.

Desde su lanzamiento, las sucesivas investigaciones y procesos de validación han permitido la evolución del modelo, habiéndosele introducido mejoras en los métodos de estimación de los parámetros de infiltración y erosión (Tiwari et al., 2000). Sin embargo, y a pesar de su

condición de estar basado en procesos físicos, la mayoría de los autores coinciden con que es necesaria la calibración de ciertos parámetros determinados como sensibles (K_b , K_{ib} , K_{rb} y TC_b ; Nearing et al., 1990 y Tiscareno-López et al., 1993) para obtener estimaciones locales de escurrimiento y erosión aceptables (Maria et al., 2001; Stolpe, 2005; Pieri et al., 2007; Rachman et al., 2008; Gonçalves 2008; Shen et al., 2009; Pandey et al., 2009; Verma, et al., 2010; Williams et al., 2010; Amorim et al., 2010; dos Santos et al., 2010 y Jorge et al., 2010). En el capítulo 2 se presenta una discusión más detallada respecto a la calibración y validación del modelo.

El modelo WEPP posee ventajas desde el punto de vista de su aplicabilidad en estudios ambientales. En primer lugar, se destaca el hecho de estar enfocado en los procesos de escurrimiento y de erosión-sedimentación. Esto permite estimar la erosión a nivel de cuencas enteras y, además de simular la pérdida de suelo y degradación del mismo, calcular la producción de sedimento que es aportada a los cauces. Así, se pueden estimar otros efectos ambientales, que ocurren a consecuencia de la erosión, vinculados a la calidad del agua (efectos fuera del sitio). Los sedimentos en sí mismos representan una fuente de modificación del ambiente (régimenes de inundación, represas, dragado para navegación), pero además lo son, los químicos o nutrientes que pueden ir adsorbidos a ellos. En este sentido, se cuenta con rutinas de transporte de nutrientes que se han anexado al modelo WEPP (Pérez Bidegain et al., 2010) y el modelo ofrece potencial para un mayor desarrollo en esta línea. En segundo lugar, se destaca el detalle a nivel de escala temporal que ofrece la salida del modelo, permitiendo estimar la erosión para períodos cortos, llegando a eventos individuales, por lo que da cuenta de la variabilidad inter e intra-anual, pudiendo calcularse probabilidades de eventos extremos. Finalmente, el generador climático de este modelo, ofrece un potencial para estudiar efectos sobre el escurrimiento y la erosión del suelo, de distintas prácticas de manejo del suelo y los cultivos en un contexto de cambio climático (Boardman y Favis-Mortlock, 2001; Prusky y Nearing, 2002; Yu et al., 2005).

No obstante, existen restricciones en el tamaño de las cuencas modeladas, las cuales no deberían superar 260ha (Ascough II et al., 1995) aunque con calibración, el modelo se ha utilizado fuera de estos rangos (Amore et al., 2004 en Pandey et al., 2009). Por otro lado, existen limitaciones en lo que respecta al régimen hídrico, entre ellas, el hecho de considerar al flujo superficial únicamente como Hortoniano y a la infiltración en modo de pistón, según la ecuación de GAML (Stone et al., 1995). En general, el componente de hidrología superficial no es tan preciso para eventos pequeños como lo es para los grandes, además de que desde el punto de vista matemático tiene la predisposición a sobre-estimar pequeñas pérdidas de suelo y sub-estimar las grandes (Nearing, 1998). Asimismo, el alto requerimiento de variables de entrada puede resultar un impedimento para la correcta aplicación de este modelo, sobre todo en países como el nuestro, que no cuenta con bases de datos demasiado extensas, ni grandes presupuestos para la experimentación. Finalmente, como se ha visto en los estudios mencionados anteriormente, el modelo WEPP tampoco puede ser extrapolado con confianza, a otros sitios con tipos de suelos y climas diferentes, sin previa calibración o medición de los parámetros reportados como sensibles. Un camino para levantar estas limitantes es a través de un incremento en la investigación, que provea mayor cantidad de

datos de entrada y que a su vez, también aporte elementos para refinar las ecuaciones que reflejan los procesos sito-específicos que ocurren en el suelo. Otra vía es apostar a una línea alternativa de modelación de erosión con modelos estocásticos (Wirtz et al., 2011). El modelo WEPP es determinístico en su esencia, mas cuenta con un componente estocástico en lo que refiere al clima cuando se utiliza el generador climático CLIGEN (del inglés: *Climate Generator*).

1.3 CLIGEN

El generador climático CLIGEN fue desarrollado por el departamento de Agricultura de Estados Unidos, en primera instancia para ser utilizado en el modelo WEPP (Nicks et al., 1995), aunque hoy en día, su uso se ha ampliado hacia otros modelos como ser SWAT y RUSLE (Kou, 2007). Este modelo provee estados del tiempo para cada día, creando valores diarios de precipitación, temperaturas máximas y mínimas, radiación solar y velocidad y dirección del viento. Se desarrolló en base a los generadores utilizados en EPIC (del inglés: *Erosion Productivity Impact Calculator*; Williams et al., 1984; en Nicks et al., 1995) y SWRRB (del inglés: *Simulator for Water Resources in Rural Basins*; Williams et al., 1985; en Nicks et al., 1995), a cuyos métodos se le agregaron requerimientos adicionales con el fin de modelar la distribución de intensidad de lluvia. Este factor es sumamente influyente sobre el escurrimiento y la erosión, y en particular para las simulaciones realizadas por el modelo WEPP, que representa la infiltración según la ecuación de Green-Ampt (ver sección anterior, 2. *WEPP*).

A continuación se describe el modo en que CLIGEN genera las variables diarias de precipitación. El número y distribución de los eventos de precipitación se generan en base a un modelo de cadena de Markov de dos estados, para lo cual se requieren las probabilidades de lluvia para un día dado, según si el día anterior fue seco (α) o lluvioso ($1-\beta$). Dada la condición inicial de que el día previo fue seco o lluvioso, el modelo determina estocásticamente si ocurre precipitación al día siguiente, generando un número aleatorio entre el 0,0 y el 1,0, el cual se compara con las probabilidades α y $1-\beta$, respectivamente. Si el número aleatorio es menor o igual a las probabilidades respectivas, el modelo simula lluvia para ese día; de lo contrario la precipitación es cero.

Los días en los que ocurre precipitación, la lámina total (R) es modelada según una distribución normal asimétrica correspondiente a cada mes (ecuación 1.13; Nicks et al., 1995).

$$x = \frac{6}{g} \left\{ \left[\frac{g}{2} \left(\frac{R - \mu}{s} \right) \right]^{1/3} + 1 \right\} + \frac{g}{6} \quad [1.13]$$

donde x es la desviación normal estándar; R es la cantidad de precipitación diaria; μ es la media de las láminas diarias para cada mes; g es coeficiente de asimetría de las láminas diarias para cada mes.

Por consiguiente, el generador requiere como datos de entrada las medias mensuales de precipitación diaria con su desvío estándar y el coeficiente de asimetría. La distribución de intensidad es modelada según una función exponencial doble, con punto de inflexión al tiempo de la intensidad pico (r_p , ecuación 1.14), cuya distribución acumulada en 12 intervalos es requerida como variable de entrada (Zhang y Garbrecht, 2003):

$$r_p = -2R \ln(1 - \alpha_{0.5}) \quad [1.14]$$

donde R es la lámina total diaria y $\alpha_{0.5}$ es la razón entre la máxima lámina en media hora y R.

Asimismo, la duración (D) de cada evento individual es estimada en base al valor de entrada de la precipitación máxima en 30 minutos (max.5) y es generada de una distribución gama (Zhang y Garbrecht, 2003):

$$D = -0.5\Delta / \ln(1 - \alpha_{0.5}) \quad [1.15]$$

donde Δ se ha tomado los valores de 4.607 y 9.21y últimamente ha sido calibrado a 3.99 para la versión v5.107 (Yu, 2000 en Zhang y Garbrecht, 2003) y $\alpha_{0.5}$ es la razón entre la máxima lámina en media hora y R.

Las otras variables climáticas son generadas a partir funciones de distribuciones normales, por lo cual son requeridos como datos de entrada la media y el desvío estándar mensuales de los valores diarios de cada una a partir de una serie temporal larga. Si la temperatura máxima del día es menor a cero grado Celsius ($0^\circ C$), de ocurrir precipitación, ésta podrá ser simulada en forma de nieve. Esto no debería ser el caso para nuestro país, en el cual los eventos de nevada son extremadamente raros, en particular cerca de la costa (Renom, *com. pers.*).

Tras varias evaluaciones iniciales del modelo CLIGEN (Johnson et al., 1996; Headrick y Wilson, 1997; ambos en Zhang y Garbrecht, 2003), se le han introducido varias modificaciones (Flanagan et al., 2001). Evaluaciones más recientes, sugieren reconsiderar las fórmulas para el cálculo de la precipitación diaria y del largo y distribución de las tormentas (Zhang y Garbrecht, 2003; Zhang et al., 2008). No obstante, este modelo ha sido validado por varios trabajos: para Australia su desempeño ha sido calificado como razonablemente bueno, aunque en este caso se encontró un error sistemático que lleva a una sobre-estimación de la intensidad de lluvia en eventos de corta duración (Yu, 2003); en Uganda los estadísticos de los datos observados y simulados fueron similares, a excepción de los desvíos estándar (Elliot y Arnold, 2000); de manera general ha mostrado buen desempeño en estudios realizados en Brasil (Adão, 2006); se validó para China, al encontrarse que sus estimaciones de precipitación son de un nivel aceptable (Kou, 2007).

La utilización de CLIGEN hace posible realizar estimaciones de erosión en sitios para los cuales no se cuenta con bases de datos climáticos extensas, lo cual suele ser bastante común para los países del sur. Además, habilita a la proyección de erosión para escenarios de cambio climático, con variaciones en los regímenes de precipitación y aumentos en la frecuencia de los eventos extremos y la intensidad de la lluvia (Prusky y Nearing, 2002; Yu, 2005; Zhang et al., 2008; Li et al., 2011).

Resulta un modelo ventajoso, por sobre otros generadores climáticos, debido al rango de variables climáticas que genera y por los parámetros de entrada requeridos, los cuales son estadísticos básicos fácilmente calculables. Puede ser utilizado, además, sin requerimiento de calibración previa (Yu, 2003). Igualmente, los cálculos internos presentan aún algunas debilidades. Por este motivo, se debe seguir avanzando en el desarrollo de este modelo y en el ajuste de las ecuaciones para la determinación de ciertos parámetros de precipitación, que en el caso de países con grandes variaciones estacionales, han mostrado sobreestimaciones (Zhang et al., 2008).

Para que Uruguay avance en la evaluación de la erosión, más allá de los promedios anuales que ofrece la Ecuación Universal de Suelos, se deben explorar las posibilidades de ajuste del modelo WEPP a nuestras condiciones climáticas y a nuestros suelos. Esto por un lado, permitirá hacer uso de la evaluación de riesgos a través de la información de las probabilidades de erosiones pico anuales y de eventos extremos; y por otro lado, con la utilización de CLIGEN, posibilitará obtener una mirada prospectiva potencial.

2. CAPÍTULO 2

Ajuste y validación del modelo WEPP para suelos representativos de la zona agrícola litoral oeste, y lomadas del este del Uruguay

2.1 Introducción

La erosión es el principal problema ambiental en el sector agropecuario Uruguayo y del mundo. El suelo es un recurso no renovable y la erosión tiene fuertes impactos sobre la seguridad alimentaria, los recursos energéticos y los ambientes biofísicos en lo que respecta a biodiversidad, gases de efecto invernadero y calidad de agua (Lal, 1999). El impacto de la erosión resulta más severo en suelos pobres o ya degradados, con horizontes A poco profundos, y puede implicar una necesidad de aumento en el uso de los insumos para mantener la productividad y por lo tanto de los costos (Pierce, 1991, en Durán y García-Préchac, 2007).

Dado el impacto ambiental y económico que genera la erosión de suelos, resulta importante contar con herramientas que permitan predecir el impacto de alternativas de uso y manejo del suelo sobre la misma. Los modelos utilizados en este capítulo son la Ecuación Universal de Pérdida de suelo (USLE y su versión revisada RUSLE) y el modelo WEPP. El primero cuenta con 40 años de investigación capitalizada en nuestro país, mientras que el segundo es de estudio incipiente para el Uruguay. El funcionamiento de ambos y las características que los diferencian se describen en el capítulo 1.

2.1.1 Validación de modelos de escurrimiento y erosión

Los modelos son validados o no para diferentes localidades, a partir de la evaluación de la precisión con que estiman las variables de respuesta. El proceso de validación implica contrastar los valores estimados con los medidos en ensayos o con los proporcionados por otros modelos. En primer lugar, graficar estos resultados permite una evaluación visual primaria, la cual, pese a su subjetividad, no debe ser menospreciada (Green y Stephenson, 1986). A fin de asegurar una evaluación objetiva, se han utilizado diferentes métodos estadísticos. La forma más simple de comparación sería el cociente entre el valor estimado y el medido, que en un caso ideal debería dar 1. Dada la baja probabilidad de que esto suceda,

es necesario establecer criterios que definan cuál sería el rango de valores aceptables (si es +25%, +50% o de 0,75 a 1,5, por ejemplo), introduciéndose de esta manera una valoración subjetiva a la evaluación (Morgan, 2006). Es evidente, entonces que si bien los estadísticos aportan un aspecto objetivo a la evaluación, los criterios de aceptación son subjetivos y en el mejor de los casos parte de la subjetividad colectiva, es decir que haya un acuerdo entre los investigadores sobre estos criterios. Además, según plantean Green y Stephenson (1986) la elección del estadístico tampoco deja de ser una decisión subjetiva.

La estadística de regresión estándar determina la fortaleza de la relación lineal entre los datos simulados y los medidos. La intercepción de la línea de ajuste con el eje de las ordenadas indica la presencia de sobre- o subestimación o que el conjunto de datos no está perfectamente alineado. El modelo reproduciría perfectamente los datos medidos en el caso que la línea de regresión tenga una pendiente de 1 y corte el eje en cero (Willmott, 1981 en Moriasi et al., 2007). Esto último no sería esperable ya que comúnmente se presenta un sesgo en el que se sobreestima pequeñas pérdidas de suelo y subestima las de mayor magnitud, el cual se explica en parte porque los modelos son de naturaleza determinística, mientras que los datos medidos tienen un componente aleatorio significativo (Nearing, 1998). El coeficiente de determinación (R^2), ampliamente utilizado en la literatura, ha sido criticado por ser demasiado sensible a valores extremos altos (outliers), a la vez que resulta insensible a diferencias aditivas y proporcionales entre las estimaciones y los datos medidos (Legates y McCabe, 1999 en Moriasi et al., 2007). Valores mayores o iguales 0,5 son tomados como aceptables, dada la variabilidad de los datos medidos de escurrimiento y erosión (Zhang et al., 1996) y es poco probable que aún los mejores modelos den valores mucho mayores a 0,76 (Nearing, 1998).

Moriasi et al. (2007) realizaron un aporte importante en el sentido de plantear una guía de evaluación de modelos, en la cual, luego de describir y discutir varios estadísticos utilizados recomiendan tres de ellos a usar, complementados por métodos gráficos. Los estadísticos recomendados son el índice de eficiencia Nash-Sutcliffe (NS; Nash y Sutcliffe, 1970), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y la razón entre la raíz del error cuadrado medio y el desvío estándar (RSR), este último propuesto por ellos mismos.

El índice NS (ecuación 2.1) es un estadístico normalizado, adimensional, que determina la magnitud relativa de la varianza residual (“ruido”) comparado con la varianza de los datos medidos (“información”). Rangos entre 0 y 1 se toman generalmente como aceptables, aunque para que sea “satisfactorio” Moriasi et al. (2007) sugiere, a paso mensual, un valor superior a 0,50; valores superiores a 0,65 y 0,75 indicarían un buen y muy buen desempeño del modelo, respectivamente. Nearing (1998) señala que no debe esperarse que este índice sea mayor a 0,7. Los valores serían un poco más o menos exigentes a medida que la escala temporal se expande o reduce. Valores menores a cero indican que la media observada es un mejor estimador que el valor simulado, por lo cual se consideraría no aceptable (Tiwari et al., 2000; Moriasi et al., 2007). El índice NS ha pasado a ser el estadístico de evaluación de modelos más popular últimamente, en particular en los trabajos realizados con el modelo WEPP (Zhang et al., 1996; Tiwari et al., 2000; Yu y Rosewell, 2001; Gronsten y Lundekvam, 2006; Raclot y Albergel 2006; Pieri et al., 2007; Rachman et al., 2008; Pandey et al., 2008;

Shen et al., 2009; Verma 2010; Williams et al., 2010; Amorim et al., 2010; Pérez-Bidegain et al., 2010).

El estadístico PBIAS mide la tendencia media de los datos simulados a ser mayores o menores que los observados (ecuación 2.2). Valores positivos de este estadístico indican un sesgo hacia la sobreestimación, mientras que en los negativos, el sesgo es hacia la subestimación. Valores cercanos a cero (el óptimo) indicarían una alta precisión de la modelación (Gupta et al., 1999; en Moriasi et al., 2007). En el caso de escurrimiento mensual, un nivel satisfactorio de precisión en la estimación estaría dado por valores absolutos menores a 25; valores menores a 15 y a 10 indicarían un buen y muy buen desempeño, respectivamente. En el caso de producción mensual de sedimentos, los límites para los niveles de precisión satisfactorio, bueno y muy bueno son: 55, 30 y 15 (Moriasi et al., 2007). Si bien este estadístico no ha adquirido la popularidad del anterior para los estudios con WEPP (Williams et al., 2010), es recomendado por Moriasi et al. (2007) y se calcula de forma similar a otros más comúnmente utilizados como ser el porcentaje de desviación del volumen de corriente de flujo (Dv) (Pandey et al., 2008; Verma et al., 2010), recomendado por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, 1993 en Moriasi et al., 2007).

El estadístico RSR (ecuación 2.3), es el cociente entre la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) y el desvío estándar, por lo que es una forma de estandarizar el RMSE (ecuación 2.4). Moriasi et al. (2007) plantean que al combinar un índice de error (RMSE) con información adicional, se incorporan los beneficios de las estadísticas de índices de error y se incluye un factor normalizador. Su valor óptimo de cero, indica que no existe variación residual y que por lo tanto el modelo cuenta con un ajuste perfecto, se toma como aceptable un valor menor o igual a 0,70 (Moriasi et al., 2007), lo cual equivaldría a un valor de NS de 0,51. Sin embargo, de las fórmulas se deduce que NS es igual a uno menos el cuadrado de SRS (ecuaciones 2.1 y 2.5), por lo que utilizar ambos estadísticos no aportaría información nueva. Aún así, Moriasi et al. (2007) los proponen como estadísticos complementarios y se han presentado de esta manera en estudios posteriores (Verma et al., 2010).

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \right] \quad [2.1]$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i) * 100}{\sum_{i=1}^n (M_i)} \right] \quad [2.2]$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_M} = \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}} \right] \quad [2.3]$$

$$RMSE = \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}}{\sqrt{n}} \right] \quad [2.4]$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |M_i - S_i|}{n} \quad [2.5]$$

donde M_i es el i -ésimo valor medido, S_i es el i -ésimo valor simulado, \bar{M} es la media de los valores medidos y n el número de observaciones.

Willmott y Matsuura (2005) desaconsejan la utilización de la raíz del error cuadrado medio (RMSE) (ecuación 2.4), a pesar de su extenso uso para la evaluación de modelos en la literatura, ya que sostienen que no tiene una clara interpretación. Esto se debe a que este estadístico varía con tres factores (la variabilidad de las magnitudes del cuadrado del error, el error medio absoluto y el número de observaciones- n) siendo imposible discernir, sin la ayuda de otra información, si RMSE refleja una tendencia central o hasta qué punto refleja la variabilidad en la distribución de los errores al cuadrado o n . Además, es demasiado sensible a valores extremos, ya que el error al cuadrado total crece a medida que el error total se concentra en un número decreciente de errores individuales altos. En su lugar recomiendan el uso del error medio absoluto (MAE, ecuación 2.5) un estadístico dimensional, ya que tiene la magnitud real del error, representando una medida más natural del error medio. Este estadístico se ha utilizado anteriormente en un estudio de evaluación del modelo WEPP (Maria et al., 2001), mientras que la utilización del RMSE ha sido más común (Pieri et al., 2007; Shen et al., 2009; Verma 2010; Amorim et al., 2010) como ya lo planteaban los autores que era la tendencia para la evaluación de modelos climáticos y ambientales en general. Las críticas que se presentan a los estadísticos dimensionales se basan en que están afectados por la magnitud de los valores (Green y Stephenson, 1986). Para compensar las ventajas y desventajas pros y los contras de cada tipo de estadístico es que Legates y McCabe (1999; en Moriasi et al., 2007) recomiendan incluir en las evaluaciones de modelos, al menos un estadístico adimensional y un índice de error absoluto, con información adicional tal como la desviación estándar de los datos y al menos una representación gráfica de los resultados.

La incertidumbre que existe en la estimación puede deberse a diferentes motivos enumerados por Morgan (2006). Entre ellos se encuentran los relacionados a posibles fallas en la estructura del modelo o en sus ecuaciones que describen los procesos físicos por un lado, y por otro los que radican en los datos de entrada debido a la gran variabilidad espacial o errores en la medida de las variables de entrada, o la necesidad de estimar algunas de ellas por falta de datos medidos. En particular, las medidas de campo raramente capturan la heterogeneidad del suelo y sus propiedades físicas y la varianza real que presentan los datos medidos de erosión, puede ser muy alta. Se han reportado coeficientes de variación de hasta el 173% (Nearing et al., 1999; Nearing 2000). El estudio de variabilidad entre repeticiones de datos de erosión de parcelas experimentales realizado por Nearing et al., (1999) indica que la diferencia en esta variabilidad relativa se encuentra correlacionada con la magnitud de la medida de erosión, mientras que resultó ser independiente del hecho de corresponder a eventos individuales o a totales anuales. En base a lo planteado por Nearing et al. (1999), Laflen et al. (2004) sugieren como método alternativo de evaluación, el siguiente intervalo de confianza universal a ser utilizado en casos de experimentos que carezcan de repeticiones: $CI_{95}=1,43M^{0,694}$. No existe en la literatura un estadístico similar para datos de escurrimiento.

2.1.2 Análisis de Sensibilidad y Calibración

Brazier et al., (2000) advierte la necesidad de tomar con cautela la transferibilidad de modelos a sitios en los que no hayan sido calibrados, para predecir escenarios de escurrimiento y erosión, ya que este es el dominio que cuenta con mayor incertidumbre. De hecho, varios estudios indican que, en ciertas localidades, WEPP no estima bien escurrimiento y erosión cuando utiliza sus propias ecuaciones para calcular todos los parámetros que intervienen en los procesos (Maria, et al., 2001; Reyes et al., 2004; Raclot y Albergel 2006; Gronsten y Lundekvam, 2006; Rachman et al., 2008; Pandey et al., 2009; Albaradeyia et al., 2010; dos Santos et al., 2010; Amorim et al., 2010).

Para estos casos es necesario modificar el valor de algunos parámetros a fin de lograr un mejor ajuste a los datos medidos. Los parámetros a modificar se determinan mediante un análisis de sensibilidad, que indica cuánto cambian las variables de respuesta en relación al cambio en una unidad del valor de uno o más parámetros de entrada (Morgan, 2006). Aquellos que determinen un cambio significativo en las variables de respuesta serán considerados sensibles. Los parámetros de WEPP citados como sensibles con más frecuencia en la literatura son los valores base para la conductividad hidráulica efectiva (K_b), la erodabilidad en los surcos (K_{ib}), que representa la erodabilidad de un suelo recién laboreado, la erodabilidad entre surcos (K_{rb}) y el esfuerzo cortante crítico (TC_b), que es un valor umbral, por debajo del cual no ocurre erosión del suelo (Nearing et al., 1990; Tiscareno-López et al., 1993; Pandey et al., 2009; Shen et al., 2009; dos Santos 2010). Si bien el modelo WEPP cuenta con ecuaciones para el cálculo de los mismos, en función de la textura, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico del horizonte superficial (ecuaciones 1.13 a 1.20 en Capítulo 1), también es posible modificar el valor de estos parámetros, ingresándolo manualmente. El rango de valores sugeridos para estos parámetros son de 0.002 a 0,050s.m⁻¹ para K_{rb} ; 0,5x10⁶ a 12x10⁶kg.s.m⁻⁴ para K_{ib} ; y de 0.3 a 7.0 Pa en el caso de TC_b (Alberts et al., 1995).

Según Cassol y Lina (2003; en Gonçalves, 2010), la validación de uso de modelos de predicción hídrica de suelo basados en procesos físicos necesita información sobre los valores de sus parámetros obtenidos en condiciones locales, por lo que una opción es modificar el valor de estos parámetros sensibles, introduciendo los datos medidos (Rachman et al., 2008; Gonçalves, 2010). De no contar con estos datos, lo cual suele ser lo más común, se recomienda realizar una calibración, la cual puede ser manual o automática (Amorim, 2004 en Gonçalves, 2010; Moriasi et al., 2007; Williams et al., 2010). Al calibrar manualmente, se ajustan los valores de los parámetros sensibles, de modo de producir, mediante el método de ensayo y error, variables de respuesta dentro de cierto rango de los medidos. En este procedimiento se modifica, dentro del rango sugerido, de a un parámetro a la vez, y se selecciona aquel valor para el cual la estimación se acercó más al valor medido (Balascio et al., 1998; en Moriasi et al., 2007; Verma et al., 2010; Williams et al., 2010). La calibración automática incluye una función objetivo y un algoritmo de búsqueda de aquella combinación de valores de los parámetros de entrada, que optimicen los valores de las variables de

respuesta. Existen varios métodos desarrollados para estos propósitos mencionados por Moriasi et al., (2007). Como fue planteado en el Capítulo 1, la mayoría de los autores concuerdan con que es necesario un ajuste o calibración previa a la aplicación del modelo en una localidad donde es usado por primera vez.

Puede ser cuestionable el hecho de que haya que realizar calibraciones a modelos basados en procesos, ya que podría entenderse que contradice su teoría (De Roo 1996; en Morgan 2006). Sin embargo, existen argumentos sólidos que la defienden. En primer lugar, si bien los modelos son basados en procesos, lo cual los diferencian de los empíricos, cada una de las ecuaciones que lo componen, que representan estos procesos incluyen componentes empíricos (Haan et al., 1982). Además, surge de la literatura relacionada a WEPP, que la palabra “calibración”, ya sea automática, o manual (en cuyo último caso puede asimilarse a un “ajuste”) se refiere restrictamente al cálculo de los parámetros mencionados como sensibles. En sí, en estos casos se presenta una crítica a las ecuaciones de pedotransferencia para el cálculo de estos parámetros (ecuaciones 1.13 a 1.20 en Capítulo 1), pero no a aquellas ecuaciones que, utilizando estos parámetros, calculan el escurrimiento y la erosión (ecuaciones 1.3 a 1.12 en Capítulo 1).

El requerimiento de calibrar, ajustar o en su defecto utilizar parámetros medidos localmente, puede deberse a que aún necesiten refinarse las ecuaciones que describen los procesos, ya que quizás no contemplen todos los factores que influyen en cada proceso, o puede deberse a que los procesos de hecho sean diferentes para distintos tipos de suelos (Brazier, et al., 2000). Un ejemplo de esto sería el caso del tipo de arcilla de los Latosoles de las regiones tropicales, las cuales tienen un comportamiento diferente a la de las regiones templadas, permitiendo una buena permeabilidad aún a altos porcentajes de la misma (Amorim et al., 2010). Podría considerarse aquí cualquiera de las posibilidades anteriores, o se incluye el factor “tipo de arcilla” en la ecuación de conductividad o se plantean ecuaciones alternativas para estos suelos que reflejen sus diferencias de comportamiento hidrológico. Otro ejemplo vinculado a los efectos de las arcillas refiere a las limitaciones que muestra el modelo para representar el agrietamiento (*cracking*) y flujo preferencial (Raclot y Albergel, 2006; Grønsten y Lundekvam, 2006), que además está muy vinculada a la gran heterogeneidad espacial de los procesos del suelo discutida anteriormente. Grønsten y Lundekvam (2006) plantean, además, las dificultades que presenta WEPP para modelar adecuadamente procesos hidrológicos invernales de nevada y heladas en Noruega. Estos últimos autores recomiendan introducir alguna rutina que incluya el contenido de materia orgánica en el cálculo de la infiltración. A nivel nacional, el ejemplo sería el caso de los suelos muy diferenciados, cuya hidrología superficial está fuertemente afectada por textura pesada del horizonte B. Para este caso Blanco-Canqui, et al. (2002) y Jorge et al. (2010) propusieron diversos mecanismos para que el cálculo de la K_b considere las conductividades hidráulicas de todos los horizontes, ponderadas por su espesor, ya que el modelo por defecto sólo utiliza la información del horizonte superficial para establecer el valor de la misma (Flanagan y Nearing, 1995).

Hasta ahora se han discutido diferencias que pueden surgir por características distintas de los suelos, pero también pueden influir diferencias en los regímenes de lluvia. A partir de una

revisión Laflen et al. (2004), concluye que el modelo representa bien los grandes eventos erosivos, lo cual es una ventaja en el sentido que pocos eventos explican la mayor parte de la erosión. Sin embargo, representa una limitante para su aplicación en regiones donde los casos de precipitación con alta intensidad son raros (Grønsten y Lundekvam 2006; Albarradeyia et al., 2010). Tiwari et al. (2000) notaron que en general las eficiencias de los modelos USLE, RUSLE y WEPP sin calibrar, fueron bajas en localidades con bajos valores de pérdida de suelo, mientras que en aquellas con elevadas pérdidas de suelo, ocurrieron mejores predicciones. En estos casos, el alcance va más allá de las ecuaciones de pedotransferencia mencionadas anteriormente. Sin embargo, no debe descartarse que los malos resultados de la evaluación pueden ser también debido al mal uso o desaprovechamiento del potencial que tiene el modelo por, contar con datos para un periodo corto de tiempo, y por la falta de parámetros de entrada, los cuales al tener que ser estimados, introducen otra fuente de error (Reyes et al., 2004). O por no utilización de herramientas que están disponibles desde la interfase, un ejemplo de lo cual podría ser no utilizar la opción de capa restrictiva debajo del solum cuando se trabaja con litosoles.

Pese a que la necesidad de calibrar le quita la ventaja de poder ser extrapolable a localidades sin datos experimentales, este modelo lleva ventajas por sobre los empíricos más utilizados (USLE y RUSLE). Estas ventajas se presentan en lo que respecta al detalle en escala temporal y espacial de las variables de respuesta, y en lo que respecta a la precisión de estimación, ya que al ser comparados aún sin calibrar estiman tan bien como USLE y RUSLE (Tiwari et al., 2000; Laflen et al., 2004; Amorin et al., 2010); y calibrando, aún mejor (Stolpe, 2005). Habrá que relativizar a los objetivos del uso del modelo en cada caso, para valorar si la mejora en la estimación que ofrece WEPP sobre la de estos modelos, no es contrapesada por la dificultad que representa recabar los parámetros de entrada, o contar con experimentación que permita la calibración. Por el potencial que presenta a nivel de aplicabilidad en estudios ambientales, se considera necesario evaluar este modelo para nuestros suelos. El objetivo de este capítulo es ajustar y validar el modelo WEPP para suelos representativos de la zona agrícola litoral oeste, y lomadas del este del Uruguay empleando la base de datos nacional existente. Para esto se contrastarán el escurrimiento y la erosión simulados por WEPP *sin ajustar* y *ajustado* con los medidos. Además se contrastará la erosión anual media simulada por WEPP *sin ajustar* y *ajustado* con la simulada por USLE/RUSLE.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Sitios

Se trabajó con datos de escurrimiento y erosión generados en las parcelas de escurrimiento con diferentes manejos, bajo lluvia natural ubicadas en la Unidad Experimental de INIA-Palo a Pique (PAP, Treinta y Tres; 33° 12'S 54° 22'W), en el período 1995-1997 y en la Estación Experimental de INIA-La Estanzuela (LE, Colonia; 34° 25' S 58° 0' W), en los períodos 1985-1988 y 2009-2010. Las características climáticas de ambos sitios se muestran en la Tabla 2.2.1.

Las parcelas de escurrimiento de Palo a Pique están sobre un suelo *Argisol Subéutrico* o *Abruptic Argiudoll*, de la Unidad de suelos Alférez, con 3,5% de pendiente y las parcelas de La Estanzuela sobre un *Brunosol Éutrico* o *Vertic Argiudoll*, de la Unidad de suelos Ecilda Paulier-Las Brujas, de 3% según la Clasificación de Suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976) y Soil Taxonomy (Durán et al., 1999) respectivamente. Las fotos 1 y 2 muestran los perfiles de calicatas de los suelos de PAP y LE (Anexo 2.1).

El tamaño de las parcelas fue determinado según el tipo estándar “Wischmeier” (Wischmeier y Smith, 1960; en Hill et al., 2008) de 22.1 m de largo por 3.5 m de ancho (Wünsche, 1983; en Hill et al., 2008), localizadas con su largo en el sentido de la pendiente.

Tabla 2.2.1. Variables meteorológicas anuales, calculadas a partir de una serie de 30 años, para los sitios donde se encuentran las Estaciones Experimentales. Dirección Nacional de Meteorología.⁴

Sitio	Temp. media	Temp. max. y min.	Precip. acum.	Humedad	Velocidad
	Anual (°C)	absolutas (°C)	anual (mm)	Relativa (%)	Viento (m/s)
Treinta y Tres	16,8	40,2; -7,6	1292	75	3,2
Colonia	17,4	39,6; - 0,7	1099	75	5,3

2.2.2 Medición de escurrimiento y erosión

El cálculo de la capacidad de captación del sistema se hizo de acuerdo a Bertoni et al., (1975; en Hill et al., 2008). La metodología de muestreo y trabajo de laboratorio fue la descrita por

⁴ <http://www.meteorologia.com.uy/>

Cogo (1978, en Hill et al., 2008) y Wünsche (1983, en Hill et al., 2008). La erosión generada en cada evento climático individual se calculó a partir de las mediciones de escurrimiento superficial y de la concentración de sedimentos (Hill et al., 2008).

2.2.3 Sistemas de uso y manejo

Se contrastaron 10 parcelas en Palo a Pique y 8 en La Estanzuela, con distintos tratamientos establecidos por diferentes combinaciones de rotaciones de cultivos y pasturas e intensidad de laboreo, incluyendo los controles (testigos) de suelo desnudo y campo natural.

Sistemas de uso y manejo en Palo a Pique 1994-1997

(Terra y García Préchac 2001; en Hill et al. 2008)⁵

- Agricultura continua, con doble cultivo anual. Como especies de invierno se sembraron avena o trigo en mezcla con raigrás, y en verano sorgo (*Sorghum bicolor*) o moha (*Setaria italica*). Tanto los cultivos de invierno como los de verano se cosecharon por corte y retiro de restos. Uno de los sistemas se realizó con siembra directa (SD) y otro con laboreo reducido (LR), que consistió en dos pasadas de excéntrica y una pasada de vibrocultivador.

- Rotación de seis años de duración con un ciclo de dos años de cultivo igual al sistema anterior y cuatro años de pastura de trébol blanco (*Trifolium repens*), lotus (*Lotus corniculatus*), dactylis (*Dactylis glomerata*) y festuca (*Schedonorus arundinaceus*). Esta rotación se realizó usando dos sistemas de laboreo, LR y SD.

Sistemas de uso y manejo en La Estanzuela 1984-1988

(García Préchac, 1992; en Hill et al. 2008)⁶

- Agricultura continua, con doble cultivo anual bajo LR y SD. Se sembró sorgo en la primera quincena de octubre en todos los sistemas. A este le siguió un cultivo de invierno: cebada (*Hordeum vulgare*) o trigo (*Triticum aestivum*) y luego girasol (*Heliaantus annus*) de segunda, sembrado inmediatamente después del cultivo de invierno.

- Rotación de cultivos anuales (3 años) con pasturas (3 años). La etapa de cultivo fue similar a la descrita para el sistema anterior, y la pastura consistió de una mezcla de festuca, trébol blanco y trébol rojo. La rotación se realizó en LR y en SD.

⁵ Extraído textual de Hill et al. 2008

⁶ Extraído textual de Hill et al. 2008

Sistema de uso y manejo en La Estanzuela 2009-2010 (Sawchik, com. pers.)

Se utilizaron datos de 3 parcelas de La Estanzuela con igual tratamiento.

-Agricultura continua, con un cultivo anual. Se sembró soja con siembra directa, entre cultivos no se controlaron malezas. Anteriormente había estado cubierto por campo natural por varios años (fotos de parcela en Anexo 2.2).

2.2.4 Preparación de bases de datos y simulación

Se compilaron bases de datos climáticos, topográficos, de suelo y de manejo con los datos disponibles para las parcelas de las estaciones experimentales (campo natural, suelo desnudo, cultivos continuos y rotaciones), correspondientes a los períodos de tiempo considerados, adaptando los archivos a un formato compatible con la versión WEPP 2010.1.⁷

Procesamiento de datos de Clima

Se emplearon datos climáticos diarios (temperatura del aire máxima y mínima, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, lámina de lluvia diaria, e intensidad de lluvia cada diez minutos) para los años 1994 al 1997 del sitio PAP y de 1984 al 1988, y de 2008 al 2010 del sitio LE, en todos los casos incluyendo el año anterior al periodo de tiempo considerado, ya que en este año se siembran los cultivos de verano cosechados en el primer año de simulación. Estos datos fueron proporcionados por la Unidad de Agro-Clima y Sistemas de Información (GRAS) del INIA. Los datos climáticos que caracterizan los sitios se presentaron en la Tabla 2.2.1, y la Tabla 2.2.2 presenta el detalle de la precipitación acumulada por año para los mismos.

Tabla 2.2.2. Precipitación acumulada anual (PP) en La Estanzuela en Colonia, (LE) y de Palo a Pique en Treinta y Tres (PAP). Fuente: INIA-GRAS.

SITIO	AÑO	PP (mm)
LE	1985	1233,6
	1986	1506,9
	1987	905,7
	1988	1110,1
LE	2009	1213,8
	2010	992,5
PAP	1995	1134,5
	1996	884,9
	1997	704,8

⁷ Disponible en <http://www.ars.usda.gov/research/docs.htm?docid=10621>

Se verificó que no se simulara congelamiento del suelo, ni que ocurrieran precipitaciones en forma de nieve. Para evitar estos fenómenos fue necesario introducir modificaciones en el archivo climático de INIA LE, en el cual se cambiaron las mínimas por debajo de cero a 0°C.

A partir de planillas y bandas de pluviógrafo, se digitalizaron las láminas de lluvia cada 10 minutos para los períodos considerados de ambos sitios. Debido al hecho que en algunos períodos estos datos estaban incompletos, se reconstruyeron algunos eventos de lluvia, a partir de los datos de precipitación diaria y de bandas de pluviógrafo semanales con registros cada dos horas.

Finalmente, se convirtió la velocidad del viento de kilómetros por día, a metros por segundo y se calculó la temperatura al punto de rocío utilizando ecuación 2.6 (Da Mota, 1981).

$$\sqrt[8]{\frac{HR}{100}} * [112 + (0.9 \bar{T})] + (0.1 \bar{T}) - 112 \quad [2.6]$$

donde HR es humedad relativa media diaria, T es temperatura media diaria.

Procesamiento de datos de Suelo y Pendiente

Se completaron los archivos de suelo y pendiente a partir de la base de datos provistas por las Estaciones Experimentales (Anexo 2.3) y siguiendo el tamaño de la parcela establecido (Wünsche, 1983; en Hill et al., 2008). Al no contar con datos medidos de conductividad hidráulica base (K_b), esfuerzo cortante crítico (TC_b), erodabilidad de los canalículos (K_{rb}) y entre canalículos (K_{ib}) se utilizó el criterio de tomar los valores provistos por los cálculos del modelo para los dos últimos parámetros (Flanagan y Nearing 1995). Los otros parámetros (K_b y TC_b), se ajustaron manualmente a fin de minimizar las diferencias de los valores de erosión y escurrimiento con los medidos. En particular, para el archivo del suelo de PAP, el cual cuenta con alta diferenciación textural, se utilizó el valor de K_b , calculada según lo sugerido por Jorge et al. (2011), con la fórmula de Jury y Horton (2004) en base a la conductividad hidráulica de cada horizonte, las cuales se hallaron siguiendo las dos fórmulas utilizadas por el modelo WEPP para calcular K_b (conductividad hidráulica base), según el porcentaje de arcilla sea mayor (ecuación 2.6, en Introducción) o menor (ecuación 2.7, en Introducción) a 40% (Flanagan y Nearing, 1995).

Procesamiento de datos de Manejo

Se crearon archivos para cada rotación, incluyendo actividades de laboreo, siembra, cosecha, corte de pasturas y aplicación de herbicidas, en base a las planillas de actividades proporcionada por las Estaciones Experimentales. Las operaciones utilizadas, fueron las que se encontraban disponibles en la base de datos de WEPP. Se adaptaron archivos de cultivos a condiciones locales, modificando espacio entre línea y entre plantas, y eficiencia de conversión energética, buscando obtener densidades de siembra y rendimientos cercanos a los medidos, o en caso de no contar con este registro, cercano a los promedios para esa época en

nuestro país (DIEA 1998; Baetgen y Carriquiry, 2006; Castro, 1997; Vallo y Zarauz, 1987; Martino y García, 1985; Carámbula, 2010; Viega, com. pers.).

En lo que respecta al manejo, el modelo WEPP requiere información precisa, como ser fechas de las actividades y maquinaria específica con la que realizaron las actividades. Estos datos no siempre estaban disponibles, ya que al momento de la medición en los ensayos de las décadas del ochenta y noventa, no siempre se registraba este tipo de información. Para aquellos casos en los que no se contaba con información, se simuló un procedimiento de rutina sugerido por el personal de INIA. En el caso de PAP las fechas de cultivo que faltaban fueron estimadas a partir de los datos de la altura de vegetación. El contacto directo con el personal de INIA que llevaba adelante el ensayo durante los años 2009 y 2010 nos facilitó recabar todos los detalles requeridos por el modelo, en particular el rendimiento del cultivo, utilizado para ajustar el valor de eficiencia energética en el archivo del cultivo de soja. En el Anexo 2.4 (se detallan las fechas de laboreo y secuencias de operaciones de manejo de los cultivos).

2.2.5 Software

Para estimar la pérdida de suelo con el USLE/RUSLE, se utilizó el programa EROSION 5.0⁸ (García Préchac et al., 2005).

Para estimar la pérdida de suelo con WEPP se utilizó el componente de laderas (*hillslope*) de la versión WEPP 2010.1.⁹, con la interface para Windows.

El manejo de la base de datos y los análisis estadísticos se realizaron con Microsoft Excel 2007.

2.2.6 Análisis Estadísticos

Las medidas anuales de escurrimiento y erosión de los sitios PAP (1995-1997) y LE (1985-1988) correspondían a 30 y 32 datos, respectivamente, sin repeticiones, para distintas combinaciones de años y parcelas. Con estos datos se contrastaron los valores de escurrimiento y erosión simulados con WEPP para las mismas condiciones climáticas, edafológicas y de manejo. Además, se compararon los promedios anuales medidos con los estimados con USLE y con WEPP.

Las medidas del sitio LE (2009-2010) al contar con 3 repeticiones¹⁰ permitieron calcular el coeficiente de variación y el intervalo de confianza a 95%. Se trabajó con 35 eventos

⁸ Disponible en el sitio web de la Facultad de Agronomía, UdelaR, <http://www.fagro.edu.uy/~manejo/>

⁹ Disponible en <http://www.ars.usda.gov/research/docs.htm?docid=10621>

individuales, los cuales se contrastaron con los simulados por el modelo WEPP para las mismas condiciones.

La validación del modelo se realizó evaluándose la precisión con que los datos simulados se correspondieron con los medidos, mediante los métodos estadísticos presentados a continuación.

El ajuste de los datos simulados a los medidos se determinó haciendo uso de diferentes criterios, los cuales incluyeron análisis de regresión, el coeficiente de determinación múltiple (R^2), el índice de eficiencia de modelos Nash-Sutcliffe (NS; adimensional; Nash y Sutcliffe, 1970), la tendencia media de los datos simulados a ser mayores o menores que los observados (PBIAS, porcentaje), el error medio absoluto (MAE; dimensional) y el intervalo de confianza construido a partir del valor observado (IC_{95} , Laflen, 2004).

De esta manera se sigue la recomendación de Legates y McCabe (1999; en Moriasi 2007) de combinar la información de al menos un estadístico adimensional, un índice de error absoluto y otra información adicional con respecto a la dispersión de los datos, conjuntamente con la representación gráfica. Además de incluir los estadísticos más utilizados en la bibliografía, R^2 y NS, lo cual permite la comparación de los resultados, se incluyen otros complementarios, recomendados por distintos autores: PBIAS (Moriasi 2007), MAE (Willmott y Matsuura, 2005) e IC_{95} (Laflen, 2004).

¹⁰ Se aclara que, si bien se contaba con cuatro repeticiones, una de ellas era sobre un suelo reconstruido y aumentaba notoria y artificialmente la variación en los resultados. Por este motivo y el hecho que en estas condiciones el horizonte A del suelo no se correspondía con el ingresado al modelo, se decidió excluir esa parcela de este estudio.

2.3 Resultados

El modelo WEPP sin calibrar o ajustar, sobreestima escurrimiento en el caso de las parcelas de La Estanzuela (LE), mientras que subestima el escurrimiento en las parcelas de Palo a Pique (PAP). La erosión es subestimada en ambos sitios (Tabla 2.3.1). Por este motivo, y a fin de minimizar la diferencia entre los valores medidos y los simulados, se ajustaron los valores de conductividad hidráulica efectiva base (K_b) y de esfuerzo cortante crítico (TC_b) proporcionados por el modelo por defecto, y que siguen las fórmulas presentadas en la introducción.

La conductividad hidráulica se ajustó de 3,55 a 6 mm.h^{-1} en el archivo de suelo de LE y de 7,4 a 2,19 mm.h^{-1} en el archivo de suelo de PAP. El esfuerzo cortante crítico se ajustó de 3,5 a 3Pa en el archivo de suelo de LE y de 3,4 a 2,3Pa para el archivo de suelo de PAP.

Tabla 2.3.1. Escurrimiento y erosión anual media medida y simulada con WEPP sin ajustar calculada promediando los resultados de todas las parcelas de los sitios La Estanzuela (LE) y Palo a Pique (PAP).

Sitio	Escurrimiento (mm)		Erosión ($\text{Mg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$)	
	Medido	Simulado	Medido	Simulado
LE	190	388	5,89	4,18
PAP	286	189	11,22	5,91

2.3.1 Escurrimiento y erosión anual media

Con los ajustes realizados a K_b y TC_b , el escurrimiento anual medio estimado en las parcelas de LE disminuyó 7% y en PAP aumentó 34%; mientras que la erosión anual media aumentó 43% y 52% en LE y PAP, respectivamente, comparando con los resultados obtenidos con WEPP sin ajustar. Además, el porcentaje de parcelas cuya erosión media estimada queda incluida dentro del intervalo de confianza aumentó de 44 a 67. En la Tabla 2.3.2 y la Fig. 2.3.1 se puede observar cómo el modelo WEPP, con este ajuste realizado, obtuvo un alto nivel de precisión en la estimación, similar a la de USLE/RUSLE para la erosión anual media. Se observa, no obstante, una sobreestimación de los valores bajos y una subestimación de los valores altos.

Tabla. 2.3.2. Estadísticos que evalúan la precisión de estimación de la erosión anual media de los modelos WEPP y USLE/RUSLE en los sitios LE y PAP.

	USLE/RUSLE	WEPP sin ajustar	WEPP ajustado
NS	0.92	0.59	0.87
R ²	0.98	0.97	0.97
ecuación	$y = 1.1617x + 1.5769$	$y = 0.394x + 1.648$	$y = 0.656x + 1.835$
PBIAS (%)	-32.7	41.94	13.58
MAE (Mg/ha)	3.56	5.03	3.56

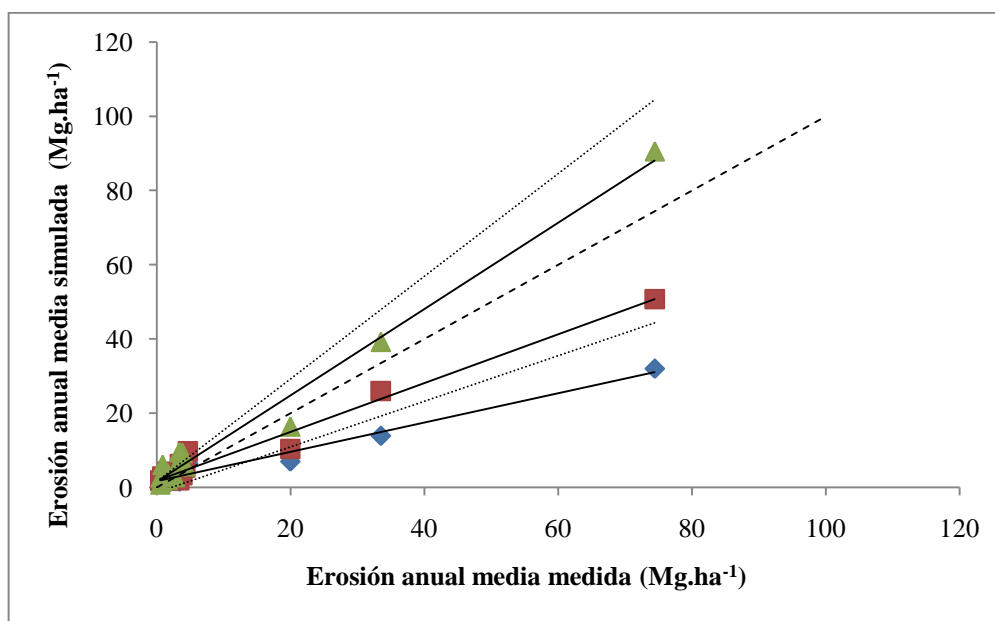


Figura 2.3.1. Erosión anual media medida y simulada con WEPP sin ajustar (rombos) y ajustado (cuadrados) y USLE/RUSLE (triángulos) en los sitios LE y PAP. Se representan la relación 1:1 (línea cortada), las líneas de tendencia (líneas continuas) y las líneas de tendencia de los límites superior e inferior del intervalo de confianza calculado según Laflen et al. (2004) (líneas punteadas).

La Fig. 2.3.2. muestra la precisión de estimación de erosión de los modelos para los manejos con niveles de erosión menores a 10 Mg.ha^{-1} (sin los valores de erosión de los manejos de suelo desnudo y de cultivo continuo en PAP, que generaron las mayores magnitudes), con coeficientes de determinación de 0,57 y 0,58, e índice NS de -0,70 y -4,68 para WEPP y USLE/RUSLE, respectivamente. Se observa claramente una sobreestimación de estos valores por ambos modelos. El modelo WEPP obtiene una mayor proporción de tratamientos dentro del intervalo de confianza propuesto por Laflen et al. (2004), que USLE/RUSLE.

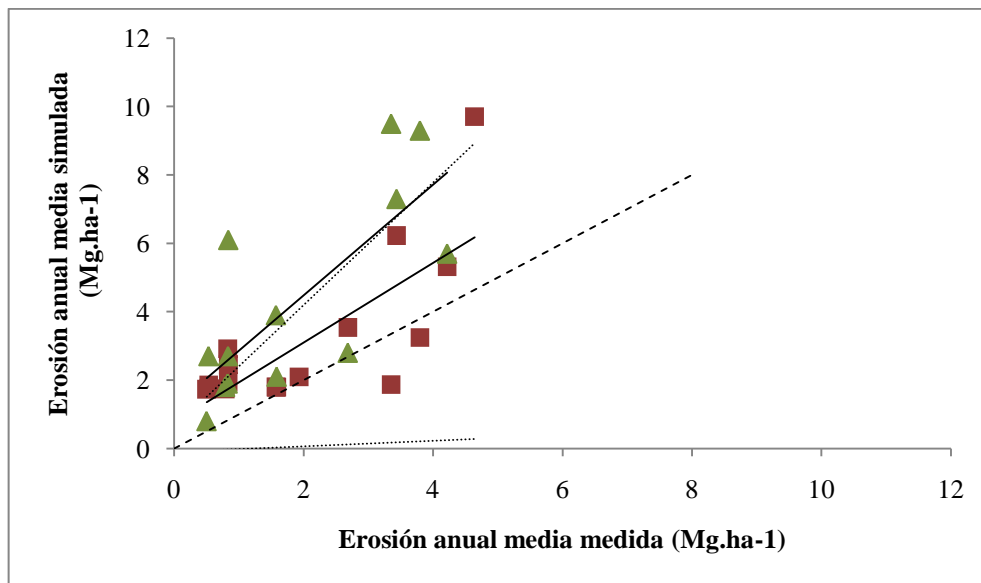


Figura 2.3.2. Erosión anual media medida y simulada con WEPP ajustado (cuadrados) y USLE/RUSLE (triángulos) en los sitios LE y PAP, para valores menores a 10 Mg.ha-1. Se representan la relación 1:1 (línea cortada), las líneas de tendencia (líneas continuas) y las líneas de tendencia de los límites superior e inferior del intervalo de confianza calculado según Laflen et al. (2004) (líneas punteadas).

La mayoría de los valores de erosión anual media simulada con WEPP entran dentro del intervalo de confianza (Tabla 2.3.3). Con la excepción de una rotación de PAP, para las demás rotaciones cuya erosión medida se encuentra por debajo del valor tolerable (establecido en $7 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ para ambos sitios), la erosión simulada tampoco sobrepasa este valor. Los valores simulados ordenan las parcelas de manera lógica, ubicando en los extremos a las parcelas de campo natural y de suelo desnudo, y simulando menos erosión para las parcelas con siembra directa que para las de cultivo continuo con laboreo mínimo. Luego hay diferencias en las parcelas con valores intermedios y con rotaciones pradera-cultivo.

Tabla 2.3.3. Erosión anual media medida y estimada con WEPP para cada rotación en orden creciente con el intervalo de confianza*.

Sitio	Secuencia de cultivos y manejo de Parcelas	Medido	IC ₉₅	Simulado
LE	campo natural	0,50	$\pm 0,88$	1,74
	SD Praderax3/ sorgo cebada	0,83	$\pm 1,26$	2,92
	SD sorgo-cebada/girasol-trigo/sorgo/cebada	0,84	$\pm 1,27$	2,46
	sorgo-cebada/girasol-trigo/Praderax2	1,58	$\pm 1,96$	1,80
	Praderax3/ sorgo cebada	2,68	$\pm 2,83$	3,54
	sorgo-girasol/ trigo/cebada-sorgo/girasol	3,44	$\pm 3,37$	6,23
	sorgo-cebada-girasol/trigo/sorgo/cebada	3,80	$\pm 3,61$	3,25
	suelo desnudo	33,47	$\pm 16,35$	25,93
PAP	SD pradera/pradera/pradera	0,53	$\pm 0,92$	1,86
	campo natural	0,79	$\pm 1,21$	1,74
	pradera/pradera/pradera	0,83	$\pm 1,26$	1,94
	SD avena-moha/trigo-pradera/pradera	1,57	$\pm 1,96$	1,80
	SD pradera/avena-moha/avena-moha	1,93	$\pm 2,26$	2,10
	SD avena-moha/avena-moha/avena-moha	3,35	$\pm 3,31$	1,87
	avena-moha/trigo-pradera/pradera	4,22	$\pm 3,88$	5,32
	pradera/avena-moha/avena-moha	4,64	$\pm 4,15$	9,70
	avena-moha/avena-moha/avena-moha	19,93	$\pm 11,41$	10,36
	suelo desnudo	74,42	$\pm 28,46$	50,73

*LE= La Estanzuela; PAP= Palo a Pique; M=erosión anual media medida ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$); IC₉₅= Intervalo de Confianza calculado según Laflen et al. (2004); S= erosión anual media simulada con WEPP ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$); SD= Siembra Directa. Las rotaciones sin indicación SD, son con laboreo mínimo. Los números en negrita indican los valores estimados que quedan dentro del IC₉₅. Las líneas horizontales separan los manejos con pérdida de suelo por encima del valor T ($7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$).

Se observó mayor variación entre las distintas rotaciones y manejos de las parcelas en los datos de erosión medidos que en los simulados, notándose aún más esta diferencia en el caso del escurrimiento. Sin considerar los valores del suelo desnudo, el coeficiente de variación del escurrimiento medido en LE triplicó el simulado, mientras que el medido en PAP fue 1,7 veces mayor que el simulado (Fig. 2.3.3.). Esto se reflejó en el índice de eficiencia del modelo NS, el cual para escurrimiento dio un valor negativo (-1,17). Los factores para las relaciones entre el coeficiente de variación de los datos de erosión medidos y simulados fue de 1,5 y 1,3 para LE y PAP, respectivamente.

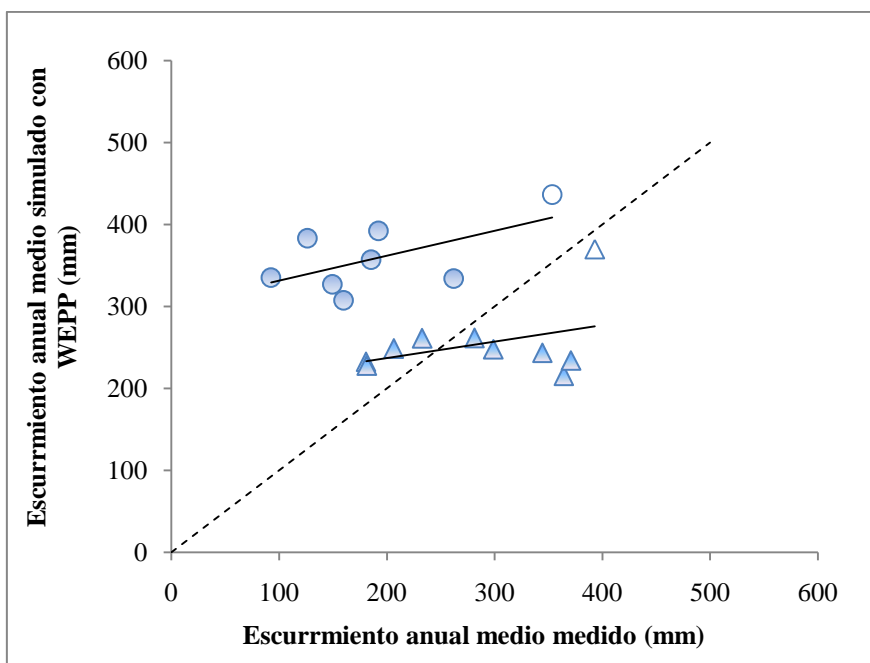


Figura 2.3.3. Escurrimiento anual medido y simulado con WEPP en LE (círculos) y PAP (triángulos). Se representan valores para suelo desnudo (marcador sin relleno), la relación 1:1 (línea cortada) y las líneas de tendencia para el total de los datos, incluyendo el suelo desnudo (líneas continuas).

2.3.2 Escurrimiento y erosión anual

El escurrimiento medido en las parcelas de las Estaciones Experimentales de INIA La Estanzuela e INIA Palo a Pique, no pudo ser satisfactoriamente simulado por el modelo WEPP, con coeficientes de determinación bajos, NS menores a 0,5 y errores medios absolutos elevados. Sin embargo, la simulación de la erosión anual con este modelo se ajusta satisfactoriamente a los datos medidos con un leve sesgo hacia la subestimación en LE y un muy leve sesgo hacia la sobreestimación en PAP. El error medio absoluto en ambos casos no supera el límite de tolerancia determinado para estos suelos en $7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ (Tabla 2.3.4).

Tabla. 2.3.4. Estadísticos que evalúan la precisión de estimación del escurrimiento y la erosión anual del modelo WEPP en PAP y LE.

	Escurrimiento LE	Escurrimiento PAP	Erosión LE	Erosión PAP
NS	-0,78	0,36	0,86	0,81
R ²	0,55	0,42	0,90	0,89
PBIAS (%)	-88,74	10,97	-1,52	19,92
MAE (mm)	171,44	86,48	-	-
MAE (Mg·ha ⁻¹)	-	-	3,27	5,4

Se consideró como sobre- o subestimación aquellas simulaciones de pérdida de suelo, que quedaron fuera del intervalo de confianza establecido según Laflen et al. (2004), lo cual ocurrió con 47% y 50% de los casos, para los sitios LE y PAP respectivamente. La mayoría de éstos corresponden a sobreestimaciones de medidas que no superan $1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. En LE, en términos de frecuencia, los años-parcela con erosión sobreestimada superan los subestimados en una relación 15:1, mientras que en términos de cantidad, la pérdida de suelo sobreestimada total es dos veces y media la subestimada. En PAP los años-parcela con erosión sobreestimada también superan los con subestimación en una relación 6:1, pero la erosión subestimada en un solo año-parcela, se equipara a la sumatoria de la erosión sobreestimada en todas los años-parcela (Figs. 2. 3. 4 y 2. 3. 5.).

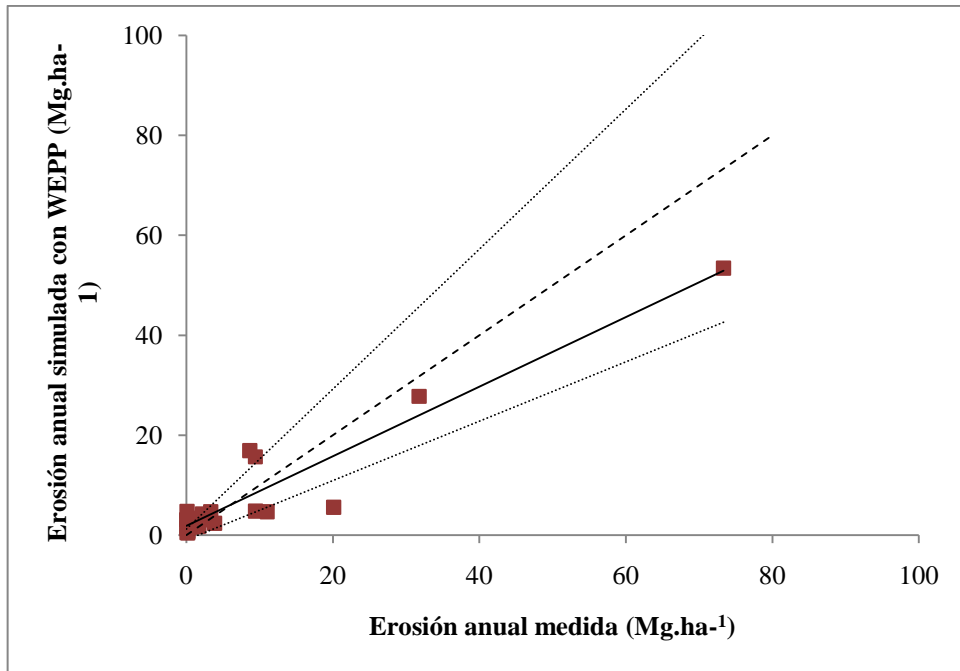


Figura 2.3.4. Erosión anual medida y simulada con WEPP en LE. Se representan la relación 1:1 (línea cortada), la línea de tendencia (línea continua) y las líneas de tendencia de los límites superior e inferior del intervalo de confianza calculado según Laflen et al. (2004) (líneas punteadas).

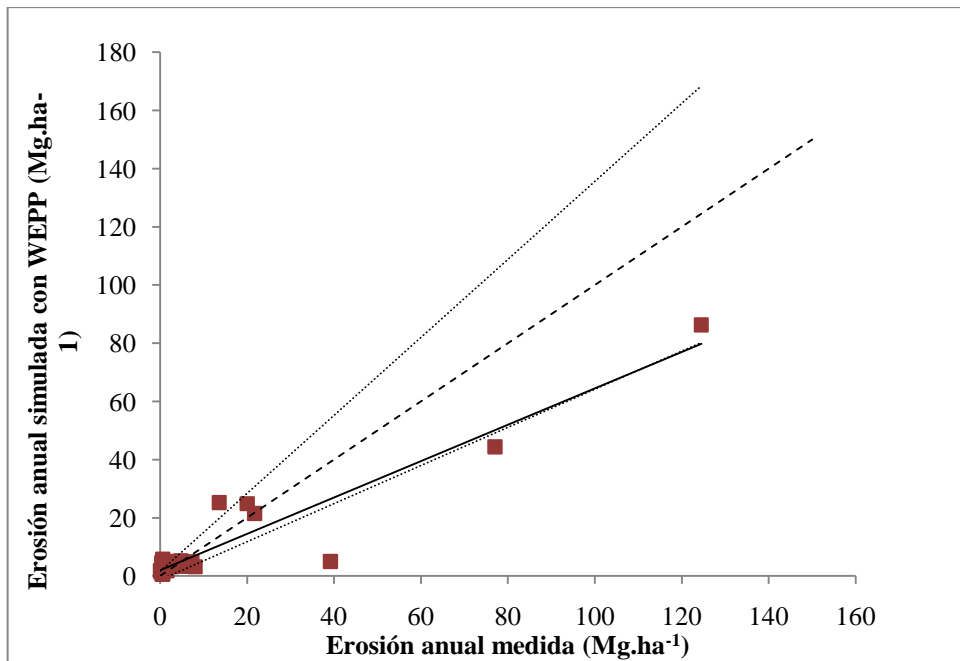


Figura 2.3.5. Erosión anual medida y simulada con WEPP en PAP. Se representan la relación 1:1 (línea cortada), la línea de tendencia (línea continua) y las líneas de tendencia de los límites superior e inferior del intervalo de confianza calculado según Laflen et al. (2004) (líneas punteadas).

2.3.3 Eventos de escurrimiento

En las parcelas con soja en LE, durante los años 2009 y 2010, se registraron 35 eventos de escurrimiento, de los cuales 70% fueron menores o iguales a 2 mm de la lluvia total (Fig. 2.3.6). El rango del desvío estándar de los eventos de escurrimiento en las tres réplicas fue de 0,01 a 10,57, y el coeficiente de variación (CV) fluctuó entre 12,1% y 137,6%, con una media de 53,8%. Los valores de CV dieron en general altos, considerándose 8 de los eventos poco variables ($CV < 30\%$), 14 variables ($30\% < CV < 60\%$) y el resto muy variable ($CV > 60\%$).

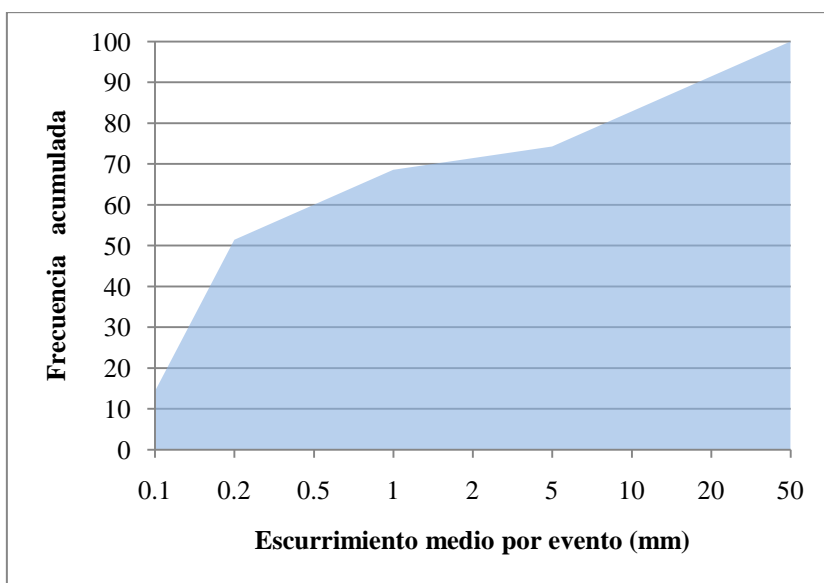


Figura 2.3.6. Percentiles de la distribución de eventos de escurrimiento promedio de las tres parcelas con cultivo continuo de soja de LE (2009-2010).

El modelo WEPP simuló representó un 69% de los eventos de escurrimiento medidos. Ninguno de los eventos medidos no representados superó los 1,12mm. El modelo muestra una fuerte tendencia a la sobreestimación (PBIAS -129%) con un error medio absoluto de 6,7mm. Las estimaciones de los eventos individuales de escurrimiento de los años 2009 y 2010, presentan un valor de NS no satisfactorio (-1,68) mientras que el coeficiente de determinación al contrastar con los valores medidos, puede ser considerado como aceptable ($R^2=0,59$).

En la Fig. 2.3.7 se puede observar como los eventos sobreestimados, que caen fuera del intervalo de confianza (marcados con una cruz), se concentran en el año 2009; mientras que en el año 2010 hay un evento subestimado (marcado con un círculo).

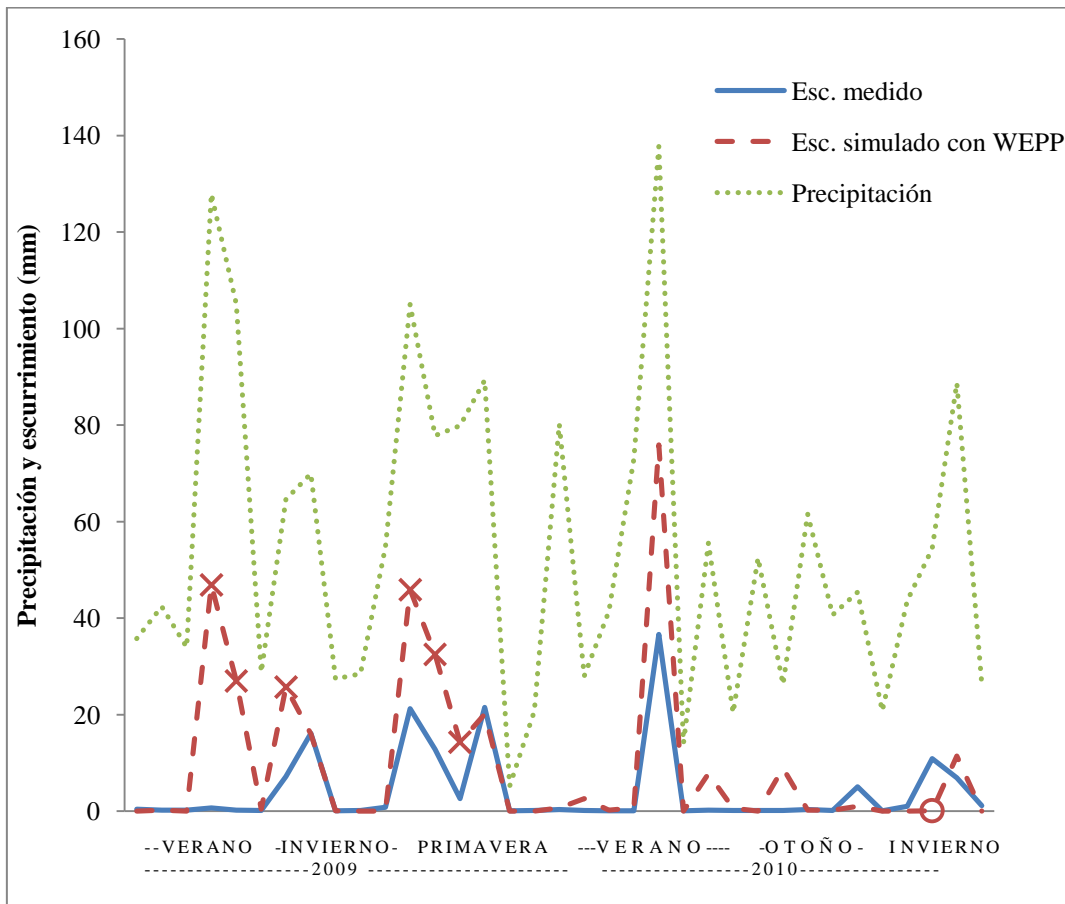


Figura 2.3.7. Eventos de escurrimiento medidos (línea continua) y simulados (línea cortada) con WEPP en cultivo de soja continuo, LE (2009-2010). Se indican los valores que, cayendo fuera del intervalo de confianza, sobreestiman (cruz) o subestiman (círculo) por encima de 10 mm el escurrimiento. Se representa la precipitación para los días en que hubo escurrimiento medido (línea punteada).

2.4 Discusión

2.4.1 Precisión de estimación de escurrimiento y erosión anual media previo a un ajuste

El modelo WEPP sin calibrar o ajustar no fue capaz de estimar, con un nivel aceptable de error, el escurrimiento y erosión de los suelos representativos de la zona agrícola litoral oeste, y lomadas del este del Uruguay (Tabla 2.3.1). Presentó además, gran diferencia con los estimados por USLE/RUSLE (Tabla 2.3.2). Los trabajos que comparan estos dos tipos de modelos han llegado a la conclusión de que WEPP sin calibrar estima tan bien como los otros en base a que ninguno de los modelos se destaca frente a los otros por una consistente mejor performance en la amplia gama de casos estudiados (Tiwari et al., 2000; Amorim et al., 2010).

Sin embargo, estos trabajos incluyen sitios para los cuales los modelos, incluido WEPP, presentan errores de hasta 60 Mg.ha⁻¹ y valores de NS muy bajos, incluso negativos (Amorim et al., 2010; Laflen et al., 2004). Laflen et al. (2004) agregan que el hecho que un porcentaje de los valores de pérdida de suelo estimados con WEPP, USLE y RUSLE caigan fuera del intervalo de confianza por ellos planteado, indica que existen problemas con todos los modelos, ya sea en su formulación o parametrización. A pesar de que las series de años tan cortas (tres y cuatro años) utilizadas, no son el ideal para trabajar con USLE/RUSLE, cuyas simulaciones representan promedios de largos períodos de tiempo, la precisión que presentó este modelo fue muy alta. Debe considerarse, sin embargo, que los datos medidos utilizados forman parte de la base de datos con la cual se ajustó el modelo USLE/RUSLE para el Uruguay, por lo que existiría un sesgo en el sentido de favorecer su desempeño frente a WEPP sin ajustar, como ha ocurrido en otros estudios (Laflen et al., 2004).

Ajustando los parámetros base de la conductividad hidráulica (K_b) y de esfuerzo cortante crítico (TC_b), tanto el escurrimiento medio anual como la erosión anual media estimados por WEPP en los sitios obtuvieron valores más cercanos a los medidos y a los de USLE/RUSLE en el caso de los valores de erosión (Tabla 2.3.2), concordando con las predicciones 1.1 y 1.2.

2.4.2 Criterios de ajuste de parámetros

Los criterios en los que se basó la selección de los parámetros ajustados se discuten a continuación. En primer lugar se modificó K_b dado que se daba una gran diferencia entre los valores de escurrimiento simulados y los medidos. La K_b es el parámetro mayormente reportado como sensible y ajustado o calibrado en la literatura (Maria, et al., 2001; Pieri et al., 2007; Rachman et al., 2008; Pandey et al., 2008; Shen et al., 2009; Verma, et al., 2010; dos Santos et al., 2010; Williams et al., 2010). En particular para *Abruptic Arguidoll* del sitio PAP, Jorge et al. (2010) reportaron que, en condiciones de suelo desnudo, WEPP no simuló bien el escurrimiento cuando la conductividad hidráulica efectiva base (K_b) era calculada por el modelo por defecto.

En este caso, la principal razón por la cual se entendió que la ecuación de pedotransferencia para el cálculo de K_b propuesta por el modelo no reflejaba eficientemente el comportamiento del suelo, es que la misma está únicamente basada en la textura del horizonte superficial. Por las características del suelo de PAP, (contenido de arcilla del horizonte A 20% y del B 47%; espesor del horizonte A 27 cm) es de esperar que la hidrología superficial esté afectada por el horizonte B (Durán, 1997). En el grupo de suelos de los Argisoles, sobre el que se encuentran las parcelas del sitio PAP, la gran diferenciación textural implica que el horizonte Bt limite la permeabilidad del suelo, llegando a originar hidromorfismos temporarios (Durán y García-Préchac, 2007). Para este caso, como el modelo calcula la conductividad hidráulica en base al contenido de arcilla del horizonte A, se subestima notoriamente el escurrimiento. Blanco-Canqui et al., (2002), resaltan el hecho que la selección de la conductividad hidráulica en flujo saturado tiene un impacto importante sobre la estimación de escurrimiento. Frente a suelos con importante diferenciación textural (presencia de claypan), estos autores propusieron estimar K_b a partir de la conductividad hidráulica medida en los diferentes estratos en profundidad de 10 cm de espesor. Jorge et al. (2011) sugieren realizar el cálculo de K_b a partir de la K_b de cada horizonte (calculadas con las fórmulas sugeridas por el modelo WEPP), ponderado por su espesor (ver Jury y Horton, 2004).

Por lo tanto, para estimar el valor de K_b , se utilizó, la fórmula sugerida por Jorge et al. (2011), la cual contempla el efecto que tiene el horizonte B sobre la infiltración y el escurrimiento. Esto implicó la reducción de K_b , con respecto al valor calculado por defecto, con el consiguiente aumento del escurrimiento estimado. En los trabajos de Williams et al. (2010) y dos Santos et al. (2010), con suelos no diferenciados limosos, también fue necesario reducir el valor de K_b .

Por el contrario, el sitio LE tuvo sobreestimación de escurrimiento (Tabla 2.3.1), por lo que fue necesario aumentar el valor de K_b , con respecto a la calculada por defecto. Esto se realizó manualmente, como se ha hecho en otros trabajos (Balascio et al., 1998; en Moriasi et al., 2007; Williams et al., 2010; Verma, et al., 2010), sin recurrir a una ecuación alternativa, ya que de aplicarle la fórmula propuesta para PAP el valor de K_b se reduce, lo cual aumentaría aún más la sobreestimación de escurrimiento. Es decir, que esta fórmula no sería aplicable a este caso, ni a los suelos limosos de Williams et al. (2010) y dos Santos et al. (2010),

restringiéndose su uso a suelos con alta diferenciación textural. Los motivos por los cuales sin ajustar, el escurrimiento es tan sobreestimado, no resulta tan evidente como en PAP. Probablemente, el suelo pesado del sitio LE (30% de arcilla en el horizonte A, en su mayoría de tipo 2:1), tienen una gran tendencia a agrietarse, lo que fomentaría canales preferenciales, aumentando de esta manera drásticamente la tasa de infiltración y reduciendo así el escurrimiento¹¹ (Durán y García Préchac, 2007). No obstante, por falta de registros de estos hechos, no se puede afirmar de forma certera que ésta sea la causa. Por otro lado, dada la variabilidad espacial y temporal que estos fenómenos presentan, es muy difícil representarlos a través de una ecuación alternativa, siendo más apropiado para ello un factor de ajuste. El modelo cuenta con factores de ajuste que pretenden contemplar fenómenos como el sellado y encostrado, pero no el agrietamiento. Otros factores influyentes son el alto contenido de materia orgánica, y la buena estructura del suelo, que favorecen la infiltración en LE. Estos factores no están contemplados en la fórmula sugerida en WEPP para el cálculo de K_b , como ya ha sido puntualizado por Grønsten y Lundekvam (2006) y Langhans et al. (2010).

La modificación de K_b para ambos sitios mejoró la estimación del escurrimiento, confirmando la sensibilidad de este parámetro, pero cambiando sólo este parámetro, la erosión es subestimada. Se consideró entonces ajustar TC_b , por ser un parámetro sensible que afecta directamente el mecanismo de erosión a través de la ecuación que estima la desagregación en los canalículos. En LE se utilizó el ajuste realizado por Jorge et al. (2010) para el suelo desnudo, el cual implicó una reducción de TC_b , con la consiguiente duplicación de la erosión media estimada en suelo desnudo. Del mismo modo se procedió a reducir este parámetro para el sitio PAP, con lo cual, tomando el promedio de todas las rotaciones, también duplicó la pérdida de suelo simulada.

Ambos parámetros fueron acertados en el sentido que mostraron ser sensibles al cambio, mejorando la precisión de la simulación (Tabla 2.3.2, Fig. 2.3.1). Otros autores también modificaron la erodabilidad en canalículos (K_{rb}) (Williams et al., 2010), y entre canalículos (K_{ib}) (Pandey et al., 2009).

Coincidentemente con la mayoría de los trabajos publicados, en los dos sitios se sobrestimaron valores bajos de erosión y subestimaron los altos, lo cual es la tendencia general de este tipo de modelos (Nearing, 1998). Se ha demostrado, además, que este fenómeno no está necesariamente asociado a un sesgo propio del modelo, sino a las limitaciones matemáticas que implica representar un componente azaroso con un modelo determinístico (Nearing, 1998). Por este motivo, al ajustar los parámetros se debe priorizar uno de los dos grupos, los valores altos o los bajos. Los valores bajos son mayoría, por lo que un ajuste que priorice estos, permitiría incluir la mayoría de los eventos dentro del intervalo

¹¹ En estos suelos con arcillas montmorilloníticas, la macroporosidad varía con el contenido de humedad, a raíz de la expansión de las arcillas, lo cual dificulta también el modelado de la dinámica del agua en el otro extremo, cuando hay exceso de agua.

de confianza, pero se subestimaría mucho los valores elevados de erosión. Inversamente, un ajuste que priorice los valores altos, dejaría fuera del intervalo de confianza a la mayoría de los valores anuales, pero incluiría aquellos que sobrepasan el valor T de tolerancia. Se coincide con la visión de Ghidry y Alberts (1996), quienes enfatizan la importancia de predecir con mayor precisión los eventos grandes, a los cuales se les atribuye la mayoría de la erosión. Desde el punto de vista de la conservación es la medida más sensata.

2.4.3 Precisión de estimación de escurrimiento y erosión anual media posterior al ajuste

Una vez ajustados K_b y TC_b , mejoró el nivel de precisión de la estimación de escurrimiento y erosión del modelo (Tabla 2.3.2, Fig. 2.3.1). En el caso de la erosión, los estadísticos utilizados indican una muy buena precisión con una muy leve tendencia hacia la subestimación, en concordancia con la predicción 1.1. NS (0,87) y R^2 (0,97) son muy similares a los obtenidos por USLE/RUSLE, lo cual se condice con la predicción 1.2. Además superan ampliamente el valor mínimo considerado para tomar la modelación como satisfactoria (0,5), y se encuentran entre los valores más altos reportados para WEPP (Nearing et al., 2000; Laflen, et al., 2004; Moriasi et al., 2007). De los valores de erosión anual media simulada, 33% quedaron fuera del intervalo de confianza ($\alpha=0,05$), lo cual es menos del 40% reportado por Laflen et al. (2004). De esta forma se acepta hipótesis 1.

Al analizar por separado los manejos que produjeron baja erosión, el estadístico NS da resultados no satisfactorios (negativos), tanto para WEPP como para USLE/RUSLE, lo cual es de alguna manera esperable, considerando que este estadístico se ve muy influido por los valores elevados y que el modelo tiene una tendencia a la sobreestimación de valores bajos (Nearing, 1998). En este caso los dos modelos tienen coeficientes de determinación muy similares, mayores a 0,5 que sería lo esperable, mientras que WEPP incluye una mayor proporción de manejos dentro del intervalo de confianza que USLE/RUSLE (Fig. 2.3.2).

No fue posible comparar los resultados de erosión estimado con WEPP con los estimados con USLE/RUSLE utilizando el subfactor "Contenido de Agua en el suelo" de RUSLE (Renard et al., 1998), incorporado en las estimaciones de erosión realizadas por Hill et al. (2008), como era la idea original. Esto se debió a que no se pudieron simular con WEPP los períodos completos de 6 años de los sitios PAP y LE utilizados en el trabajo de Hill et al. (2008), por no contar con registros de lluvias cada 10 minutos para la totalidad de los períodos. Por otro lado, tampoco se pudieron hacer las simulaciones de los períodos de 3 y 4 años, de los sitios PAP y LE, respectivamente, utilizados en este capítulo, con USLE/RUSLE y el subfactor "Contenido de Agua en el suelo", ya que esta modificación aún no ha sido incorporada al *software* Erosion.

El modelo WEPP logró establecer diferencias entre manejos (tratamientos) en términos de erosión simulada, que a grandes rasgos coincide con la diferencia medida. Los manejos con

mayor y menor erosión fueron los de suelo desnudo y campo natural, respectivamente. La siembra directa, reduce la erosión simulada, así como la medida, con respecto al laboreo reducido (Tabla 2.3.3).

El hecho de existir una menor variación entre las simulaciones de escurrimiento que en las de erosión de las distintas parcelas relativo a lo medido, revela que la estimación de la erosión presenta en este modelo una mayor sensibilidad a los distintos manejos, que la estimación del escurrimiento (Figs. 2.3.2 y 2.3.3). Las mayores diferencias en los escurrimientos simulados por WEPP, se dan entre sitios y entre años, sin lograr reflejar diferencias claras entre tratamientos, más que entre el suelo desnudo y el suelo cubierto. Una solución a la falta de sensibilidad de conductividad hidráulica efectiva (valor base= K_b) al manejo, es introducir diferentes K_b , no solo en función del suelo, como en este trabajo, sino para cada cultivo (Rachman et al., 2008; Williams et al., 2010). Es probable que el tipo de cultivo explica mucho de la variación observada, que no se puede explicar por los parámetros determinados por las propiedades del suelo. Incluso el efecto de la intensidad de la lluvia sobre la tasa de infiltración depende del tipo de cultivo (Langhans et al., 2010).

2.4.4 Dificultades en la estimación del escurrimiento: posibles fuentes de error

De acuerdo a los estadísticos utilizados para la evaluación de la precisión del modelo y los rangos de precisión propuestos por Moriasi et al. (2007), la representación de WEPP de la erosión fue muy buena en ambos sitios estudiados, mientras que la estimación del escurrimiento no llegó a ser satisfactoria, mostrando mayores diferencias con los datos medidos en La Estanzuela (LE) (Tabla 2.3.3, Figs. 2.3.4 y 2.3.5).

Los trabajos que reportaron problemas en la estimación del escurrimiento anual o por eventos utilizaron el modelo sin calibrar (Ghidey y Alberts, 1996; Reyes et al., 2004; Grønsten y Lundekvam, 2006; Albaradeya et al., 2010). Aquellos que calibraron o ajustaron K_b y reportan resultados de escurrimiento, obtuvieron una precisión satisfactoria del escurrimiento (Pieri et al., 2007; Pandey et al., 2009; Shen et al., 2009). Sin embargo, la gran variabilidad que hay en los ensayos también dificulta la comparación con los resultados de este estudio. Pieri et al. (2007), reporta un índice NS de 0,75 para el escurrimiento anual, el cual está muy influido por un solo valor alto (100mm).

Como fue discutido en la sección 2.4.2, el único parámetro modificado a fin de mejorar la estimación de escurrimiento fue la conductividad hidráulica base (K_b), lo cual logró reducir la sobreestimación en el caso de LE y la subestimación en el caso de PAP. Se observó que debe haber algún otro factor que tiene que estar influyendo en LE, ya que es la peor representada, y aún aumentando la K_b por un factor de 10, no se logra reducir mucho más la sobreestimación. Además, como fue mencionado, el modelo no logró establecer una diferencia entre manejos,

en particular entre siembra directa y laboreo, cuando esta diferencia fue evidente en los datos de escurrimiento medido.

Las fuentes de error, que podrían haber conducido a esta pobre representación del escurrimiento, pueden encontrarse a nivel de fallas en las mediciones, a nivel del uso del modelo y armado de archivos, así como a nivel de una falla en la modelación que no contemple aspectos presentes para suelos, manejos o variables climáticas locales, como se detalla a continuación.

La medición de erosión presenta la dificultad intrínseca, asociada a la heterogeneidad espacial y temporal (Stroosnijder, 2005). Además, como aseveran Moriasi et al. (2007), “los datos medidos raramente están libres de error”. En el caso de las parcelas utilizadas en este estudio, pueden haber existido problemas en el sistema de recolección del agua, o en la frecuencia de registros de eventos de escurrimiento y erosión¹². Por otro lado, al no contar con registros con suficiente detalle como los requeridos por WEPP, hizo que en algunos casos se asumieran determinados manejos en la elaboración de los archivos.

El modelo en si, además cuenta con limitantes a la hora de simular rotaciones. En primer lugar puede simular sólo un cultivo a la vez, lo cual no se condice con los casos de cultivos consociados y praderas mixtas. En el caso particular del campo natural no permite simular un crecimiento con dos picos anuales. Finalmente, se dificulta la simulación del crecimiento de la maleza, por su heterogeneidad espacial y temporal y porque no es rutina registrar información detallada de esta vegetación.

En lo que respecta al modo en que el modelo WEPP simula el escurrimiento, se mencionaron en el capítulo 1 las limitantes presentadas debido a los supuestos de considerar al flujo superficial únicamente como Hortoniano y a la infiltración en modo de pistón, según la ecuación de Green-Ampt modificada por Mein-Larson (GAML) (Stone et al., 1995). En particular, el flujo superficial Hortoniano es raro que ocurra en suelos bien desarrollados de zonas templadas, como es el caso de nuestro país. El flujo no hortoniano dificulta la simulación, ya que implica un intercambio dinámico entre el flujo superficial y el subsuperficial, lo cual puede hacer oscilar la caudal o profundidad de escurrimiento y por lo tanto el esfuerzo cortante y la capacidad de carga, que condicionan el grado de erosión.

Para la infiltración y el escurrimiento el parámetro clave es la conductividad hidráulica efectiva cuyo valor base, K_b , es calculado en función del tipo de suelo. Wischmeier (1966 en Alberts, et al., 1995) plantea que la tasa de infiltración depende más de las características de las condiciones de la superficie del suelo y el manejo, que del tipo de suelo y la misma

¹² Esto implicaría que, aún existiendo recolección del agua de escurrimiento, este evento no haya sido registrado por motivos de falta de personal, por ejemplo. Al contrastar los eventos de lluvia de cada año con los registros de escurrimiento, se notó la existencia de varios eventos con láminas cercanas a los 40mm, para los cuales no se contaba con registros de escurrimiento en la Estanzuela, coincidiendo con una sistemática sobreestimación con WEPP. Esto sucede principalmente en el año 1986, coincidentemente con el año que presenta mayor diferencia entre el escurrimiento medido y el simulado con la K_b por defecto. Esto podría insinuar que hayan faltado registros, aunque en ambos casos es difícil de corroborar, dada la distancia en el tiempo del ensayo.

aumenta para eventos mayores. Por consiguiente, en WEPP para un suelo con cultivo, K_b es modificada por los factores de altura de vegetación, porcentaje de cobertura de vegetación y de residuos, y lámina de lluvia. Para un suelo desnudo, K_b es modificada por los factores de encostramiento, la rugosidad y la energía de la lluvia acumulada desde el último laboreo, que a su vez están afectados por la densidad aparente, el porcentaje de arena y de arcilla y la capacidad de intercambio catiónico. Pero estas modificaciones han resultado insuficientes o ineficientes en este estudio, así como en el caso del trabajo de Rachman et al. (2008), quienes encontraron un mejor ajuste del modelo luego de modificar K_b para cada manejo. De profundizar esta línea de estudio, futuros trabajos deberán analizar la posibilidad de otros factores que tengan influencia en K_b o si los factores ya considerados influyen en mayor o menor medida para nuestras condiciones locales. Langhans (2010) ha propuesto ecuaciones de pedotransferencia alternativas, que incluyen la intensidad de la lluvia como un factor determinante del valor de la conductividad hidráulica efectiva dinámica, además de destacar la incidencia del porcentaje de arenas finas en el proceso de encostramiento. Sin embargo, como ya se mencionó, en sitios donde los eventos de lluvia de alta intensidad son raros, la lámina total tiene mayor influencia sobre el escurrimiento que la intensidad (Grønsten y Lundekvam, 2006; Albaradeya, 2010).

Por otro lado, en el proceso de estimación, el modelo realiza un balance hídrico previo, para decidir si debe escurrir o no. Para esto WEPP utiliza como base, varios de los algoritmos desarrollados para SWRRB (Williams et al., 1985 en Nicks et al., 1995) con modificaciones a fin de mejorar la estimación de los parámetros de intercepción de la precipitación, percolación y evaporación del suelo. Podrían también estudiarse cada uno de los procesos de este balance con el objetivo de poder verificar si WEPP los está modelando bien para las condiciones locales.

Deben analizarse los mecanismos por los cuales en los resultados de WEPP es posible pasar de una imprecisa estimación de escurrimiento a una muy buena estimación de erosión, siendo que en principio la segunda estimación se realiza en base a la primera (presentes en las ecuaciones de desagregación de suelo en y entre canalículos como tasa de escurrimiento y esfuerzo cortante hídrico). Una posibilidad es que en este caso, por ser parcelas cortas, tenga una mayor participación la erosión entre canalículos, en la cual la intensidad de la lluvia tiene un papel preponderante. Es decir, que el principal mecanismo de erosión sería por el golpeteo de las gotas de lluvia, lo cual el modelo estaría representando bien, independientemente del cálculo del escurrimiento. Sin embargo, como se mencionó antes, el hecho de mostrar sensibilidad en el parámetro TC, implica que el modelo está simulando erosión en canalículos. Otra posibilidad, es que de alguna manera, se compense la poca sensibilidad que tiene el escurrimiento a través de una “hipersensibilidad” de los factores de ajuste de las erodabilidades en y entre canalículos (descritas en la introducción y el capítulo 1). Probablemente, un estudio más detallado de los procesos que inciden en la infiltración, así como medidas de los parámetros sensibles para contrastar con los calculados por defecto y con los que ajustan a las medidas de escurrimiento y erosión, ayuden a esclarecer estos aspectos.

2.4.5 Precisión de estimación de escurrimiento en parcelas con repeticiones

Los altos coeficientes de variación presentados para los eventos de escurrimiento en las parcelas de INIA LE con soja continua durante dos años, confirman la existencia de una gran heterogeneidad espacial, a pesar del hecho de ser tres réplicas que se encuentran una al lado de la otra, sobre un mismo suelo, con igual pendiente y manejo. Esta heterogeneidad dificulta enormemente lograr una precisión en la simulación, ya que la misma al ser determinística da un solo valor de salida y no un rango. Ruttimann et al. (1995; en Nearing et al., 1999) sugiere utilizar la mayor cantidad de réplicas posibles para experimentos de erosión por los altos coeficientes de variación reportados para erosión también con tres réplicas. No existe aún una fórmula de cálculo de intervalo de confianza a partir de un dato medido, propuesta para el escurrimiento, así como la utilizada por Laflen et al. (2004) para erosión.

El modelo WEPP representó la mayoría de los eventos de escurrimiento medidos (Fig. 2.3.7), aún siendo que gran parte de estos eran menores o iguales a 2 mm (Fig. 2.3.6) y que la tendencia que tiene WEPP es a operar mejor para eventos grandes (Ghidey y Alberts, 1996; Tiwari et al., 2000; Laflen et al., 2004). Los eventos no representados fueron de valores muy bajos ($< 1,12\text{mm}$) y los representados fueron, por lo general, sobreestimados (Fig. 2.3.7). Pieri et al. (2007) también reporta que WEPP simuló una menor frecuencia de eventos que los medidos, mientras que los simulados fueron más intensos. La magnitud de la sobreestimación no permitió tomar la simulación de escurrimiento con WEPP en La Estanzuela como aceptable, en función de los estadísticos utilizados, a pesar de tener un coeficiente de determinación cercano a 0,6. Ghidey y Alberts (1996), también reportaron una sobreestimación para tratamientos de soja continua

La mayor sobreestimación se concentró en el año 2009. Debe tomarse en cuenta que el año anterior había sido muy seco, con 590 mm de precipitación, cuando la media es 1292 mm y los años 2009 y 2010 tuvieron 1214 y 993 mm de precipitación anual respectivamente (Fig. 2.3.7). Ghidey y Alberts (1996) han reportado problemas de simulación en estas condiciones, mencionando que en las estaciones secas, la mayor parte de los eventos ocurrieron luego de un período de sequía largo y el modelo sobreestimó escurrimiento de varios eventos en los que se observó poco o nada de escurrimiento.

Uno de los motivos por los cuales se puede dar esta sobreestimación luego de períodos de sequía, ya discutido en la sección 2.4.2, es la influencia de un posible agrietamiento, el cual es favorecido por los periodos de sequía. En suelos donde hay agrietamiento se viola el supuesto de Green-Ampt. Espino et al. (1996) (en Langhans et al., 2010) y Yu (2000) obtuvieron sobreestimación del escurrimiento para eventos de lluvia de alta intensidad en suelos agrietados.

Deben tomarse en cuenta, además, limitantes propias del ensayo. Una primer limitante es sólo contar con datos de escurrimiento y no de erosión, considerando lo discutido en las secciones anteriores que WEPP ha mostrado ser más preciso en la estimación de la erosión que en la del escurrimiento. El hecho de contar con tan pocos datos, tampoco permite analizar a escala anual, teniendo en cuenta que la precisión y confianza de las estimaciones del modelo mejoran a medida que se amplía la escala temporal de las variables de respuesta (Zhang et al., 1996). Asimismo, debe considerarse que no se realizó un ajuste particular en base a los valores medidos. El ajuste utilizado fue el obtenido para el mismo sitio (LE), a partir de las medidas de escurrimiento y erosión del los años 1985 al 1988 (ver secciones 2.4.1 a la 2.4.4), ya que al comenzar este trabajo sólo se consideró la posibilidad de ajustar K_b en función de las características del suelo y no en función del cultivo, como hicieron Rachman et al. (2008) y Williams et al. (2010).

2.4.6 Evaluación de modelos de erosión para Uruguay: herramientas y proyección

Los estadísticos utilizados en este estudio para la evaluación del modelo, resultaron adecuados, ofreciendo información diferente y complementaria, así como coherente entre ellos. La complementariedad se obtuvo en primer lugar, por añadir a la representación gráfica de los resultados mediante una regresión, un índice de eficiencia y un estadístico dimensional. Una regresión de mínimos cuadrados asume que puede haber error en el valor estimado, mas no en el valor observado, lo cual dista notoriamente de la realidad, como fue planteado por Nearing et al. (1999). Siguiendo este planteo es que, en segundo lugar, se estableció un intervalo de confianza para los datos de erosión medidos en los ensayos de PAP y LE y lo de escurrimiento medidos en el ensayo de LE con repeticiones, lo cual responde por la variabilidad que existe en los datos medidos.

No sólo la regresión lineal tiene sus sesgos, también es importante reconocer la de los otros estadísticos utilizados. Por un lado, NS está mayormente influido por los valores altos, y se vio favorecido por la presencia de valores altos de escurrimiento y erosión, principalmente producto de las parcelas de escurrimiento con suelo desnudo. Lo mismo ocurre con SRS, el cual se decidió no utilizar, por considerar que no ofrece más información que NS, como fue planteado en la introducción. Por otro lado, PBIAS compensa los errores de estimación cuando estos ocurren de forma balanceada tanto en el sentido positivo como en el negativo, más allá de la magnitud, como ocurrió en el caso del escurrimiento en PAP.

Una falencia importante, como es habitual que suceda en países con pocos recursos para la investigación, fue la falta de datos disponibles para realizar el estudio y la validación del modelo WEPP. Si bien los ensayos de los años 80 y 90 cuentan con más de seis años de medidas de eventos de escurrimiento y erosión, pudo utilizarse sólo parte de ellos, dado que además era necesario contar con datos de pluviógrafo completos para ese período. En este caso ese fue el factor que limitó el manejo de los datos. En el caso del ensayo de soja, el

problema es que es muy reciente, y sólo se ha alcanzado a recabar dos años de datos. Una de las principales consecuencias de la escasez de datos fue la imposibilidad de partir el set de datos en dos, a fin de utilizar la mitad para calibrar o ajustar y la otra mitad para validar el modelo.

Finalmente, en el proceso de validación surgió la dificultad de llegar a resultados comparables con la bibliografía. El modelo WEPP ofrece un rango tan amplio de opciones de variables de entrada y de respuesta, que difícilmente dos estudios hayan seleccionado los mismos. Ya sea por utilizar el componente de ladera o de cuenca; el modelo calibrado o sin calibrar, o con ciertos parámetros medidos; con estos parámetros fijos o dinámicos; por comparar resultados por eventos, por mes o por año; con datos climáticos medidos o generados con CLIGEN, etc.

Pese a las limitantes mencionadas, se obtuvo una muy buena precisión en la estimación de la erosión de los dos sitios con erosión medida, con un nivel aceptable de error luego de ajustar los parámetros bases de conductividad hidráulica y esfuerzo cortante hídrico. Esta precisión llegó a ser comparable a la de USLE/RUSLE. Por el contrario, la estimación del escurrimiento presentó baja precisión y poca sensibilidad al manejo para los tres ensayos, aun luego del ajuste de K_b . El área de simulación del escurrimiento merece un estudio a mayor profundidad para las condiciones locales, considerando al detalle los procesos que determinan la existencia o no de escurrimiento dentro del balance hídrico del suelo.

El hecho de haber sido necesario realizar un ajuste, confirma la cautela recomendada frente a la aplicación de modelos físicos a condiciones locales sin previa calibración o ajuste. Al modificar los valores de K_b y TC, lo que se hace es saltar las ecuaciones de pedotransferencia utilizadas por el modelo para estimar estos parámetros, ya que se entiende que no reflejan las características sitio específicas, no siendo adecuadas para los suelos locales estudiados. Un cálculo alternativo de K_b , el cual incorpora el efecto del horizonte subsuperficial sobre la tasa de infiltración, resultó aplicable al suelo de PAP, el cual presenta una importante diferenciación textural.

Existe la alternativa de utilizar valores medidos de estos parámetros, los cuales se pueden obtener a partir de un sistema no demasiado complejo de parcelas con lluvia artificial y manguera (Gonçalves, 2010). Sin embargo, Langhans et al. (2010) plantean que el hecho que la escala de las mediciones sea por lo general menor que la de las unidades de modelación (laderas o cuencas), puede llevar a la necesidad de calibración, más que al uso de valores medidos. En este mismo sentido, lo analizado en este trabajo sería válido a escala de parcela. Debería considerarse con prudencia la extrapolación a cuencas, ya que puede existir un efecto de escala sobre los parámetros de modelo WEPP, como advierten dos Santos, et al. (2010) quienes en el pasaje de la escala parcela a escala subcuenca, pasando por microcuenca, tuvieron la necesidad de aumentar los valores de K_b y TC_b .

Además de la aplicación de WEPP sin calibrar con parámetros locales y de la extrapolación a otras escalas, un tercer aspecto en el cual se debe trabajar con cautela es la extrapolación a otros cultivos o manejos. Distintos autores han manejado esto con diferentes criterios, algunos

incluso han utilizado distintos K_b por cultivo o manejo (Rachman et al., 2008; Williams et al., 2010). Sin duda, cuanto mayor sea el detalle que se logre en los parámetros de entrada, más precisa podrá ser la variable de respuesta. Sin embargo, se vuelve a la discusión de lograr un justo equilibrio entre incremento de información necesaria para realizar las estimaciones y la imprecisión de las mismas.

En lo que respecta a promedios anuales de erosión, si bien WEPP ajustado logró una alta precisión, USLE/RUSLE mostró ser superior. Aun considerando la salvedad del sesgo que USLE/RUSLE presenta por ser comparado contra los datos con los cuales fue ajustado, que en este trabajo también sería una característica compartida por WEPP ajustado, USLE/RUSLE cuenta con la ventaja indiscutible de la simpleza en el uso y la amplia difusión que ha tenido.

Sin embargo, como se ha planteado en la introducción, el enfoque de los estudios de erosión se viene ampliando, entendiendo a los fenómenos de escurrimiento y erosión como problemas ambientales que afectan al sistema en su conjunto, más allá de la degradación del suelo, el cual sería apenas uno de los efectos de la erosión, el efecto *in situ*. Actualmente están cobrando mayor interés los estudios de calidad de agua por sedimentos y agroquímicos (JET-DINAMA, 2010), para los cuales también es necesario contar con modelos que contemplen estos aspectos fuera del sitio. Asimismo, esto puede requerir bajar la escala temporal de variable de respuesta, de promedios anuales a eventos particulares, considerando además que los eventos extremos son los que mayor erosión provocan y que con las tendencias de cambio climático se proyectan ser cada vez más frecuentes. Es en estas áreas que el modelo WEPP tiene gran potencial para ser usado, ya que ofrece estas variables de respuesta. Como se ha visto en este trabajo, la utilización del modelo es laboriosa, debe hacerse con mucha cautela y contando con una base de datos amplia.

Deberá allanarse el camino para poder seguir avanzando los estudios en esta línea de aplicación del modelo WEPP al Uruguay. En primer lugar ampliando la base de datos climática generada, con el detalle requerido por WEPP. Gracias a los avances tecnológicos en la materia, este aspecto es probable que deje de ser una limitante ya que cada vez es más común la utilización de pluviógrafos electrónicos-digitales. Contar con mayor cantidad de ensayos, sería una ventaja para poder llegar al nivel de evento individual en erosión, así como para poder obtener medidas de los parámetros sensibles. Hacer un estudio con mayor profundidad de los procesos que determinan el escurrimiento estableciendo el balance hídrico para las condiciones locales, con el objetivo verificar si WEPP los está modelando bien. Finalmente, frente a la multiplicidad de variables de entrada y de modos de operación, así como a la dificultad de conseguir los datos en nuestro país, podría desarrollarse una interface más simple de usar, con una base de datos pronta para el Uruguay, desde el punto de vista climático y de suelos, así como la que ha desarrollado el USDA¹³. De este modo el uso del modelo WEPP podría ser extendido a un usuario común, más allá de la investigación, como ser productores y empresas agrícolas, para la planificación predial.

¹³ <http://milford.nserl.purdue.edu/wepp/weppV1.html>

3. CAPÍTULO 3

Estimación de la erosión bajo diferentes sistemas de rotaciones con soja en suelos representativos del litoral oeste

3.1 Introducción

3.1.1 Intensificación del uso de los suelos agrícolas del Uruguay

El reciente crecimiento agrícola en la región tiene características sin precedentes. Díaz (2006) contrasta el aumento de un 320% del área cultivada en el Cono Sur de América Latina en los últimos 40 años con un 15% de aumento a nivel mundial en el mismo período de tiempo. El cultivo de soja es el principal responsable de este proceso, el cual se ha acelerado por una conjunción de factores tecnológicos, logísticos y macroeconómicos (Díaz, 2006).

Un factor determinante en este proceso es la introducción del paquete tecnológico de la siembra directa (SD), alternativa al laboreo, considerado la principal causa de degradación del suelo. La SD es el sistema de agricultura moderna de preparación del suelo y la vegetación para la siembra que más minimiza el disturbio realizado para la colocación de la semilla, planteándose como alternativa al laboreo. Por sus características la SD depende de altos niveles de uso de herbicidas para el control de las malezas, en particular los que tienen Glifosato como principio activo (Durán y García-Préchac, 2007). Esto se combina con la aparición en el mercado de los organismos genéticamente modificados que en el caso de la soja transgénica le otorgan resistencia genética a herbicidas; y con el vencimiento de la patente del Roundup, que a fines de los 80 hace más accesible el precio de los herbicidas con Glifosato como principio activo (Díaz, 2001; en Durán y García-Préchac, 2007). La incorporación de este paquete tecnológico permitió un aumento de 0.8 a casi 3 toneladas de granos por hectárea (del año 1960 a 2003) (Díaz, 2004).

Además esto ocurre en un contexto en el cual aumentó la demanda de soja enormemente, lo que conllevó a un aumento en los precios, que se triplicaron del año 2000 al 2008 (IICA, 2008). Finalmente también se ha dado una transformación en las lógicas de producción y un crecimiento en escala, con nuevas grandes empresas agrícolas que desplazan al productor tradicional, ya que la nueva tecnología le da más eficiencia económica y productividad a las primeras (Arbeletche y Carballo, 2007). La interacción de estos factores otorgan una

competitividad potenciada a la soja, llevando a una duplicación de la producción de soja en el Cono Sur de 45 a 90 millones de Mg/año en tan sólo 6 años (Díaz, 2006).

En Uruguay la superficie de tierra dedicada a la agricultura de secano venía en descenso desde la mitad del siglo pasado (de 1.400.000 ha a 400.000 ha de chacra aproximadamente). A partir del año 2000, con el impulso de la soja, comienza a revertirse esta tendencia y, si bien no se ha llegado a la extensión de los años 50, el aumento superficie de chacra se ha casi triplicado en 10 años. La mayor parte de esta superficie está ocupada por cultivos de soja que se han expandido desde el año 2000, hasta llegar en la zafra 2009-2010 a un nuevo máximo histórico de 863,2 mil hectáreas sembradas, siendo el principal cultivo estival en nuestro país. Esta expansión se ha dado fundamentalmente dentro de la zona agrícola del Litoral Oeste del país. La siembra se efectúa casi en su totalidad con variedades de material transgénico resistente al herbicida glifosato y con SD, por lo tanto existe un empleo generalizado de este producto. En términos de producción se alcanzó el record de 1,8 millones de toneladas (casi 70 veces mayor a la del año 2000) con un rendimiento 2105 kg/ha sembrada (similar al del año 2000). Concomitantemente con este aumento expansivo de la agricultura en Uruguay, se ha dado un aumento en la intensidad del uso del suelo, ya que medida en términos de cultivos por unidad de tierra por año ésta se ha incrementado de 1 en el año 2000 a 1,5 en el 2010. Hacia el año 2011, hubo un descenso en el rendimiento y la producción total, manteniéndose la superficie plantada prácticamente igual (DIEA, 2011).

Este proceso de expansión e intensificación agrícola, que genera fuertes incrementos en las variables macroeconómicas relacionadas tales como el PIB y el VBP, genera a su vez, como plantea Arbeletche (2008) otros efectos de índole socioeconómicos. Un fenómeno que se ha dado es una fuerte concentración productiva con nuevos agricultores desplazando a los agricultores tradicionales, ya que las dificultades presentadas a los pequeños y medianos agricultores para competir con los nuevos grandes empresarios, los obliga a salir de la producción, buscando actividades alternativas. Actualmente a nivel agrícola general el 1% de los agricultores concentra el 30% del área cultivada, y en el caso de la soja esto es aún más acentuado: la mitad de superficie plantada pertenece a chacras de más de 2.000há. Sin embargo, este cambio no se reflejó necesariamente en concentración de la propiedad de la tierra ya que la expansión productiva en general se realiza en su mayoría sobre campos arrendados. En el año agrícola 2007/08, cerca del 65% de las chacras fue sembrado en tierras que no pertenecen al productor (Arbeletche, 2008; IICA, 2009). Estas circunstancias podrían llevar a una situación difusa con respecto a sobre quién cae la responsabilidad con respecto al cuidado del suelo, al no ser propiedad de quien lo explota. Por este motivo, se aprobó en 2009 la Ley N° 18.564, por la cual se compromete tanto al tenedor de la tierra como al propietario a velar porque las normas técnicas establecidas por el MGAP se apliquen.

Anteriormente al crecimiento de la soja, Uruguay había evolucionado hacia un modelo mixto agrícola ganadero que, con praderas de leguminosas y gramíneas había logrado revertir el deterioro de la calidad del suelo, mejorando la productividad y la conservación de los suelos (García-Préchac y Durán, 1998). En los años 90 toda la agricultura de granos terminó haciéndose en rotación con praderas. Con la llegada de la soja, si bien mayoritariamente se

cultiva con siembra directa, otras características del nuevo manejo de este cultivo implican un aumento en la presión ejercida sobre el suelo, lo cual ya ha comenzado a generar preocupación. En primer lugar, el incremento del área agrícola (soja) se basó en la intensificación de la agricultura en la zona núcleo y en la expansión a nuevas regiones antes consideradas marginales en partes por pertenecer a ecosistemas más frágiles. En segundo lugar, el cultivo continuo de soja o predominio de la soja en la rotación deja balances negativos de C y N en el suelo y su escaso rastrojo, de baja relación C-N, no brinda cobertura eficiente y duradera para minimizar la erosión hídrica. Esto, junto con una disminución o eliminación de las pasturas perennes en la rotación, deja al suelo en una situación mucho más vulnerable a la erosión hídrica (Terra et al., 2009). Este manejo no favorece la incorporación de materia orgánica al suelo, a la vez que aumenta la pérdida de la misma a través de la erosión.

Actualmente, la erosión es uno de los principales problemas ambientales del Uruguay. Provoca la degradación de los suelos, con la consiguiente pérdida de productividad y la contaminación de las aguas. Con los cambios en el uso y manejo del suelo mencionados se aumenta la probabilidad de generar impactos ambientales negativos. En este sentido, es preciso conocer el impacto de sistemas de agricultura continua basados en soja sobre la erosión potencial que pueden generar. Simulaciones realizadas con el modelo USLE/RUSLE para suelos de nuestro país indican que, indistintamente de que el manejo sea con laboreo reducido o con siembra directa, en sistemas de soja continua se presentan tasas anuales de erosión mayores a las tolerables. Esta erosión se ve reducida al nivel de tolerancia¹⁴, al intercalar cultivos de invierno, y alternando con pasturas de varios años podría incluso quedar por debajo de este nivel (Clérici et al., 2004).

3.1.2 Simulaciones de erosión como herramienta para la toma de decisiones respecto al uso y manejo de los suelos agrícolas del Uruguay

El modelo empírico utilizado por Clérici et al. (2004) tiene extensos antecedentes de uso y validación para nuestro país (Clérici y García-Préchac, 2001). Sin embargo, el modelo de erosión Water Erosion Prediction Project (WEPP), desarrollado como alternativa al USLE/RUSLE, es de incipiente aplicación en nuestro país (Jorge et al., 2010; Jorge et al., 2011). En el Capítulo 1 de esta Tesis se detallaron antecedentes, funcionamiento y diferencias entre estos modelos, y en el Capítulo 2 se realizó una evaluación y validación WEPP para suelos del Uruguay. El generador climático CLIGEN, desarrollado específicamente para el modelo WEPP, permite realizar simulaciones de escurrimiento y erosión en sitios para los cuales no se cuenta con series completas de información climática, o en escenarios futuros dentro de un contexto de cambio climático. Éste es el único generador que puede crear patrones de tormenta, determinando la duración, la intensidad pico y el tiempo al pico de

¹⁴ Establecido en $7\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ para la mayoría de los suelos desarrollados del nuestro país (Puentes y Szogi, 1983).

intensidad, factores sumamente incidentes en los procesos de escurrimiento y erosión (Yu, 2003). El funcionamiento de este generador climático también se describió en el Capítulo 1.

El generador CLIGEN ha sido extensamente validado para los Estados Unidos desde el siglo pasado, en este siglo ha comenzado la validación en los otros continentes, llegando a nuestra región por estudios realizados en Brasil (ver Capítulo 1). Ya Nicks (1995) planteaba que, si bien las diferencias encontradas en la desagregación de la tormenta simulada en estudios comparados con la real, puede generar errores significativos en el escurrimiento, el ajuste general del escurrimiento simulado con las distribuciones de intensidad aproximadas y el escurrimiento simulado con distribuciones de intensidad observadas ha resultado satisfactorio, con un 90% de correlación. Los trabajos de validaciones posteriores, realizados dentro y fuera de los Estados Unidos, concluyen que en general, CLIGEN estima eficientemente las medias de los elementos climáticos evaluados distintos a la precipitación. Referente a las variables de precipitación, se estima con mayor precisión las láminas anuales y mensuales, las probabilidades de lluvia posterior a un día lluvioso o seco y los períodos lluviosos y de seca. Las variables que se han reportado con variaciones sensibles han sido la precipitación diaria, la intensidad máxima de precipitación y la duración de los eventos (Adão et al., 2005; Kou 2007; Zhang y Garbrecht, 2003).

Las diferencias que surgen, al compensarse, se ven disminuidas a medida que se amplía la unidad temporal de salida. Por ejemplo, la leve tendencia a sobrestimar la lluvia diaria para pequeñas tormentas se compensa con la tendencia a subestimar las grandes tormentas (Zhang y Garbrecht, 2003); el modelo CLIGEN sobreestima la intensidad de las tormentas, pero subestima frecuencia y largo de las mismas (Yu, 2000). El problema con este último caso es que también estaría sobrestimando la erosividad de la lluvia. Sin embargo, como se planteó en la introducción del capítulo 2, depende de las características pluviométricas del sitio, si éste es más sensible la variable intensidad o a la lámina total de lluvia para la estimación de erosión. Y a su vez, Kou (2007) plantea la ventaja del uso de este generador climático para modelos de erosión, más que para los de crecimiento vegetal, ya que los primeros son más sensibles a lámina total del evento (lo cual es calculado eficientemente por CLIGEN) que a la duración del mismo (estimación realizada con menos eficiencia).

Las herramientas estadísticas que se han utilizado en la validación de las salidas de CLIGEN han sido principalmente regresiones, análisis de varianza de una vía (y sus equivalentes no paramétricos) y variación porcentual (Adão et al., 2005; Kou 2007; Zhang y Garbrecht, 2003). Los principales problemas que se han manifestado frente a estos análisis son, en primer lugar la utilización de análisis paramétricos, con datos que no tienen distribución normal, pero los autores justifican su uso por contar con muestras muy grandes (de varios miles de datos). En segundo lugar, el mismo hecho de contar con muestras grandes implica un sesgo por el cual muy pequeñas diferencias son identificadas como significativas (Zhang y Garbrecht, 2003). Finalmente, por la falta de registros meteorológicos, muchas veces se termina contrastando las simulaciones con la bases de datos con la cual se calcularon los parámetros de entrada de CLIGEN.

Las simulaciones de erosión con CLIGEN y WEPP permitirían plantear escenarios productivos hipotéticos a ser evaluados, no sólo en función de promedios anuales, sino también tomando en cuenta las probabilidades de ocurrencia de eventos extremos, los cuales pueden llevar a cambios ambientales irreversibles a nivel de los suelos y de los cursos de agua receptores. El objetivo de este capítulo fue evaluar desde el punto de vista de la erosión producida, sistemas agrícolas con diferente proporción del cultivo de soja en la rotación, en suelos representativos del litoral oeste, con la aplicación del modelo WEPP, tomando en cuenta bajo las limitantes que presenta. Para ello se realizará una validación previa del generador climático CLIGEN, y se contrastará la erosión provocada por diferentes rotaciones sobre varios suelos con características morfológicas y topográficas distintas.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Sitio

Se simuló erosión para diferentes rotaciones con soja en cuatro suelos del litoral suroeste del Uruguay, considerándose laderas en los rangos de porcentaje de pendientes de 3% a 7% y de largos de 10m a 300m.

Clima

La caracterización climática de la zona está dada por la Estación Climática de INIA La Estanzuela (Departamento de Colonia; 34° 25' S 58° 0' W), presentada en Materiales y Métodos del Capítulo 2. Como en el resto del país, no existe ni una estación seca, ni una lluviosa bien definida, presentando gran variabilidad interanual, influida por los fenómenos de El Niño y La Niña (Castaño, et al., 2010).

Suelos

Se seleccionaron suelos representativos del litoral oeste del Uruguay cercanos (en un radio menor a 120 km) a la Estación Climática de INIA La Estanzuela. Los suelos utilizados corresponden a Brunosoles Éútricos y un Brunosol Subéútrico, los mayormente extendidos y utilizados en la agricultura en nuestro país (Altamirano, et al., 1976) y se presentan en la Tabla 3.2.1. En el Anexo 3.1 se detallan datos del perfil de cada uno.

Tabla 3.2.1. Clasificación de suelos utilizados para las simulaciones con el modelo WEPP

Clasificación ¹	Soil Taxonomy ²	Unidad de Suelo ¹	Registro ³	Referencia ⁴
<i>Brunosol Éútrico Lúvico, Fr, V</i>	<i>Vertic Argiudoll</i>	Cañada Nieto (CñN)	USDA 15	BELc
<i>Brunosol Éútrico Típico, LAc, V</i>	<i>Pachic Argiudoll</i>	Bequeló (Bql)	USDA 16	BETb
<i>Brunosol Éútrico Típico, LAc, V</i>	<i>Typic Hapludert</i>	Ecilda Paulier-Las Brujas (EP-LB)	USDA 18	BETe
<i>Brunosol Subéútrico Típico, ArFr</i>	<i>Typic Argiudoll</i>	Cañada Nieto (CñN)	P 231	BSTc

¹Clasificación de Suelos del Uruguay (Altamirano, et al., 1976) y datos no publicados de la Div. de Suelos y Aguas, MGAP (Fr=Franco, LAc= Limo-Arcilloso, V); ²Soil Taxonomy (Durán et al., 1999); ³Compendio de suelos del Uruguay (Div. de Suelos y Aguas, MGAP, 2002); ⁴Sigla de referencia que se utilizará en este trabajo.

3.2.2 Sistema de uso y manejo

Se simularon 7 rotaciones indicadas en la Tabla 3.2.2, cada una con 2 manejos: Siembra Directa (SD)¹⁵ y Laboreo Reducido¹⁶ (LR) lo cual conformó un total de 14 variantes coincidentes con las sugeridas por Clérico et al. (2004).

Tabla 3.2.2. Rotaciones simuladas con WEPP

Rotaciones*
Soja Continua
Soja Trigo
Soja Cobertura
MST/PPP
MST/PPPP
MSTST/PPP
MSTST/PPPP

* M = maíz, S = soja, T = trigo y P = pastura.

3.2.3 Preparación de bases de datos y simulación

Se compilaron bases de datos climáticos, topográficos, de suelo y de manejo con los datos disponibles de la zona estudiada y las rotaciones propuestas, adaptando los archivos a un formato compatible con la versión WEPP 2010.1.¹⁷

Procesamiento de datos de Clima

Se desarrolló un archivo de parámetros climáticos compatible con CLIGEN 4.3 para la Estación La Estanzuela en base a una serie de datos climáticos diarios de 44 años, (de 1965 al 2008; temperatura del aire máxima y mínima, humedad relativa, radiación, velocidad del viento y lámina de lluvia diaria), y a una serie de 13 años de precipitación acumulada cada 10 minutos (de 1984 al 1996). Ambas series fueron proporcionadas por la Unidad de Agro-Clima y Sistemas de Información (GRAS) del INIA. Los datos climáticos que caracterizan el sitio se presentaron en la Tabla 2.2.1 del Capítulo 2.

En una primera instancia, se procesaron los datos de la serie de 30 años. En primer lugar, con los datos de precipitación diaria se calculó la media, el desvío estándar y el coeficiente de asimetría. Luego, se calcularon las probabilidades de lluvia para un día dado según si el día

¹⁵ Manejo descrito en sección 3.1.1

¹⁶ Se realiza, principalmente con herramientas verticales, que reducen el volteo del pan de tierra. En este caso se utilizaron excéntrica y vibrocultivador.

¹⁷ Disponible en <http://www.ars.usda.gov/research/docs.htm?docid=10621>

anterior fue lluvioso o seco. Además, para cada mes del año, se calculó la media de las temperaturas máximas y mínimas del aire, de la radiación solar y del punto de rocío; así como el desvío estándar para todas estas variables, menos la última. Al no estar disponibles en las Estaciones Experimentales de INIA los datos de dirección del viento¹⁸, como lo requiere el modelo, se utilizaron los proporcionados por la base de datos de CLIGEN correspondiente a la Estación de Carolina del Sur, Estados Unidos, la cual se encuentra a una latitud y cercanía al mar similar a la Estación de La Estanzuela, con un cambio introducido en el orden de los meses debido a que esta Estación es del hemisferio Norte¹⁹.

En una segunda instancia, se utilizaron los datos de pluviógrafo con registros de lluvia cada 10 minutos para calcular la distribución acumulativa de valores de tiempo relativo a la intensidad pico de lluvia (T_p) y la mayor intensidad de precipitación en 30 minutos (Max.5P). Para obtener el valor T_p , en primer lugar, se eliminaron todos los períodos inter-tormenta con lámina de precipitación cero y se determinó el pico de cada evento de lluvia a lo largo de todo el año, sin discriminar por mes. Estos cálculos se realizaron, tomando como mínimo para separar eventos de lluvia, un período de 3 horas con precipitación cero²⁰. En segundo lugar, se calculó la razón entre el tiempo al punto medio del intervalo en el cual ocurre el pico de intensidad, y el tiempo total del evento de lluvia. Finalmente, se determinó la fracción del total de los eventos que cayó dentro de cada uno de los 12 intervalos de clase acumulativos en el rango de 0,0 a 1,0. (Flanagan and Nearing, 1995). Para cada mes, de cada año del período, se determinó la mayor intensidad de precipitación en 30 minutos. Max.5P se calculó como el promedio mensual de estos máximos.

Con estos datos y los de posición, se creó un archivo con extensión *par*, con el cual se generó una nueva estación climática dentro del programa correspondiente a la Estación meteorológica de La Estanzuela, Colonia. A partir de éste, se generó un archivo climático de 100 años para esa estación, con extensión *cli*, que es el que se utiliza para ejecutar WEPP.

Se verificó que no se simulara congelamiento del suelo, así como que las precipitaciones simuladas fueran siempre en forma de lluvia y no en forma de nieve. Para aquellos días en que, habiendo un evento de precipitación, la temperatura mínima era negativa, se modificó la misma al valor 0,1. Con este cambio se evitaron la simulación de precipitaciones en forma de nieve y el congelamiento del suelo.

¹⁸ Se debe aclarar que el modelo WEPP tiene sensibilidad nula a esta variable en las condiciones climáticas de nuestro país, ya que sólo influye en el mecanismo que define la deriva de la nieve. Sin embargo, para ejecutar el modelo, se requiere haber completado esa información. Por este motivo se utilizaron los datos de la estación meteorológica mencionada.

¹⁹ Agradecemos al Dr. Laflen por colaborar con parte de estos cálculos.

²⁰ Esto es una de las posibles “duraciones críticas” de tormentas presentadas por Bonta y Rao (1988) y concuerda con lo utilizado por Arnold y Williams (1990), quienes propusieron el método de cálculo de T_p , así como con el procedimiento de rutina utilizado por los diseñadores de WEPP (Frankenberger, *com. pers.*).

Procesamiento de datos de Suelo y Pendiente

Se completaron los archivos de los tres suelos seleccionados a partir de la base de datos del Compendio de Suelos del Uruguay (RENARE-MGAP, 2002) y la Clasificación de Suelos del Uruguay (Altamirano, et al., 1976) (Anexo 3.1). Se generaron 150 archivos topográficos correspondientes a laderas planas de pendientes entre 3% y 7% y de largos que incrementan en 10m, desde 10 m hasta 300m.

Los valores base de las erodabilidades en y entre canalículos, el esfuerzo cortante crítico y la conductividad hidráulica (K_b), fueron calculados por el modelo (Alberts et al., 1995). Sólo en el caso de los suelos de Cañada Nieto, BELc y BSTc, se introdujo manualmente el valor de K_b , debido a la gran influencia sobre el mismo que tienen los horizontes Bt de estos suelos (la razón del contenido de arcilla del horizonte B sobre la del A es 2), como fue discutido en el capítulo 2. Se calculó K_b tal cual se hizo en el capítulo anterior con el suelo de PAP, según sugieren Jorge et al. (2011) a partir de la K_b de cada horizonte, ponderada por su espesor.

Procesamiento de datos de Manejo

Se siguió el procedimiento mencionado en la sección de materiales y métodos del capítulo 2, para crear los archivos de las 14 rotaciones seleccionadas. Se utilizaron los archivos de cultivos ajustados en el capítulo 2.

3.2.4 Análisis de datos

Validación de CLIGEN

Las variables estudiadas fueron temperaturas máximas y mínimas diarias, precipitación y radiación diarias, para cada mes y la precipitación anual. De los 100 años simulados, se tomaron 3 muestras de 29 años cada una, las cuales se contrastaron con la serie de 29 años medidos desde 1980 a 2008. Se estimaron los estadísticos descriptivos (media, mediana, desvío estándar y error típico) y se probó normalidad y homocedasticidad. Se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para corroborar distribución normal y las varianzas se compararon mediante la prueba de F. Para las cuatro variables, se compararon las medias mensuales o medianas mensuales de cada muestra con las de la serie medida, mediante análisis de regresión y el test de student (con la corrección de Welch en los casos de hetercedasticidad) o el test U de Mann-Whitney, según si cumplían con el supuesto de normalidad o no (Sokal y Rolf, 1987; Daniel, 1995).

Datos de erosión

Se comparó la erosión simulada para los cuatro suelos, con las distintas rotaciones en el caso de una ladera de 100m y 3% de pendiente. En particular, los resultados del suelo de BSTc se contrastaron con los publicados por Cléricsi et al. (2004), simulados con USLE/RUSLE incorporados en el software EROSION 5.0.

En el caso particular de la rotación Soja-Trigo en siembra directa, se contrastó el valor de tolerancia de erosión (T) con los valores simulados de erosión de los cuatro suelos para los rangos de largos y porcentaje de pendiente de 10m a 300m y de 3% a 7%, respectivamente. También se hallaron las probabilidades de que la erosión anual supere T y los valores de erosión diaria para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25 y 50 años.

Para dos rotaciones de cultivos contrastantes, se estudió cómo varían, con el largo y el porcentaje de pendiente, el tiempo que toma en erosionarse 10 cm de suelo de BELc, y el aporte de sedimentos por metro lineal.

3.2.5 Software

Para estimar la pérdida de suelo con WEPP se utilizó la versión WEPP 2010.1.²¹, con la interfase para Windows, y el generador climático CLIGEN (versión 4.3)²².

Se utilizó el Compendio de Suelos del Uruguay (RENARE-MGAP, 2002), Google Earth (Versión 6.1) y la carta topográfica (SGM, 1987) para ubicar los suelos utilizados en el espacio geográfico y las pendientes asociadas.

Los cálculos para determinar los parámetros de entrada al generador climático se realizaron con Excel 2007. Los análisis estadísticos se realizaron con los software Microsoft Excel 2007 y GraphPad-Prism versión 3.02 2000.

²¹ Disponible en <http://www.ars.usda.gov/research/docs.htm?docid=10621>

²² Disponible en el sitio web del Servicio de Investigación en Agricultura del USDA, <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=10621>

3.3 Resultados

3.3.1 Evaluación del Generador Climático (CLIGEN)

Las Figs. 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3 y 3.3.4 muestran las regresiones lineales de las medias mensuales de las temperaturas máximas y mínimas diarias, las medias mensuales de láminas diarias y las medias mensuales de radiación diaria, las cuales fueron altamente significativas ($p < 0,001$).

Las temperaturas máximas y mínimas diarias, y radiación diaria obtuvieron valores de coeficientes de determinación mayor a 0.98 en las tres muestras (Tabla 3.3.1). En tanto, el coeficiente de determinación para precipitación varió entre 0.62 y 0.71 en las tres muestras.

Tabla 3.3.1. Coeficientes de determinación para los análisis de regresión lineal realizados para las temperaturas máximas y mínimas diarias, la precipitación mensual y la radiación diarias (set 1, 2 y 3 refieren a las tres muestras).

Variable	set 1	set 2	set 3
Temp. Máx.	0,9991	0,9977	0,9884
Temp. Mín.	0,9984	0,9982	0,9984
Precipitación	0,6244	0,7099	0,6667
Radiación	0,9985	0,9992	0,9989

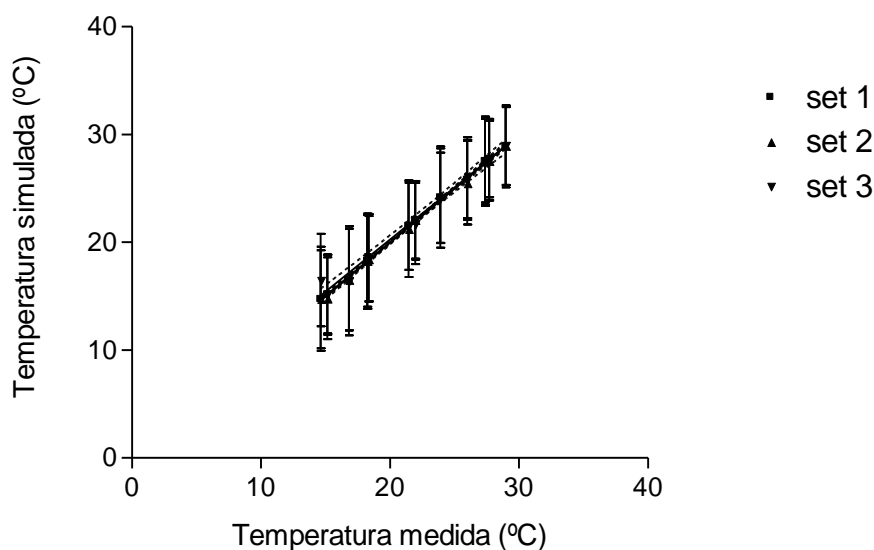


Figura 3.3.1. Medias mensuales de temperaturas máximas diarias de la Estación Experimental La Estanzuela (Colonia) medidas y simuladas con WEPP (set 1, 2 y 3 refieren a las tres muestras).

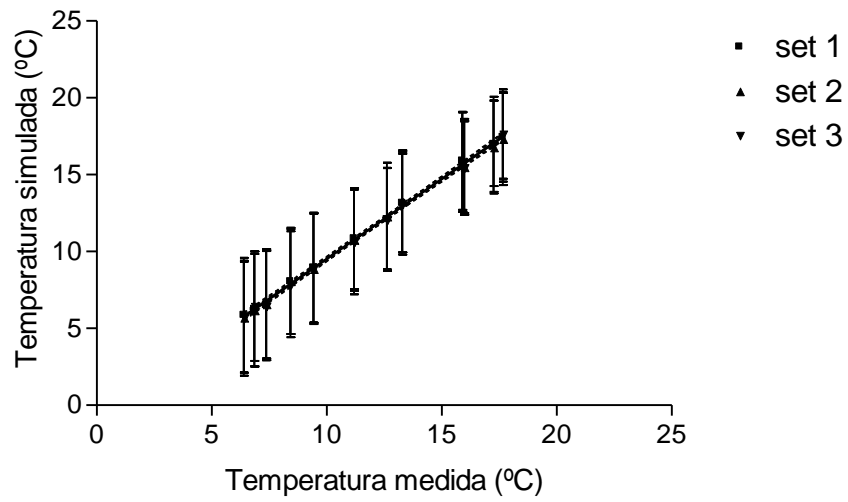


Figura 3.3.2. Medias mensuales de temperaturas mínimas diarias de la Estación Experimental La Estanzuela (Colonia) medidas y simuladas con WEPP (set 1, 2 y 3 refieren a las tres muestras).

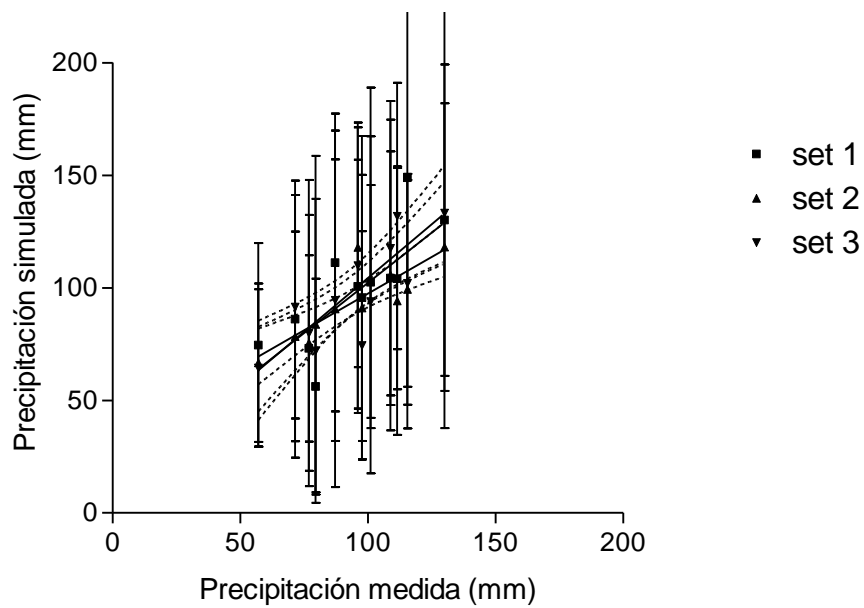


Figura 3.3.3. Medias mensuales de láminas diarias de la Estación Experimental La Estanzuela (Colonia) medidas y simuladas con WEPP (set 1, 2 y 3 refieren a las tres muestras).

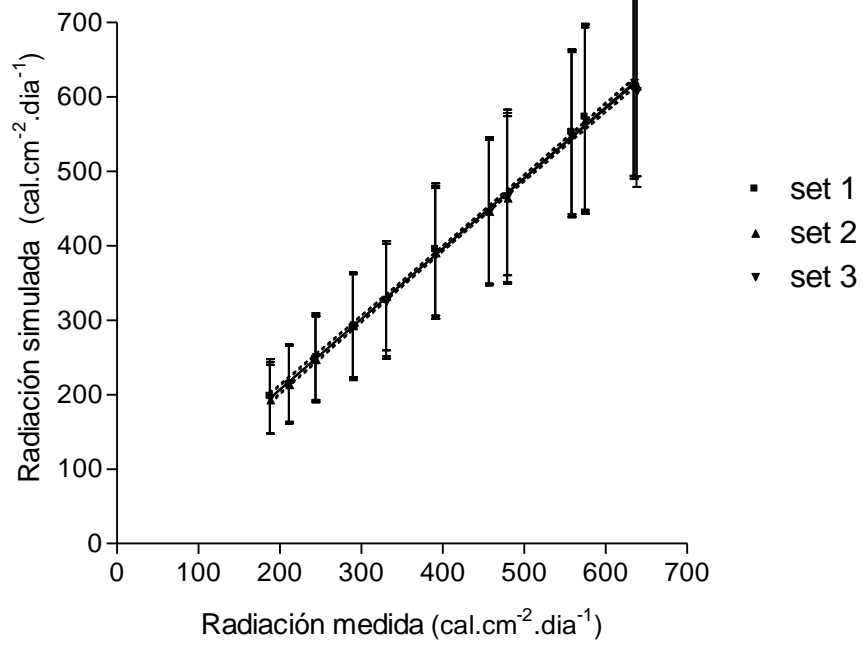


Figura 3.3.4. Medias mensuales de radiación diaria de la Estación Experimental La Estanzuela (Colonia) medidas y simuladas con WEPP (set 1, 2 y 3 refieren a las tres muestras).

Las muestras de precipitación *anual* presentaron distribución normal, varianzas homogéneas ($P < 0,05$) y no mostraron diferencias significativas con la muestra de precipitación anual medida ($t_{57} = 0.8226, 0.1975$ y 0.437 , para las tres muestras). El rango de las mismas (689mm a 1920mm, 757mm a 1942mm y 685mm a 1567mm) es menor al medido (590mm a 1918mm).

En los Anexos 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 se presentan los estadísticos descriptivos y las pruebas de normalidad para las variables de temperaturas máximas y mínimas diarias por mes, radiación diaria por mes y la lluvia mensual, respectivamente. Todas las muestras de precipitación *mensual* presentaron distribución normal, así como lo hicieron la gran mayoría de las muestras mensuales de las temperaturas máximas y mínimas (Anexos 3.2, 3.3 y 3.5).

Las medias de la precipitación mensual simulada no mostraron diferencias significativas con las medidas en ninguna de las muestras. Lo mismo ocurrió para la gran mayoría de muestras de temperatura máxima diaria por mes. El 70% de las muestras de temperaturas mínimas diarias por mes, presentaron diferencias significativas con las medidas en sus medias (Tabla 3.3.2.). Estas diferencias son subestimaciones en todos los casos, que no superan $0,9^{\circ}\text{C}$ (Anexo 3.3).

La radiación presentó un rango menor al medido en cada mes y a lo largo del año sobreestimando las mínimas mensuales (con pocas excepciones) y subestimando las máximas mensuales todo el año (Anexo 3.4). Las muestras de radiación de octubre a marzo presentan diferencias significativas ($p < 0,05$) en sus medianas con respecto a las medidas (Tabla 3.3.2). Estas diferencias son sobrestimaciones de hasta 10% (Anexo 3.4). Las medias en estos meses son subestimadas (hasta 4,5%), mientras que en los otros meses son sobreestimadas (hasta 5,6%) (Anexo 3.4).

Dentro de las temperaturas máximas, se presentó un valor mínimo negativo ($-3,6$) en el mes de agosto (Anexo 3.2). Verificando *in extenso* las temperaturas máximas en el archivo de clima generado, sólo se encontraron dos días más que presentasen temperaturas máximas bajo cero (en julio y en agosto). La radiación máxima es subestimada todos los meses en las tres muestras, mientras que la mínima es sobreestimada en la mayoría de los casos (Anexo 3.4).

Los valores más altos de las temperaturas mínimas simuladas son menores que los medidos en los meses que se subestima la media (70%). Los valores más bajos de las temperaturas mínimas simuladas son menores que los medidos del mes correspondiente, en el 80% de las muestras mensuales. Esta diferencia alcanza $5,4^{\circ}\text{C}$ en los meses más fríos, de mayo a setiembre, cuyas mínimas medidas se encuentran por debajo de cero (Anexo 3.3). Existe una sobreestimación de los días con mínimas bajo cero. En 29 años, la cantidad de días con temperaturas mínimas bajo cero son 138, 125 y 152 para las tres muestras de clima simulado, mientras que los registros de la estación meteorológica presentan 71 días con mínimas bajo cero.

Al utilizar el archivo de clima generado para la ejecución del programa se observó que el suelo se congelaba por períodos y que ocurrían varios eventos de precipitación en forma de

nieve, coincidiendo con días en los que, habiendo un evento de precipitación, la mínima era menor a cero. Se comprobó que si se modificaban las mínimas de esos días a 0,1°, esta anomalía era solucionada, no observándose más congelamiento de suelo ni acumulación de nieve sobre el mismo. Como estos fenómenos no se corresponden con el clima de La Estanzuela, se realizaron estas modificaciones manuales sobre el archivo de clima generado con el fin de evitarlos.

Tabla 3.3.2. Resultados de la comparación de los valores simulados y medidos de las medias de las temperaturas máximas y mínimas mensuales (t_{\max} y t_{\min}) y precipitación mensual (PREC) y de medianas de la radiación mensual (RAD). Valores de t del test de Student (t), de los grados de libertad (gl) y de U del test de Man-Whitney para $p < 0,05$. Los asteriscos indican corrección por Welch, por falta de heterocedasticidad ($p < 0,05$). Las negritas indican diferencias significativas.

	t_{\max}		t_{\min}		PREC		RAD
	t	gl	t	gl	t	gl	U
ENERO	0.785	1796	1.568	1827	0.315	56	359000
	0.129	1796	2.243	1827	1.578	57	362400
	0.223	1796	0.042	1827	0.903	57	357600
FEBRERO	0.015	1666	1.853	1665	0.261	57	322900
	0.601	1666	3.118	1666	0.165	57	323800
	0.838	1665	1.493*	1665	0.484	57	318500
MARZO	1.106	1796	3.524	1827	0.006*	49	376900
	2.602	1796	3.204	1827	0.538*	47	380700
	0.123	1796	3.529	1827	0.131	57	380500
ABRIL	0.502	1767	3.210	1768	0.106	57	383400
	0.897	1767	1.838	1768	0.387	57	392100
	1.099	1767	3.256	1768	1.453*	50	381400
MAYO	1.372	1796	2.746*	1827	1.336	57	421100
	0.593	1796	3.052*	1827	0.179	57	422000
	0.123	1796	2.848*	1827	0.418	57	431200
JUNIO	0.094	1767	3.290	1768	1.506*	49	386000
	1.921	1767	3.692	1768	1.113	57	399200
	0.420	1767	2.303*	1768	0.420	57	392100
JULIO	0.492	1796	2.888*	1858	1.728*	51	418500
	0.716*	1790	3.698*	1858	1.113	57	419100
	8.743*	1772	3.940*	1858	0.846	57	424000
AGOSTO	1.069	1796	4.992*	1858	0.996	57	409900
	1.132*	1786	4.457*	1858	0.549	57	414900
	1.558*	1786	5.182*	1858	1.543	57	415700
SETIEMBRE	0.030	1796	2.237	1798	0.326	57	394700
	0.283	1796	1.981	1798	0.094	57	389300
	0.238	1796	3.358	1798	0.199*	51	385500
OCTUBRE	0.307	1796	2.209	1858	0.479*	51	388700
	0.799	1796	2.630	1858	1.036	57	385500
	0.660	1783	3.543	1858	1.236	57	385900
NOVIEMBRE	1.031*	1783	0.786	1798	1.358*	50	372200
	1.944*	1772	0.064*	1798	0.962*	49	367300
	1.333*	1787	0.744*	1798	0.831*	46	364300
DICIEMBRE	0.747	1796	0.137*	1841	0.076	57	368000
	0.666*	1788	0.362*	1841	0.105	57	376000
	1.061	1796	0.536*	1841	0.457	57	377000

3.3.2 Evaluación de la erosión simulada bajo diferentes sistemas de rotaciones con soja en suelos representativos del litoral oeste.

El modelo WEPP simuló escurrimiento anual medio en el rango de 206 a 456 mm y erosión anual media en el rango de 2 a 67 Mg.ha⁻¹.año⁻¹, para una precipitación promedio anual de 1164mm. El suelo BELc fue el que obtuvo los mayores valores de erosión para la mayoría de las rotaciones con altos niveles de erosión, mientras que BSTc obtuvo los mayores valores de erosión para las rotaciones con bajos niveles de erosión. El mayor nivel de erosión en el cultivo soja continua en siembra directa (SD) fue estimado en el suelo BETe (Tabla 3.3.3).

Las simulaciones de WEPP ordenaron las rotaciones de cultivos en los cuatro suelos según los niveles de producción de erosión de una manera relativamente lógica, agrupando en el extremo superior soja continua, tanto LR como SD, y soja-trigo y soja-cobertura con LR (> 20Mg/ha). En el extremo inferior se encuentran las rotaciones con pasturas y SD (< 7Mg/ha); y con valores intermedios se encuentran las rotaciones con pasturas y LR. Los valores de erosión para las rotaciones de soja-trigo y soja-cobertura en LR se asimilan a los del extremo superior y las mismas en SD al extremo inferior o a valores intermedios (Tabla 3.3.3).

Tabla 3.3.3. Escurrimiento y erosión simulada por WEPP con distintas rotaciones en laderas de 100m de largo y 3% de pendiente, para los Brunosoles Éutricos BELc, BETb y BETe, y un Brunosol Subéutrico BSTc.

Suelo ¹	BELc		BETb		BETe		BSTc	
	Esc. ² (mm)	Erosión ³ (Mg/ha)	Esc. ² (mm)	Erosión ³ (Mg/ha)	Esc. ² (mm)	Erosión ³ (Mg/ha)	Esc. ² (mm)	Erosión ³ (Mg/ha)
Rotación⁴								
S CONTINUA LR	412	66.81	364	52.1	374	64.38	373	42.70
ST LR	286	30.21	246	21.36	251	28.11	270	21.05
S CONTINUA SD	456	29.79	383	28.50	443	35.59	407	24.89
S COB. LR	275	29.77	235	20.56	245	27.94	257	20.95
MSTST - PPP LR	238	13.71	217	9.81	230	12.65	182	9.52
MSTST - PPPP LR	230	13.01	211	9.05	225	12.24	179	8.83
MST-PPP LR	231	11.8	212	8.67	228	11.48	175	8.09
MST-PPPP LR	222	9.77	206	6.82	221	9.09	161	6.76
ST SD	276	5.65	226	3.25	262	5.19	262	8.07
S COB. SD	247	4.48	213	2.40	247	3.67	225	6.97
MSTST - PPP SD	240	4.12	215	2.54	244	3.86	172	4.87
MSTST - PPPP SD	232	3.85	211	2.44	239	3.68	169	4.67
MST-PPP SD	231	3.68	212	2.33	240	3.50	162	4.48
MST-PPPP SD	225	3.42	208	2.10	235	3.15	150	3.91

¹ Referencias de suelos en el texto. ² Escurrimiento medio anual dada una precipitación anual media de 1164 mm.

³ Los números en negrita superan el nivel de tolerancia (T=7Mg.ha⁻¹; Puentes y Szogi, 1983). ⁴ M = maíz, S = soja, T = trigo y P = pastura, COB= cobertura, LR= laboreo reducido, SD= siembra directa.

Este orden es muy similar al establecido a partir de las salidas de erosión simulada con USLE/RUSLE para BSTc (Clérici et al., 2004). Los valores estimados por los dos modelos para este suelo fueron similares. WEPP estimó valores levemente menores que USLE/RUSLE, con la excepción del caso de la rotación soja-trigo LR, en la cual la diferencia entre las estimaciones llegó a 14 Mg/ha (Tabla 3.3.4).

Tabla 3.3.4. Erosión simulada con WEPP y USLE/RUSLE para distintas rotaciones de cultivos en un Brunosol Subéutrico (BSTc) (3% de pendiente, 100m de largo).

Rotaciones de cultivos	WEPP Mg/ha*	USLE/RUSLE** Mg/ha*
SOJA CONTINUA LR	42,7	45,0
SOJA CONTINUA SD	24,9	25,6
SOJA TRIGO LR	21,0	34,9
SOJA COBERTURA LR	20,9	22,4
MSTST - PPP LR	9,5	12,6
MSTST - PPPP LR	8,8	10,9
MST-PPPP LR	8,1	8,8
SOJA TRIGO SD	8,1	11,9
SOJA COBERTURA SD	7,0	13,7
MST-PPP LR	6,8	10,4
MSTST - PPP SD	4,9	6,6
MSTST - PPPP SD	4,7	5,7
MST-PPP SD	4,5	5,7
MST-PPPP SD	3,9	4,9

M = maíz, S = soja, T = trigo y P = pastura, LR= laboreo reducido, SD= siembra directa.

*Los números en negrita superan el nivel de tolerancia (T=7Mg/ha; Puentes y Szogi, 1983).

** Valores tomados de Clérici et al., 2004.

La Fig. 3.3.5 muestra los valores de erosión simulada con el modelo WEPP en un sistema de rotación soja-trigo para distintos largos y porcentajes de pendiente. Se observa que en los suelos BELc y BETe, esta rotación genera una erosión anual media simulada mayor a lo tolerable ($7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$; Puentes y Szogi, 1983) en pendientes de 5% a 7% para todos los largos de ladera propuestos²³, llegando a 5 veces el nivel de tolerancia para una pendiente de 7% y 300m de largo. En laderas con 4% de pendiente el nivel de tolerancia se supera a partir de los 80 m y 110 m de largo, en BELc y BETe, respectivamente (Fig.3.3.5-a y -c). En el caso del suelo BETb, las pendientes de 3% y 4% mantienen los niveles de erosión por debajo del nivel de tolerancia y las pendientes de 5%, 6% y 7% lo superan a partir de 140 m, 80 m y 60 m, respectivamente (Fig. 3.3.5-b). Finalmente, en el caso de BSTc (Fig. 3.3.5-d) sólo las laderas con 3% de pendiente y de un largo entre 210 y 300 m obtienen valores de erosión por debajo del nivel de tolerancia.

Se ha tomado el nivel de tolerancia como un valor de referencia simplemente para orientar el análisis, su validez y utilidad serán discutidas en la sección 3.4.3.

²³ En la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay figuran los promedios de pendientes de los suelos (BELc: 6-7%; BETb: 3-5%; BETe 3%), pero con la ayuda de Google Earth se pudo verificar que existen pendientes en un rango más amplio para todos los suelos.

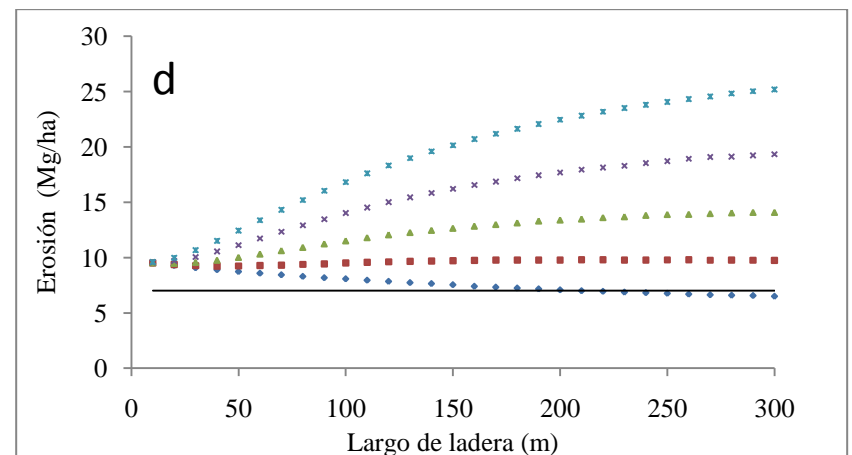
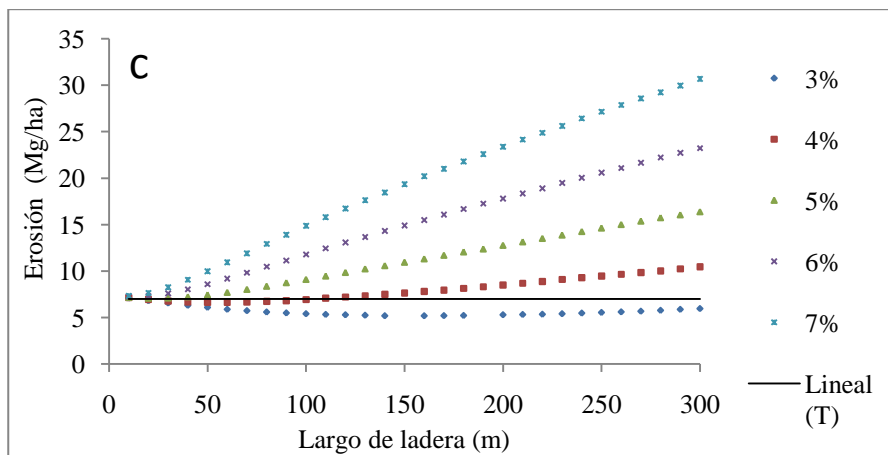
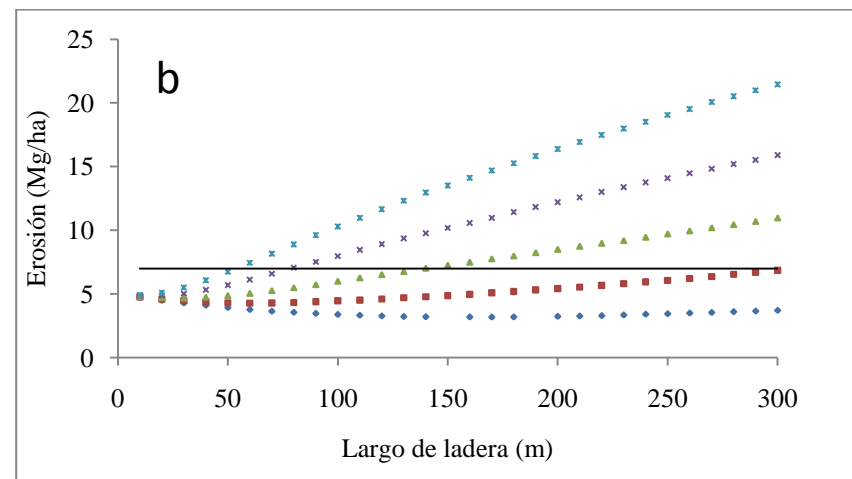
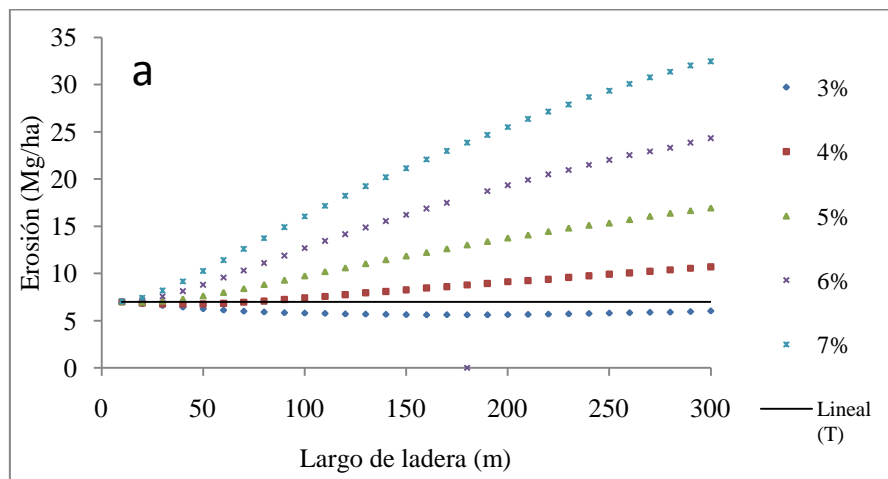


Figura 3.3.5. Erosión anual media simulada con el modelo WEPP en función del largo de la ladera con rotación trigo soja, para las pendientes de 3% a 7% de los suelos BELc(a), BETb (b), BETe (c) y BSTc (d). Referencias en el texto. (Máximas pérdidas tolerables, T=7Mg.ha⁻¹.año⁻¹; Puentes y Szogi, 1983).

En las laderas cuya erosión anual *media* no supera el nivel de tolerancia, existe igualmente una probabilidad de que esto ocurra un año dado, la cual supera el 25% en la mayoría de los casos (Tabla 3.3.5).

Tabla 3.3.5. Probabilidades de que la erosión anual simulada con el modelo WEPP en una rotación soja-trigo, supere el nivel de tolerancia de erosión en aquellas combinaciones de unidad de suelo, porcentaje de pendiente y largo de ladera cuya erosión anual media no supera el nivel de tolerancia.

Unidad de Suelo	Pendiente (%)	Largo de ladera (m)		
		100	200	300
BELc	3%	0.28	0.26	0.31
	4%	0.50	-	-
BETe	3%	0.22	0.25	0.28
	4%	0.43	-	-
BETb	3%	0.05	0.06	0.14
	4%	0.13	0.25	0.36
	5%	0.33	-	-
	6%	0.54	-	-
BSTc	3%	-	-	0.38

Un sólo evento, de un día, puede generar una erosión tal, que llegue a representar una gran parte de los 7 Mg.ha⁻¹.año⁻¹, considerados como la pérdida tolerable en todo un año (Puentes y Szogi, 1983). En el Anexo 3.6 se presentan los períodos de retorno para los eventos extremos. En el suelo BETe (300 m, 3%) un evento erosivo de magnitud igual o mayor a 7 Mg.ha⁻¹.año⁻¹ tiene un período de retorno de 20 años, mientras que un evento que erosione una cantidad equivalente o mayor a un tercio del nivel de tolerancia, tiene un periodo de retorno de 2 años, así como también sucede en los suelos BELc y BSTc (en estos suelos además es cierto para laderas mayores a 200 m y 100 m, respectivamente) (Anexo 3.6).

Como se observa en la Tabla 3.3.6, el largo de la ladera y la pendiente magnifican el efecto de las rotaciones sobre los sedimentos aportados por metro lineal del ancho de la ladera. Sobre el suelo BELc, la rotación soja-trigo genera 1,7 veces más sedimentos por metro lineal que la rotación maíz-soja-trigo con 4 años de pasturas (MST-PPPP) en una ladera de 100 m y 3% de pendiente, y 3,4 veces más en una ladera de 300 m y 7% de pendiente. En este suelo, el tiempo que llevaría a la pérdida de 100 mm de profundidad de suelo²⁴ sería de 220 años para la rotación soja-trigo y 360 años para MST-PPPP, en una ladera de 100 m y 3% de pendiente de este suelo; mientras que en una ladera de 300m y de 7% se perderían esos 100 mm en 37 y 132 años con la primera y la segunda rotación, respectivamente.

²⁴ Horizonte Ap₁:6 cm de profundidad, densidad aparente (Dap) 1,16 g.cm⁻³; Horizonte Ap₂:20 cm de profundidad, densidad aparente (Dap) 1,35 g.cm⁻³

Tabla 3.3.6. Producción de sedimentos anual media simulada con WEPP en kilogramos por metro lineal ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$), para las rotaciones en siembra directa (SD) de soja-trigo y de maíz-soja-trigo con 4 años de pasturas (MST-PPPP), sobre el suelo BELc.

rotación	Largo ladera (m)	Porcentaje de pendiente (%)				
		3	4	5	6	7
soja-trigo SD	100	57,98	74,13	97,45	126,77	160,39
	200	112,77	182,5	275,23	386,83	510,03
	300	180,92	320,6	508,09	729,78	974,12
MST-PPPP SD	100	34,15	39,57	45,97	53,42	62,11
	200	61,19	77,94	100,18	127,17	158,74
	300	93,93	125,9	170,72	224,37	289,88

3.4 Discusión

3.4.1 Evaluación del Generador Climático (CLIGEN)

La precipitación anual y la mensual fueron simuladas con alta precisión en su primer aplicación en nuestro país (ver Tabla 3.3.1 y Fig. 3.3.3), coincidiendo con otros trabajos extranjeros (Kou et al., 2007; Zhang et al., 2008). La precipitación anual simulada presentó un rango menor al medido (Anexo 3.4). Zhang et al. (2008) reportó una subestimación de la variación interanual, lo cual se lo atribuye al supuesto tomado por el modelo, que el proceso diario de precipitación es estacionario. Como solución plantea que mejor que una probabilidad de lluvia por mes, sería una distribución de probabilidad mensual.

La radiación simulada y la medida también presentaron una alta correlación, a pesar de la leve tendencia a la sobreestimación de las medianas y a la subestimación de las medias en los meses cálidos y la sobrestimación de las mismas en los meses fríos (ver Tabla 3.3.1, Fig. 3.3.4, Anexo 3.4). Adão et al. (2005) reportó hasta 1% de subestimaciones en las medias de radiación mensual, mientras que en este trabajo se observaron diferencias 5 veces mayores. Sin embargo, en el presente trabajo no se utilizaron métodos paramétricos para contrastar los valores de esta variable (radiación) (por no presentar distribución normal) y por consiguiente, en las comparaciones, no se utilizó la media como indicador de tendencia central, sino la mediana.

Las medias mensuales simuladas de las temperaturas máximas y mínimas diarias presentaron alta correlación con las medidas (ver Tabla 3.3.1 y Figs. 3.3.1 y 3.3.2), lo cual coincide con lo reportado por Adão et al. (2005). Aún así, se detectaron diferencias significativas en 8 y 25 muestras de las 36 muestras de las temperaturas máximas y mínimas, respectivamente (Tabla 3.3.2). Sin embargo, al contar con una cantidad tan grande de datos (aproximadamente 1700), las pruebas estadísticas se tornan muy robustas, detectando diferencias muy pequeñas, como en este caso que no llega a un grado de diferencia (Daniel, 1995).

En el modelo WEPP la temperatura y la radiación no afectan directamente las estimaciones de escurrimiento y erosión. Estas variables afectarían la erosión indirectamente, a través del crecimiento vegetal, y la descomposición de residuos que podrían modificar el porcentaje de cobertura del suelo. Aunque se consideran a estas variables como insensibles para las estimaciones de escurrimiento y erosión (Yu et al., 2000), se podría estudiar qué tan influyente pueden ser las diferencias presentadas en este estudio, como para modificar los resultados finales a nivel de erosión. Sin embargo, esto va más allá de los objetivos de este trabajo.

En el presente trabajo la subestimación de la temperatura mínima influyó directamente sobre los resultados de escurrimiento y erosión, porque llevó a que sus valores más bajos fueran hasta 5°C menores que los medidos, reflejándose en una mayor frecuencia de temperaturas mínimas bajo cero, con la consiguiente generación de eventos de nevada y congelamiento del suelo, los cuales son considerados raros para nuestro clima. En este trabajo, este problema se solucionó al modificar manualmente aquellos días con mínimas bajo cero en los cuales ocurría

precipitación. Sin embargo, para las condiciones climáticas de nuestro país debería modificarse el código de programación a fin de evitar estas anomalías. Los estudios realizados hasta el momento, no han discutido este problema, quizás por no encontrarse en una región climática templada que permite la existencia de noches de invierno con temperaturas bajo cero, pese a que los eventos de nieve son extremadamente infrecuentes en nuestro país (y en caso de que la hubiera es en forma de agua nieve, sin acumulación en estado sólido) y Colonia, por su cercanía a la costa del Río de la Plata tampoco sería la zona más propicia para la ocurrencia de este tipo de fenómenos (Renom, *com. pers.*).

Por todo esto, es que se considera que la predicción 2.1 se cumplió parcialmente, pudiendo aceptar parcialmente la hipótesis 2, es decir, sólo en caso de realizadas correcciones en las temperaturas mínimas. Podría incluirse un cambio en la modelación que permita que no existan eventos de nieve, aún cuando la temperatura mínima es menor a cero. Debería revisarse además los algoritmos por los cuales genera una sistemática subestimación de las mínimas en los meses fríos. Futuros trabajos de validación de CLIGEN para Uruguay deberían incluir otras variables estimadas, como ser la probabilidad de lluvia según si el día anterior fue lluvioso o seco, el número de días con precipitación, lámina diaria y duración e intensidad de la lluvia.

3.4.2 Evaluación de la erosión simulada bajo diferentes sistemas de rotaciones con soja en suelos representativos del litoral oeste

Ciertas características de los Brunosoles estudiados podrían explicar las diferentes respuestas de erosión simulada frente a los manejos utilizados. En el caso de BELc, su importante diferenciación textural hace que se sature rápidamente, lo que aumenta el porcentaje de escurrimiento, afectando mayormente en aquellos manejos que dejan el suelo más expuesto a la erosión. El suelo BSTc, además de compartir esta condición con el anterior, tiene menor porcentaje de arcilla y de materia orgánica, lo cual disminuye el esfuerzo cortante crítico, favoreciendo la erosión aun en manejos más sustentables. El suelo con menos erosión simulada, BETb, tiene altos contenidos de materia orgánica y de arcilla, que favorecen las propiedades físicas del suelo, otorgándole una mayor resistencia a la erosión (Tabla 3.3.3, Fig. 3.3.5 y Anexo 3.1).

Las simulaciones con WEPP, así como las de USLE/RUSLE, establecen diferencias entre las rotaciones de cultivos planteadas en lo que respecta a la magnitud de erosión estimada. Las rotaciones con SD simularon menos erosión que su par con LR y las que incluyan pradera simularon menos erosión que las de cultivos continuos, cumpliéndose la predicción 3.1. Se acepta, entonces, la hipótesis 3. Si se toma el valor T de tolerancia de erosión para esos suelos (establecido en $7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ para todos ellos, Puentes y Szogi, 1983), como indicador de la sustentabilidad del sistema, puede concluirse que todos manejos con laboreo reducido (LR) y el sistema de soja continua con siembra directa (SD) son no sustentables. Sólo las rotaciones de soja con otros cultivos en SD y que además incluyen tres o más años de pasturas, obtuvieron

valores anuales medios por debajo del valor T en todos los suelos para una ladera de 100m de largo y 3% de pendiente (Tablas 3.3.3 y 3.3.4). Clérico et al. (2004) destacaron que el cultivo de soja es la principal responsable de la erosión total estimada para las rotaciones, aportando en promedio un 62% de la misma. Los otros cultivos, maíz, trigo y pasturas aportaron en promedio 24%, 21% y 2%. Los estudios de Hernani et al. (1997) indican que en el cultivo de soja continua, el periodo en el cual se perdió más suelo por unidad de tiempo fue previo a la plantación y el período con mayores pérdidas absolutas fue de 30 a 60 días luego de plantado. Esto muestra la importancia de tener el suelo cubierto durante esta fase inicial del cultivo. Coincidentemente, Kaspar et al. (2001) destacan el potencial de los cultivos cobertura para reducir la erosión cuando se rotan con soja.

En particular, la rotación soja-trigo SD, la mayormente utilizada en nuestro país, obtuvo para esta pendiente un valor de erosión media estimada con WEPP menor a T para tres de los suelos estudiados, lo que podría inducir a pensar que fuera un manejo conservador. Sin embargo, a partir de este estudio queda evidente que esto no es así, ya que la erosión anual media se mantiene por debajo de este nivel sólo en el caso de las pendientes de 3% y de 4% (este último, restringido a laderas cortas para los suelos BELc y BETe) (Fig. 3.3.5).²⁵

Para el caso del suelo BSTc con pendiente 3%, la erosión anual media descendió con el aumento del largo de la ladera. La desagregación en canalículos ocurre según la fórmula 1.5, dependiendo de que la capacidad de transporte (T_c) sea mayor a la carga de sedimento (G), la cual aumenta con el largo de la ladera, por acumulación. A su vez, T_c , que depende de la velocidad del escurrimiento, también aumenta con el largo de la ladera. Lo que puede suceder es que para ciertos tipos de suelos, con alta tasa de infiltración como BSTc, en laderas con baja pendiente, G aumente a una tasa mayor que T_c , y cuando G supera T_c , deja de haber desagregación y hay deposición, según la ecuación 1.6 (ver Capítulo 1, sección 1.2).

Aún aquellas laderas (combinaciones de suelo, largo y pendiente) para las cuales la erosión anual media no alcanza T, pueden tener una alta probabilidad de que un año dado, la erosión sobrepase este valor (Tabla 3.3.5). Esta probabilidad se obtuvo a partir los 100 años de variable de respuesta que brinda el modelo WEPP (años posibles, no consecutivos). De esta manera se puede rescatar la variabilidad interanual, dada por el generador climático, que se pierde al analizar sólo en términos de erosión anual media.

Más aún, disgregando los eventos que ocurren dentro de un año, se observó que eventos extremos pueden alcanzar en un solo día pérdidas de suelo por encima de T. La probabilidad de que esto ocurra, dada por el período de retorno, es mayor en el caso del suelo BETe (300 m-3%: 20 años de período de retorno) que en los otros suelos, para los cuales esta probabilidad es muy baja (Anexo 3.6).

En términos de profundidad de suelo perdido, en menos de 40 años se puede perder 100mm con la rotación soja-trigo SD en un suelo BELc de 300m y 7% de pendiente. La Unidad CñN,

²⁵ En la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay figuran los promedios de pendientes de los suelos (BELc: 6-7%; BETb: 3-5%; BETe 3%), pero con la ayuda de Google Earth se pudo verificar que existen pendientes en un rango más amplio para todos los suelos.

al cual pertenece este suelo, tiene en promedio 6 a 7% de pendiente (MGAP-DSA, 1976), por lo cual sería altamente no recomendable utilizar esta rotación en estos suelos. Debe considerarse además, que la situación se agrava cuando se utiliza esta rotación en la práctica, ya que un invierno cada dos, queda el suelo en barbecho por no dar los tiempos, o condiciones sanitarias, para la siembra de trigo.

El modelo WEPP toma cada año como independiente, como “año posible”. Al utilizarse el valor de erosión dado por WEPP para cálculos de años consecutivos, como el realizado en el párrafo anterior, en realidad este valor se estaría subestimando para los últimos años. Para los cálculos de pérdida de suelo de un período de años consecutivos, el modelo debería actualizar el archivo de suelos con las pérdidas de erosión. Con el proceso erosivo, no sólo pierde en profundidad el suelo sino en propiedades físicas y químicas. A medida que se erosiona un suelo se hace más susceptible a este proceso por varios motivos. Desde el componente mineral, la fracción arcilla, se erosiona con preferencia por sobre las otras fracciones, generando un cambio textural. También se pierde materia orgánica, que junto con la arcilla son elementos claves en la formación de agregados favoreciendo una buena estructura. Al perderlos, la estructura se vuelve más masiva, perdiéndose capacidad de infiltración, favoreciendo un mayor escurrimiento que a su vez generará más erosión. Además, la erodabilidad del suelo será mayor, ya que la materia orgánica y la arcilla también son elementos que otorgan resistencia a la erosión. Asimismo, se pierde en fertilidad, lo cual influye directamente sobre el crecimiento de los cultivos e indirectamente sobre la erosión a través de la cobertura vegetal (Durán y Préchac 2007).

Concomitantemente ocurre un proceso de edafización, o de generación de suelo. Sin embargo las tasas de este proceso son muy bajas, pudiendo llegar a ser despreciables, aunque no existen datos certeros de las mismas. Se manejaron ciertas cifras que oscilan entre 0,8mm a 2,5mm por año, que fueron impuestas como axioma durante mucho tiempo, siendo sólo estimaciones o sugerencias, carentes de fundamento empírico (Johnson, 1987) y no válidas para las condiciones de nuestro país. Bui, et al. (2010), en una revisión, presenta varios estudios de tasas de formación de suelo que van en el rango de $0,3 \times 10^{-3}$ a $53 \times 10^{-3} \text{mm.año}^{-1}$. Sin duda, dada la gran dependencia que tiene de los factores pedogenéticos locales, resulta muy difícil de estimar, y más aún de generalizar. De todos modos cuando se refiere al incremento del espesor de un suelo a raíz de procesos de edafización, se refiere principalmente al avance del horizonte C a partir del R, mientras que para la producción agronómica es determinante el espesor del horizonte A y su contenido de materia orgánica. Este horizonte superficial, con su contenido de materia orgánica es lo que se pierde con la erosión, junto con todas las propiedades antes mencionadas, haciéndolo tan difícil de recuperar una vez perdido.

Con respecto a la magnitud absoluta de la erosión estimada con WEPP debe tomarse en cuenta en primer lugar las restricciones discutidas en el Capítulo 2. En segundo lugar, debe considerarse que de los parámetros sensibles, sólo se ajustó la conductividad hidráulica base (K_b) para los suelos BSTc y BELc, dado que eran los únicos suelos para los cuales se contaba con un criterio para la modificación de este parámetro (su alta diferenciación textural), y con una fórmula propuesta para el cálculo del mismo. El trabajo realizado en el capítulo 2 con el sitio PAP, permitió trasladar el criterio de modificación de K_b para los suelos BSTc y BELc.

Sin embargo, no se ajustó K_b para los otros suelos, por falta de criterios en qué basarse²⁶, o datos medidos. Se descartó como criterio para trasladar los ajustes realizados del capítulo anterior, que los suelos pertenezcan a la misma unidad, por las razones que se explican a continuación.

BETe pertenece a la misma unidad de suelos que el suelo del sitio LE del capítulo 2 (Ecilda Paulier-Las Brujas), lo que haría pensar que podría tener un comportamiento similar en lo que respecta a K_b . Como se discute en el capítulo 2, es probable que los canales preferenciales generados por el agrietado, causado por las arcillas expansivas, aumenten K_b . Pero a diferencia del suelo del sitio LE de textura franco-acilosa, BETe de textura franco-arcillo-limosa, podría tener un efecto de sellado y encostrado a causa del limo presente en el horizonte A, lo cual disminuiría el valor de K_b , como existen antecedentes en la literatura²⁷. Se consideró entonces, que faltaban elementos para evaluar cómo interactuarían estos dos procesos, y aún definido esto, decidir cómo esto se traduciría a números no arbitrarios, a falta de una ecuación que permita hacer el cálculo objetivamente, con la inclusión de estos dos factores.

Finalmente, los parámetros que afectan la erodabilidad tampoco fueron ajustados, por el mismo motivo expresado anteriormente de falta de criterios en qué basarse para realizar la modificación. En el capítulo anterior, se contaba con datos de erosión medidos mayores a los simulados, lo que permitió concluir que debía reducirse manualmente el esfuerzo cortante crítico en ambos sitios. Sin embargo, la erodabilidad está muy influida por los contenidos de arcilla y materia orgánica, que varían notoriamente entre los suelos utilizados en este trabajo, por lo que cualquier cambio que se realizara sería totalmente arbitrario. Por lo tanto, se decidió trabajar con los valores de estos parámetros dados por el modelo por defecto, siguiendo las ecuaciones presentadas en el capítulo 1, sección 1.2, las cuales consideran en sus cálculos, tanto directa como indirectamente, los contenidos de arcilla y materia orgánica.

No obstante todo esto, los valores relativos brindan información primaria muy útil, para la discusión y toma de decisión con respecto a los manejos para cada suelo, más allá de la comparación entre los suelos. De continuar la investigación en esta línea, generando información para los distintos suelos del Uruguay, es de esperar que se pueda llegar a simulaciones cuyos valores absolutos, y no solo relativos, permitan realmente utilizar el modelo WEPP como una herramienta que apoye los procesos de toma de decisión.

²⁶ Jorge et al. (2011) discuten el hecho que este criterio sería sólo aplicable a suelos con diferenciación textural importante.

²⁷ En los trabajos de Williams et al. (2010) y dos Santos et al. (2010), con suelos no diferenciados limosos, se redujo el valor de K_b con respecto al dado por el modelo por defecto, para ajustar la simulación a los datos medidos.

3.4.3 Evaluación de erosión para Uruguay: dónde y cómo poner el límite

El límite considerado en este trabajo para la erosión es T, la “máxima pérdida de suelo permisible para mantener un nivel de productividad en forma económica e indefinida” (Agriculture Handbook No 537; en Johnson 1987). Este valor se ha utilizado en combinación con los resultados de las estimaciones con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, y actualmente, es lo que utiliza la nueva reglamentación del MGAP como referencia, exigiendo Planes de Uso y Manejo Responsable del Suelo, en donde las estimaciones para las rotaciones no sobrepasen en promedio este nivel (Artículo 5° del Decreto reglamentario N°405/2008).

Originalmente, en los años 40 se había propuesto un valor de T único para todos los suelos de los Estados Unidos, con el foco en la productividad, la idea que se planteaba era no perder fertilidad en el tiempo. Sin embargo, en esa época aún se vinculaba la fertilidad únicamente con los nutrientes, los cuales, se consideraba, podían ser fácilmente compensados con fertilización. También implícita estaba aquella idea del tiempo teórico que tomaría al suelo generarse discutida en la sección anterior (Johnson 1987).

Un primer cambio de concepto fue establece un valor de T diferenciado para cada suelo, en función de sus características (profundidad, tipo de material madre, productividad relativa de los horizontes superficial y subsuperficial y erosión pasada) (Puentes y Szogi, 1983). Sin embargo, la complejidad que presentan los procesos que ocurren en el suelo, la falta de información sobre tiempo de formación de suelo y los costos que implica el manejo para el control de la erosión, dificultan la estimación de T (Puentes y Szogi, 1983). En general, se concuerda con que, en el mejor de los casos son “estimaciones toscas” de la cantidad de erosión que se puede tolerar y que su determinación, más que una tema técnico, pasa a ser ético y político (Cook, 1982).

Un problema práctico que plantea Cook (1982) es que implícito en la definición de T se encuentra la idea de que no debería haber una pérdida en la capacidad productiva del suelo, en la búsqueda de un manejo sustentable, lo cual es difícil de cumplir con valores de T mayores a cero. La idea de sustentabilidad, implica la consideración de las generaciones futuras, pero no está establecido *cuántas* generaciones futuras (Bui et al., 2011). Un manejo que elimine 10 cm del horizonte A en menos de 40 años es claramente no sustentable (Soja-Trigo en 300m 7%, Fig.3.3.5-a) ya que la generación siguiente inmediata sufrirá una pérdida considerable del recurso natural suelo. Coherentemente, la estimación de erosión media para este caso es no tolerable (mayor a T). Sin embargo, la erosión media provocada por un manejo que podría llevar a la pérdida de la misma profundidad en 220 años, es considerada tolerable (Soja-Trigo en 300m 3%, Fig. 3.3.5-a). Esto es así aún cuando sólo en el escenario más optimista estudiado (Heimsath et al., 2000; en Bui et al., 2011) el proceso de generación de suelo podría llegar a compensar esta pérdida, mientras que en el más pesimista, le llevaría 7 millones de años recuperarlo, considerándose las infinitas opciones intermedias. Más allá del amplio rango de tasas propuestas de generación de suelo, los valores son sustancialmente menores que los valores de T (Montgomery, 2007), llevando a generaciones futuras no inmediatas a sufrir la pérdida. Montgomery (2007) plantea que, debido a esto, existe un “tiempo crítico” de vida de la

civilización de la agricultura definido como la razón de la profundidad del suelo sobre la diferencia entre erosión y producción de suelo. Argumenta que este “tiempo crítico” ha sido el principal responsable de la caída de las civilizaciones en la historia, y advierte que aún sigue siendo un problema actual.

Sin duda es deseable desacelerar el proceso de erosión, al tiempo que la determinación de los límites es un tema muy complejo, como plantean Puentes y Szogi (1983). En el intento de abordar esta complejidad, Larson (1981) propone utilizar dos valores de T diferenciados, uno funcional (T_1), para la planificación del manejo de los sistemas, que refleje el efecto de la erosión sobre el rendimiento del cultivo. El segundo (T_2), sería más de uso político-económico, en el ordenamiento territorial y que reflejaría efectos más amplios, incluyendo contaminación difusa del agua. Li et al. (2009) (en Bui, 2011) propone tres valores de T: T_1 , que defina pérdida de suelo tolerable equivalente a la tasa de producción de suelo; T_2 que apunte a mantener la productividad agrícola como primer objetivo; y T_3 que refleje los efectos de los impactos fuera del sitio sobre el agua y los ambientes acuáticos (este último visto a escala de cuenca).

Con estos enfoques, se incorporan otros dos cambios de visión. En primer lugar, se comienzan a considerar los efectos de la erosión más allá de la pérdida de productividad. En segundo lugar, se acepta que los valores límites de erosión variarán según el objetivo ambiental que se persiga. Sin embargo, todos los T refieren a promedios anuales. El efecto de los eventos extremos, que pueden ser sumamente erosivos en un solo día (Anexo 3.6), se ve enmascarado en los promedios (Tabla 3.3.5) y estos son justamente los que son más factibles de generar cárcavas, proceso irreversible. Tomando esto en consideración, se hace aún más difícil establecer un límite concreto. Expertos de la Sociedad de Conservación de Suelos y Aguas de los Estados Unidos (SWCS), advierten que no existe una tasa de erosión que pueda ser relacionada a la formación de cárcavas para todos los tipos de suelos, climas, cultivos y manejos. Por otro lado, ¿Cuánto aporte pueden tolerar los ecosistemas acuáticos? Esta definición será sitio específica, no pudiendo adjudicarse un valor a un “tipo de suelos”, dependiendo de la cuenca y de las características de cuerpo de agua y ecosistema acuático receptor (Cook, 1982).

En este enfoque más amplio de los efectos de la erosión, no resultan suficientes los valores de T para promedios anuales, ni aún las probabilidades de erosión anual. Desde la SWCS se argumenta a favor de un enfoque basado en la evaluación de riesgos para la planificación, programas y políticas de conservación. En particular se hace necesario para medir los efectos del escurrimiento y la erosión fuera de del sitio, más aún con el incremento de la frecuencia de eventos de lluvia extremos (SWCS, 2006).

Desde el punto de vista del ecosistema acuático receptor, además del tipo de suelo, manejo y clima, lo que define el aporte son los metros lineales de contacto. Con las simulaciones de WEPP²⁸ se puede observar cómo la rotación soja-trigo en una ladera de 300m y de 7%,

²⁸ En esta primera aproximación se consideraron sólo laderas planas uniformes. Sin embargo el modelo WEPP habilita al usuario a determinar la forma de la ladera, lo cual permitiría incluir en las simulaciones las planicies de

aportaría al cauce el promedio anual de aproximadamente una tonelada de sedimento por metro lineal. El efecto del largo de la ladera magnifica marcadamente el aporte de sedimentos (Tabla 3.3.6). Y aún así el promedio anual tampoco estaría dando la información necesaria para saber si ese cuerpo de agua puede mantener su ecosistema imperturbado. En este caso sería más apropiada la información de aportes diarios máximos tolerados (conocidos como TMDL, sigla por su nombre en inglés: Total Maximum Daily Load, EPA²⁹). Además, estos análisis no sólo implicarían consideraciones desde el punto de vista físico (cantidad de sedimento desplazado) sino también químico, por los contaminantes químicos y nutrientes que viajan disueltos en el agua de escurrimiento o adsorbidos al sedimento.

En la sección anterior se vio que a iguales condiciones de T el riesgo de erosión es distinto, para distintos suelos, largos y porcentajes de pendiente. En esta sección se discutió lo motivos por los cuales los valores límites utilizados resultan insuficientes para una valoración del ecosistema en su conjunto, debiendo considerarse valores límites diferenciados, pero a su vez queda planteada la necesidad de tomar en cuenta el riesgo anual y diario. Una opción alternativa al límite T a largo plazo, como se viene manejando hasta ahora, podría ser agregar a este límite la información sobre una probabilidad máxima que un año supere el nivel de T (P=0,10, por ejemplo). Otra es establecer una magnitud máxima diaria de escurrimiento y erosión, la cual estaría condicionada por el estudio del cuerpo de agua receptor y su capacidad de resiliencia. Qué es mucho y qué es poco depende del ecosistema local y de dónde se ponga el foco. Debe destacarse la importancia del estudio interdisciplinario para encarar la definición de los límites, compatibilizando los ciclos productivos, con los climáticos y biológicos, e identificando los períodos de mayor vulnerabilidad. Dos nuevos cambios de visión son necesarios al abordar la problemática del control de la erosión, uno es el análisis de riesgo y otro es la sito-especificidad. Lejos de pretender dejar saldada esta discusión, simplemente planteo la importancia de poner estas visiones que contemplan la complejidad ambiental sobre la mesa, frente a la necesidad de políticas que apunten a un desarrollo sustentable, y apostando al desarrollo de aquellas herramientas que puedan ser de utilidad en este sentido. El modelo WEPP cuenta con el potencial para dar las estimaciones necesarias que contribuyan a las definiciones con un nuevo enfoque.

inundación, donde ocurre importante sedimentación, y obtener resultados acordes a la topografía local característica.

²⁹ EPA Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Clean Water Act: <http://water.epa.gov/lawsregs/lawsguidance/cwa/tmdl/policy.cfm>

CONCLUSIONES

Una agricultura sustentable no es posible sin el control de la erosión. Para ello es necesario actuar a varios niveles, los cuales incluyen la generación de información, la concientización, la regulación y formulación de políticas que fomenten la conservación del suelo, la planificación y el contralor. En el accionar en cada uno de estos niveles resulta necesario poder cuantificar, estimar la erosión producida. Nuestro país ya cuenta con un modelo eficiente (USLE/RUSLE) con años de investigación para las condiciones locales, de amplia difusión y simpleza en el uso, para la estimación de la erosión en términos de promedios anualizados. No obstante, de incorporar al estudio de la erosión, la evaluación de riesgo de eventos extremos y los efectos fuera del sitio (por ejemplo sobre los ecosistemas acuáticos), se requieren variables de respuesta que potencialmente ofrece el modelo WEPP y no el anterior.

Del trabajo de esta tesis se concluye que para las condiciones locales WEPP simula erosión con alta precisión, aunque presentaría ciertos problemas para simular el escurrimiento. Se reconoce el potencial que ofrece este modelo para auxiliar estudios ambientales, de ser profundizados los estudios con el objetivo de llegar a simulaciones de escurrimiento locales más precisas, por lo que se considera altamente recomendable seguir esta línea de investigación. De esta manera, continuando el desarrollo del modelo WEPP para las condiciones locales, se podrá aportar con más detalle, a una visión más amplia de los efectos y los afectados por la erosión.

Resultados y aportes principales de esta Tesis

1. Proceso de validación del modelo WEPP

El modelo WEPP estima eficientemente la erosión anual y anual media de los suelos representativos de la zona agrícola litoral oeste, y lomadas del este del Uruguay, siendo necesario ajustar parámetros sensibles que intervienen en la estimación del escurrimiento y la erosión. Por este motivo, se identificó la necesidad de realizar mediciones de los parámetros identificados como sensibles, conductividad hidráulica y esfuerzo cortante hídrico, y desarrollar ecuaciones alternativas para el cálculo de los mismos, adaptadas a las condiciones locales. Para el caso de suelos con importante diferenciación textural, se utilizó con éxito el cálculo del valor base de la conductividad hidráulica que toma en cuenta las conductividades de los horizontes subsuperficiales.

Sin embargo, el modelo presenta algunas inconsistencias en las simulaciones de escurrimiento anual o anual medio, mostrando poca sensibilidad a los diferentes cultivos y manejos del suelo. Además, se detectó que el modelo presenta dificultades para una correcta simulación de

eventos de escurrimiento, en particular posteriormente a períodos de sequía, quizás atribuible a la tendencia a grietarse de los suelos estudiados, lo cual es favorecido por períodos largos sin precipitación.

Con respecto a la aplicabilidad de este modelo en condiciones locales, ya este trabajo permitió establecer diferencias relativas entre diferentes sistemas de uso y manejo de los suelos, en lo que respecta a erosión, con una estimación más precisa de los eventos erosivos de mayor magnitud. Para aplicaciones en un futuro, considerando escenarios de Cambio Climático, se entiende que WEPP cuenta con la ventaja de poder representar los cambios en el clima con su generador climático CLIGEN. Además, WEPP simula con mayor precisión para lluvias de alta intensidad, las cuales en un escenario de Cambio Climático se proyecta serán más frecuentes y más intensas. Sin embargo, también cuenta con la desventaja de que en suelos con arcillas expansivas, WEPP presenta problemas al simular el escurrimiento posterior a períodos de sequía, los cuales también se proyecta que serán más frecuentes e intensos con el cambio climático.

2. Ensayo de parcelas de escurrimiento bajo cultivo de soja

En general, en los ensayos de escurrimiento no se utilizan muchas repeticiones, no obstante los resultados de las parcelas de escurrimiento con soja estarían indicando que, dada la heterogeneidad espacial que pueden presentar los suelos, sería necesario considerar la inclusión de repeticiones en futuros ensayos, a los efectos de obtener resultados más ajustados.

3. Proceso de validación del generador climático CLIGEN

El generador climático CLIGEN puede utilizarse para simular climas locales con una buena precisión, con la salvedad que se le realicen modificaciones manuales a las simulaciones de las temperaturas mínimas, las cuales subestima sistemáticamente.

4. Evaluación de la erosión con el modelo WEPP

Las simulaciones con el modelo WEPP fueron sensibles a la reducción de la erosión producida por los manejos con siembra directa y rotaciones con praderas. Los manejos con laboreo reducido y soja continua resultaron no sustentables en cualquiera de los suelos estudiados, por lo que se recomienda no utilizar estos manejos. De cultivar soja, se recomienda que, además de realizarlo en siembra directa, se rote con otros cultivos y además con pradera, para mantener los valores de erosión anual media menores al valor de tolerancia (T), ya que el cultivo de soja es el principal responsable de la erosión total estimada para las rotaciones. En particular, la rotación soja-trigo SD, la mayormente utilizada en nuestro país, debiera restringirse al caso de laderas cortas y con pendientes menores a 4%, debiendo evitarse su uso en suelos muy diferenciados, y con bajos contenidos de materia orgánica y arcilla, de lo contrario la erosión anual media superará T.

Se cuestiona la utilización de T como único criterio de evaluación de sustentabilidad en lo que respecta a la erosión, tomando en cuenta que aún aquellos manejos cuyos niveles de erosión anual media no alcanzan T, pueden tener una alta probabilidad de que un año dado, la erosión sobrepase este valor. Además, ciertos eventos extremos pueden producir en un solo día pérdidas de suelo por encima de T. Se destaca la potencialidad de la utilización de WEPP en el desarrollo de criterios de evaluación de sustentabilidad del uso y manejo del suelo, alternativos al nivel de tolerancia T de unidades de erosión promedio anual, incluyendo los conceptos de probabilidad de erosión y períodos de retorno.

Recomendaciones

Los resultados de esta Tesis, sin ser concluyentes, representan un avance en la utilidad del modelo WEPP, permitiendo estimar el riesgo de erosión en diferentes sistemas agrícolas y agrícolas-ganaderos, así como identificar las dificultades que se presentan para su aplicación en condiciones locales.

Es necesario seguir trabajando sobre el ajuste del modelo para las condiciones de nuestro país, previo a su utilización para la planificación de cultivos. Se conforma, de esta manera, una amplia gama de líneas de investigación que va desde generación de información, pasando por una profundización de la validación para otras variables y otros sitios, y llegando a la adaptación de las rutinas de modelación a las condiciones locales.

En particular, deberían destinarse esfuerzos a la generación de bases de datos nacionales, de información climática (con detalles al nivel de lámina de lluvia cada 10 minutos); y en lo que refiere a información de suelos, se deberían realizar estudios con mediciones de los parámetros identificados como sensibles por el modelo.

La profundización de la validación del modelo podría encararse en primer lugar, desde un análisis más detallado de los procesos que intervienen en el balance hídrico simulado por WEPP en condiciones locales, que permita entender los mecanismos que llevan a la homogenización de los resultados de escurrimiento. También se deberían contrastar las simulaciones de WEPP con las de USLE/RUSLE y el subfactor "Contenido de Agua en el suelo".

En segundo lugar, se podría ampliar el estudio de las variables de probabilidad de lluvia, como ser el número de días con precipitación, lámina diaria y duración e intensidad de la lluvia, que permita validar el componente de lluvia de CLIGEN en su totalidad.

Algunas rutinas en el generador CLIGEN deberían ser revisadas para nuestras condiciones locales. En un principio, son las de la simulación de temperaturas mínimas y las de generación de eventos de nevada. En lo que respecta al modelo WEPP, podría estudiarse la posibilidad de

desarrollar ecuaciones alternativas, adaptadas a las condiciones locales, para el cálculo de los parámetros reconocidos como sensibles.

Finalmente, también debe considerarse la importancia de trabajar sobre el desarrollo de una versión más amigable y fácil de usar, adaptada a condiciones locales, para su uso no académico en la planificación de cultivos, que por supuesto requiere del insumo de las investigaciones sugeridas anteriormente.

La utilización del modelo WEPP, una vez superado los inconvenientes presentados en la simulación de escurrimiento a nivel local, habilitaría a incorporar el análisis de riesgo y los efectos fuera del sitio en la evaluación de la erosión, permitiendo realizar un análisis más completo del efecto ambiental de este fenómeno. Para que esto pueda llevarse adelante, no es solo necesario el desarrollo del modelo como herramienta, sino que requerirá además de estudios interdisciplinarios para la comprensión de la interacción de la erosión y los ecosistemas acuáticos, así como para su monitoreo. Pero, sobre todo, es preciso que este enfoque integral sea incorporado por los actores implicados, ya sea los causantes de erosión, como los tomadores de decisión.

BIBLIOGRAFÍA

- Adão, W. P. E., Ferreira, P. A., Pruski, F. F. y Sedyama, G. C. 2006. Avaliação do desempenho do modelo CLIGEN em gerar dados climáticos para modelos hidrológicos e agronômicos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 10(1):119-127.
- Albaradeya, I., Hani, A. y Shahrour, I. 2010. WEPP and ANN models for simulating soil loss and runoff in a semi-arid Mediterranean region. *Environmental Monitoring and Assessment*. 180(1-4): 537-556.
- Alberts, E.E. Earing, M. A., WELTZ, M. A., Risse, L. M., Pierson, F. B. Zhang, X. C., Laflen, J. M. y Simanton, J. R. 1995. Chapter 7. Soil component. In: *Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. Report 10*. US. Department of Agriculture (USDA) -Agricultural Research Service, NSERL, West Lafayette, IN.
- Altamirano, A., Da Silva, H., Durán, A., Echevarría, A., Panario, D. y Puentes, R. 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Tomo I. Clasificación de suelos. Montevideo, Uruguay, 97 pp.
- Amorim, R. S. S., Da Silva, D. D., Pruski, F. F., De Matos, A. T. 2010. Avaliação modelos USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. *Eng. Agríc. Jaboticabal*. 30(6):1046-104.
- Arbeletche, P. y Carballo, C. 2007. Dinámica agrícola y cambios en el paisaje. *Revista Cangüé*. 29.: 55-59.
- Arbeletche, P. y Carballo, C. 2008. La expansión agrícola en Uruguay, Algunas de sus principales consecuencias. XXXIX Reunión Anual de la Asociación de Economía Agraria de Argentina y Tercer Congreso Rioplatense de Economía Agraria, ISSN 1666-0285, CD-ROM, Montevideo, Uruguay.
- Arnold, J. G., and J. R. Williams. 1990. Stochastic generation of internal storm patterns. *Trans. ASAE* 32(1): 161-167.
- Ascough II, J.C., Baffaut, M.A., Nearing, M. A. y Flanagan, D.C. 1995. Watershed model channel hydrology and erosion processes. In: *Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. Report 10*. US. Department of Agriculture (USDA)-Agricultural Research Service, NSERL, West Lafayette, IN.
- Baetgen y Carriquiry. 2006. Caracterización de la Variabilidad de Rendimientos de Cultivos Agrícolas Extensivos en Uruguay. IICA. [En línea]. http://www.iica.org.uy/index.php?option=com_content& (consultado 10/9/11).
- Blanco-Canqui, H., Gantzer, C. J., Anderson, S. H., Alberts, E. E. y Ghidry, F. 2002. Saturated Hydraulic Conductivity and Its Impact on Simulated Runoff for Claypan Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1596-1602.
- Boardman, J. y Favis-Mortlock, D.T. 2001. How will future climate change and land-use change affect rates of erosion on agricultural land? *Proceedings International Symposium, Soil Erosion Research for the 21st Century*. American Association Agricultural Engineers, 3-5 January, 2001, Honolulu, Hawaii. 498-501.
- Bonta J. V. y Rao A.R. 1988. Factors affecting the identification of independent storm events. *Journal of Hydrology*. 98: 275-293.
- Brazier, R. E., Beven, K. J., Freer, J. y Rowan J. S. 2000. Equifinality and uncertainty in physically based soil erosion models: application of the glue methodology to WEPP-the water erosion prediction project-for sites in the UK and USA. *Earth Surf. Process. Landforms*. 25: 825-845.
- Bui, E.N., Hancock, G.J. y Wilkinson S.N. 2011. 'Tolerable' hillslope soil erosion rates in Australia: Linking science and policy. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 144:136-149.
- Carámbula, M. 2010. Pasturas y forrajes, manejo, persistencia y renovación de pasturas. Montevideo, Hemisferio Sur. 413 pp.
- Castaño, J. P., Ceroni, M., Giménez, A., Furest, J., Aunchayna, R. y Bidegain, M. 2010. Caracterización Agroclimática del Uruguay 1980-2009. INIA-GRAS. 28pp.
- Castro, A. 1997. Cebada. EEMAC. 124pp.
- Clérici, C y García Préchac, F. 2001. Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del Río de la Plata. *Agrociencia*. (Revista Científica de la Facultad de Agronomía - UDELAR). Montevideo, Uruguay. 5(1): 92 - 103.

- Clérici, C., Baethgen W., García Préchac, F. y Hill, M. 2004. Estimación del impacto de la soja sobre erosión y C orgánico en suelos agrícolas del Uruguay. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná-Entre Ríos:10-11.
- Cook, K. 1982. Soil loss: a question of values. *Journal of Soil and Water Conservation*. 37(2):89-92.
- Da Mota F.S. *Meteorología Agrícola*. San Pablo: Nobel, 1981. 376pp.
- Daniel, W. 1995. *Biostatistics. A foundation for Analysis in the Health Science*. 6th ed. John Wiley and Sons. Inc. U.S.A. 780pp.
- Díaz, R. 2004. *Tecnología y Estructura de Producción. Resúmenes del Simposio Sustentabilidad de la Intensificación Agrícola en el Uruguay*. INIA La Estanzuela:1-6.
- Díaz, R. 2006. *Desafíos de la Intensificación Agrícola en el Uruguay*. IICA - Uruguay. [En línea]. http://www.iica.org.uy/online/coyuntura_27doc.asp (consultado 20/7/2010).
- DIEA. 1998. *Series históricas de datos-DIEA*. [En línea]. www.mgap.gub.uy. (consultado 28/7/2010).
- DIEA. 2011. *Anuario Estadístico Agropecuario*. MGAP.
- dos Santos, L. L., Srinivasan, V. S. y de Aragão, R. 2010. *Parametrização do modelo WEPP em duas sub-bacias do semi-árido Paraibano*. En CD-Rom. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay. Noviembre, 2010.
- Durán, A., y García-Préchac, F. 2007. Vol II. *Suelos del Uruguay. Origen, clasificación, manejo y conservación*. Ed. Hemisferio Sur, Montevideo. 358pp.
- Durán, A.; Califra, A. y Molfino, J.H. 1999. *Suelos del Uruguay según Soil Taxonomy*. [En línea]. www.fagro.edu.uy/~edafologia/GGST2.htm. (consultado 10/3/2011).
- Elliot, W.J.; Arnold, C.D. 2000. *Validation of the Weather Generator CLIGEN with Precipitation Data from Uganda*. *Transactions of the ASAE* 44(1): 53-58.
- Flanagan, D.C., Meyer, C.R., Yu, B., Scheele, D.L. 2001 *Evaluation and Enhancement of the CLIGEN Weather Generator.. Pp. 107-110 in Soil Erosion Research for the 21st Century, Proc. Int. Symp. (3-5 January 2001, Honolulu, HI, USA)*. Eds. J.C. Ascough II and D.C. Flanagan. St. Joseph, MI: ASAE.701P0007
- Flanagan, D.C., y M.A. Nearing. 1995. *Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. Report 10*. US. Department of Agriculture (USDA) -Agricultural Research Service, NSERL, West Lafayette, IN.
- García Préchac F, Clérici C, Hill M, Hill, E. 2005. *Erosion 5.0. Software para Windows del Modelo de Estimación de Erosión de Suelos en Uruguay y Región de la Cuenca del Plata*.
- García Préchac, F. 1992. *Conservación de suelos. Serie Técnica N°26*. INIA. Uruguay 63 pp.
- García Préchac, F. y Durán, A. 1998. *Propuesta de estimación del impacto de la erosión sobre la productividad del suelo en Uruguay*. *Agrociencia*. II(1):26-36
- Ghidey, F. y Alberts, E.E. 1996. *Comparison of measured and WEPP predicted runoff and soil loss for Midwest claypan soil*. *Transactions of the ASAE*. 39(4): 1395–1402.
- Gonçalves, F.A. 2008. *Validação do modelo WEPP na previsão de erosão hídrica para condição edafoclimática da região de Vicosa-MG. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Doctor Scientiae*.
- Green, I. R. A. y Stephenson, D. 1986. *Criteria for comparison of single event models / Critères de comparaison pour modèles caractérisant des événements isolés*. *Hydrological Sciences Journal*. 31(3): 395-411.
- Grønsten, H.A., Lundekvam, H. 2006. *Prediction of surface runoff and soil loss in southeastern Norway using the WEPP Hillslope model*. *Soil & Tillage Research*. 85:186-199.
- Haan, C.T., Johnson, H.P., Breakensiek, D.L. 1982. *Hydrologic modeling of small watersheds*. ASAE. Monograph 5. St. Joseph: ASAE.
- Hernani L.C., Salton J.C., Fabricio A.C., Dedecek R., Alves M. J.R.1997. *Perdas por erosão e rendimentos de soja e de trigo em diferentes sistemas de preparo de um latossolo roxo de dourados (ms)*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 21(4):667-676.
- Hill, M., García Préchac., F., Terra, J. y Sawchik, J. 2008. *Incorporación del efecto del contenido de agua en el suelo en el modelo USLE/RUSLE para estimar erosión en Uruguay*. *Agrociencia*. 12(2): 57 - 67.
- IICA, CAS, REDPA. 2009. *El Mercado de la Soja en los países del Consejo Agropecuario del Sur: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Paraguay, Uruguay*. IICA, Montevideo. 156pp.

- IICA. 2008. Evolución y situación de la cadena agroalimentaria sojera. Uruguay Agroalimentario en Cifras. [En línea]. http://www.iica.org.uy/online/agroencifras_estad_rubro.asp. (Consultado 28/7/2010).
- JET-DINAMA. 2010. Informe de situación sobre fuentes de contaminación difusa en la cuenca del Río Santa Lucía. MVOTMA. 181pp.
- Johnson, L.C. 1987. Soil loss tolerance: Fact or myth? *Journal of Soil and Water Conservation* 42(3):55-160.
- Jorge, G., Vázquez, N., Pérez Bidegain, M., Sawchik, J. y Terra, J. 2010. Empleo de un modelo físico para la estimación de escurrimiento y erosión en Uruguay: Primera aproximación. CD-Rom. En: Reunión Técnica: Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos. Colonia, Uruguay, julio 2010.
- Jorge, G., Vázquez N., Pérez-Bidegain, M. y Terra, J. 2011. Mejora de la estimación de la erosión de los suelos en Uruguay: Aplicación del Modelo WEPP en suelos con diferenciación textural. Publicación de la X Escuela Latinoamericana de Física de Suelos-ELAFIS. (in press).
- Jury, W.A. y Horton, R. 2004. *Soil Physics*. 6th ed. J. Wiley. Hoboken. New Jersey. 370 pp.
- Kaspar, T.C., Radke, J.K y Laflen, J.M. 2001. Small grain cover crops and wheel traffic effects on infiltration, runoff, and erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*. Second Quarter. 56(2): 160-164.
- Kou, X., Ge, J., Wang, Y., Zhang, C. 2007. Validation of the weather generator CLIGEN with daily precipitation data from the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*. 347: 347– 357.
- Laflen, J.M. y Moldenhauer, W.C. 2003. Pioneering Soil Erosion Prediction- The USLE Story. World Association of Soil & Water Conservation – WASWC. Special Publication No. 1. China. 54pp.
- Laflen, J.M., Flanagan, D.C., y Engel, B. 2004. Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP. *Journal of the American Water Resources Association*. 40:289-297.
- Lal, R. 1999. Soil quality and soil erosion. Soil Water Conservation Society, Iowa. CRC Press. 329pp.
- Langhans, C., Govers, G., Diels, J., Clymans, W. y Van den Putte, A. 2010. Dependence of effective hydraulic conductivity on rainfall intensity: loamy agricultural soils. *Hydrol. Process*. 24:2257-2268.
- Larson, W.E. 1981. Protecting the soil resource base. *Journal of Soil and Water Conservation*. 36(1): 13-16.
- Li, Z., Liu, W.Z., Zhang, X.C. y Zheng, F.L. 2011. Assessing the site-specific impacts of climate change on hydrology, soil erosion and crop yields in the Loess Plateau of China. *Climatic Change*. 105:223–242.
- Maria, I.C., Chaves, M.O. y Dechen, S.C.F. 2001. Comparação dos resultados do modelo WEPP com os obtidos em condições de chuva natural, durante sete anos, em um latossolo vermelho distroférrico típico em campinas, sp. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia (GO), 03 a 06 de mayo de 2001.
- Martino, D y García, A. 1985. Densidad de Siembra del Girasol. En Uruguay CIAAB. Jornada de cultivos de verano. 20-23.
- MGAP - DSA. 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Tomo III. Descripción de las unidades de suelos. Apéndice. Descripciones, datos físicos y químicos de los suelos dominantes. Min. de Agric. y Pesca / Dirección de Suelos y Fertilizante. Montevideo, Uruguay, 452 pp.
- MGAP-DSA. 2002. Compendio de suelos del Uruguay.
- Montgomery, D.R. 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. *PNAS*. 104(33): 13268–13272.
- Morgan, R.P.C. 2006. *Soil Erosion and Conservation*. (3a ed.) Blackwell Publishing. UK. 304pp.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. Vol. 50(3): 885–900.
- Nash, J.E., y J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I -- A discussion of principles. *J. Hydrol*. 10:282-290.
- Nearing, M.A. 1998. Why soil erosion models over-predict small soil losses and under-predict large soil losses. *Catena* 32:15-22.
- Nearing M.A., Govers G., Norton L.D. 1999. Variability in soil erosion data from replicated plots. *Soil Science Society of America Journal*. 63(6): 1829-1835.
- Nearing, M.A. 2000. Evaluating soil erosion models using measured plot data: accounting for variability in the data. *Earth Surf. Process. Landforms*. 25:1035-1043.
- Nearing, M.A., Ascough, L.D y Laflen, J.M. 1990. Sensitivity analysis of the WEPP Hillslope profile erosion model. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 33:839-849.

- Nicks, A.D., Lane, L.J. y Gander, G.A. 1995. Chapter 2: Weather Generator. In: Flanagan, D.C., y M.A. Nearing. 1995. Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. Report 10. US. Department of Agriculture (USDA) -Agricultural Research Service, NSERL, West Lafayette, IN.
- Pandey, A., Chowdary, V. M., Mal, B. C., y Billib, M. 2009. Application of the WEPP model for prioritization and evaluation of best management practices in an Indian watershed. *Hydrol. Process.* 23:2997–3005
- Pérez-Bidegain, M., Helmers, M. J. y Cruse, R. 2010. Modeling phosphorus transport in an agricultural watershed using the WEPP model. *J. Environ. Qual.* 39:2121–2129.
- Pieri, L., Bittelli, M, Wu, J. Q., Dun, S., Dennis C. Flanagan, Rossi Pisa, P., Ventura F., Salvatorelli, F. 2007. Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model to simulate field-observed runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy. *Journal of Hydrology.* 336:84-97.
- Prusky F.F: y Nearing, M.A. 2002. Runoff and soil-loss responses to changes in precipitation: a computer simulation study. *Journal of soil and Water Conservation.* 57(1):7-16.
- Puentes R. y Szogi A. 1983. Manual para la utilización de la ecuación universal de pérdida de suelo en el Uruguay. Normas Técnicas en Conservación de Suelos N°1. Dir. Suelos. MAP
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G. A., Mc Cool, D.K. y Yonder, D.C. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United State Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Agriculture Handbook Number 703.
- Rachman, A., Anderson, S. H., Alberts, E. E., Thompson, A. L. y Gantzer, C. J. 2008. Predicting runoff and sediment yield from a stiff stemmed grasse hedge system for a small watershed. *Transactions of the ASABE.* 51(2): 425-432.
- Raclot, D. y Albergel, J. 2006. Runoff and water erosion modelling using WEPP on a Mediterranean cultivated catchment. *Physics and Chemistry of the Earth.* 31:1038–1047.
- Renschler, C.S. 2003. Designing geo-spatial interfaces to scale process models: The GeoWEPP approach. *Hydrological Processes.* 17:1005-1017.
- Reyes M. R., Raczkowski, C. W., Gayle, G. A. y Reddy, G. B. 2004. Comparing the soil loss predictions of GLEAMS, RUSLE, EPIC, and WEPP. *American Society of Agricultural Engineers.* 47(2): 489–493.
- SGM. 1987. Cartas Topográficas del Uruguay.
- Shen, Z.Y., Gong, Y.W., Li, Y.H., Hong, Q., Xu, L. y Liu, R.M. 2009. A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area. *Agricultural Water Management.* 96:1435–1442.
- Sokal, R. R. y Rolf, F.J. 1987. Introduction to Biostatistics. 2nd Ed. Dover Publications. U.S.A. 363pp.
- Soto B. y Diaz-Fierros, F. 1998. Runoff and soil erosion from areas of burnt scrub: comparison of experimental results with those predicted by the WEPP model. *Catena.* 31:257-270.
- Stolpe, N.B. 2005. A comparison of the RUSLE, EPIC and WEPP erosion models as calibrated to climate and soil of south-central Chile. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant.* 55:2-8.
- Stone, J.J.m Lane, L.J., Shirley E.D. y Hernández, M. 1995. Chapter 4: Hillslope surface hydrology. In: Flanagan, D.C., y M.A. Nearing. 1995. Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. Report 10. US. Department of Agriculture (USDA) -Agricultural Research Service, NSERL, West Lafayette, IN.
- Stroosnijder, L. 2005. Measurement of erosion: Is it possible? *Catena.* 64: 162–17.
- SWCS. 2006. Planning for extremes [En línea] www.swcs.org. (consultado 30/7/2010)
- Terra, J., Pravia, V., Roel, A. y Correa, J. 2009. Impacto de la intensidad de uso del suelos sobre la productividad del cultivo de soja en Lomadas del Este. *Actividades de Difusión* N° 580. Cultivos y Forrajeras de Verano. INIA Treinta y Tres, Uruguay: 1-18.
- Terra J. y García Préchac, F. 2001. Siembra directa y rotaciones forrajeras en las Lomadas del Este: Síntesis 1995-2000. INIA, Serie Técnica N° 125. 100pp.
- Tiscareno-Lopez, M., Lopes, V. L., Stone, J. J. y Lane, L. J. 1993. Sensitivity analysis of the WEPP watershed model for rangeland applications I: Hillslope processes. *American Society of Agricultural Engineers.* 36(6): 1659-1672.
- Tiwari, A.K., Risse, L.M., Nearing, M.A. 2000. Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. *American Society of Agricultural Engineers.* 43(5):1129-1135.
- Vallo, M.N. y Zarauz, A. 1987. Manejo de la densidad de siembra y fertilización nitrogenada en trigo sobre dos rastrojos de verano. Tesis de Grado N°2353. EEMAC. Facultad de Agronomía. UdelaR.

- Verma, A. K., Jha, M. K., Mahana, R. K. 2010. Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing and geographical information system. *Paddy Water Environ.* 8:131–144.
- Williams, J.D., Dun, S. Robertson, D.S., Wu, J.Q. Brooks, E.S., Flanagan D.C. and McCool D.K. 2010. WEPP simulations of dryland cropping systems in small drainages of northeastern Oregon. *Journal of Soil and Water Conservation.* 65(1):22-33.
- Willmott, C.J. y Matsuura, K. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Clim. Res.* 30:79-82.
- Wirtz, S., Seeger, M., Ries, J.B. 2011. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena* (in press).
- Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. USDA. *Agricultural Handbook N° 537.* 58pp.
- Yu, B., 2000. Improvement and evaluation of CLIGEN for storm generation. *Trans. ASAE.* 46: 301–307.
- Yu, B., Rosewell, C.J., 2001. Validation of WEPP for runoff and soil loss prediction at Gunnedah, NSW, Australia. *Aust. J. Soil. Res.* 39: 1131–1145.
- Yu, B. 2003. An assessment of uncalibrated CLIGEN in Australia. *Agricultural and Forest Meteorology.* 119:131-148.
- Yu, B. 2005. Adjustment of CLIGEN parameters to generate precipitation change scenarios in southeastern Australia. *Catena* 61:196-209.
- Zhang X.C., Nearing, M.A., Risse, L. M., McGregor, K. C. 1996. Evaluation of WEPP runoff and soil loss predictions using natural runoff plot data. *Transactions of the ASAE.* 39(3):855-863
- Zhang, X. C., Garbrecht, J. D. 2003. Evaluation of cligen precipitation parameters and their implication on WEPP runoff and erosion prediction. *Transactions of the ASAE.* 46(2): 311–320.
- Zhang, Y., Liu, B., Wang, Z. y Zhu, Q. 2008. Evaluation of CLIGEN for storm generation on the semiarid Loess Plateau in China. *Catena.* 73:1–9.

ANEXOS

Perfiles de calicatas de los suelos de las Estaciones Experimentales del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA)



Fotos 1 y 2. *Brunosol Éútrico* de la Estación Experimental de INIA La Estanzuela (LE), Colonia.



Foto 3. *Argisol Subéutrico* de la Unidad Experimental de INIA Palo a Pique (PAP), Treinta y Tres, archivo INIA-PAP.

ANEXO 2.2

Ensayo de parcelas de escurrimiento de soja continua con siembra directa en la Estación Experimental de INIA La Estanzuela (LE), Colonia, 2009



Fotos 3, 4, 5, 6 y 7. Parcelas de escurrimiento con soja y tanques colectores de la Estación Experimental de INIA La Estanzuela (LE), Colonia.

ANEXO 2.3

Archivos de suelo y pendiente de los suelos de las Estaciones Experimentales del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA).³⁰

Tabla A-2.3. Análisis textural, de materia orgánica y de CIC de suelos utilizados

	Profundidad	Arena	Arcilla	MO	CIC (pH7)
Sitio	(mm)	(%)	(%)	(%)	(meq/100g)
LE	240	25,1	31,9	5,5	26,9
	560	17,7	48,6	2,6	32,5
	820	17,1	49,6	1,5	32,2
	930	17,9	46,6	0,8	29
PAP	90	39,1	20,7	3,81	17,3
	270	39	19,6	1,55	13,5
	410	24,4	46,9	0,89	26,9
	610	22,2	48,3	0,43	29,5
	710	22,8	45,8	0,3	28,9
	990	28,5	40,4	0,15	25,6
	1250	37,2	44,4	0,12	27,4
	1410	39,3	47,3	0,1	33,5
	1720	48,6	32,6	0,04	27
	1900	55,7	28,9	0,02	24,5
2050	24,2	44,9	0,04	39,1	

**LE= La Estanzuela; PAP= Palo a Pique; MO= Materia Orgánica;
CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico**

³⁰ Fuente: Datos proporcionados por las Estaciones Experimentales.

Archivos de manejo de las parcelas, laboreo y secuencias de operaciones de manejo

Tabla A-2.4-a Manejo de parcelas de escurrimiento de Estación Experimental La Estanzuela, Colonia.

Parcela	1984	1985	1986	1987	1988
1	Campo Natural	Campo Natural	Campo Natural	Campo Natural	Campo Natural
2	Suelo desnudo	Suelo desnudo	Suelo desnudo	Suelo desnudo	Suelo desnudo
3	Pradera 1 LR	Pradera 2	Pradera 3	Pradera 4/Cult LR	Cult LR
4	Cultivo 1 LR	Cultivo 2 LR	Cultivo/Prad LR	Pradera 2	Pradera 3
5	Cult Cont LR	Cult Cont LR	Cult Cont LR	Cult Cont LR	Cult Cont LR
6	Pradera 1 SD	Pradera 2	Pradera 3	Pradera 4/Cult SD	Cult SD
7	Cult Cont LR	Cult Cont LR	Cult Cont LR	Cult Cont LR	Cult Cont LR
8	Cult Cont SD	Cult Cont SD	Cult Cont SD	Cult Cont SD	Cult Cont SD

Cult= Cultivo

Tabla A-2.4-b Manejo de parcelas de escurrimiento de Unidad Experimental Palo a Pique, Treinta y Tres.

Parcela	1994	1995	1996	1997
1	Suelo desnudo	Suelo desnudo	Suelo desnudo	Suelo desnudo
2	Campo Natural	Campo Natural	Campo Natural	Campo Natural
3	Cultivo 1 LR	Verdeo 2 LR	Verdeo/Prad LR	Pradera 2
4	Cultivo 1 SD	Verdeo 2 SD	Verdeo/Prad SD	Pradera 2
5	Pradera 1 LR	Pradera 2	Pradera 3	Pradera 4
6	Pradera 1 SD	Pradera 2 SD	Pradera 3	Pradera 4
7	Pradera 3	Pradera 4	Verdeo 1 LR	Verdeo 2
8	Pradera 3	Pradera 4	Verdeo 1 SD	Verdeo 2 SD
9	Cul.Cont SD	Cul.Cont SD	Cul.Cont SD	Cul.Cont SD
10	Cult Cont LR	Cult Cont LR	Cult Cont LR	Cult Cont LR

Cult= Cultivo

ANEXO 3.1

Tabla A-3.1. Análisis textural, de materia orgánica y de CIC de suelos utilizados.

Suelo	Profundidad (mm)	Arena (%)	Arcilla (%)	MO (%)	CIC (pH7) (mEq/100g)
BELc	59.99	28.1	24.4	6.1	23.2
	260.1	25.9	26.9	3.4	22.0
	450.1	17.9	48.8	1.7	34.1
	720.1	18.8	47.5	1.3	31.5
	940.1	17.6	42	0.5	27.3
	1280	15.3	39.3	0.2	26.3
	1700	21.5	29.3	0.1	25.5
BETb	89.99	17.3	41.8	7.4	43.7
	250	16.0	41.8	5.4	42.3
	380	12.5	52.8	1.8	44.7
	620	13.3	50.2	1.4	43.2
	760	11.7	46.1	0.8	31.6
	1070	10.3	43.1	0.5	26.9
	1300	10.7	33.2	0.3	28.5
BETe	200	11.2	29.1	2.43	23.2
	450.1	7.3	45.5	1.10	29.8
	640.1	6.8	44.2	0.63	27.1
	870	6.5	40.3	0.28	25.4
	1180	6.3	39.5	0.12	26.7
	1380	6.9	40.6	0.06	28.2
BSTc	150	61.7	20.6	4.43	18.8
	260	57.5	24.4	3.55	20.2
	360	52.6	31.0	3.21	22.5
	470	48.2	39.6	2.31	28.6
	570	45.2	40.1	1.83	30.3
	670	50.7	33.9	1.16	28.8
	850	56.4	21.3	0.77	23.3

MO= Materia Orgánica;
CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico

Tabla A-3.2 Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de temperatura máxima diaria por mes de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido.

Temperatura Máxima	ene-01	ene-02	ene-03	ENEROm	feb-01	feb-02	feb-03	FEBm	mar-01	mar-02	mar-03
Number of values	899	899	899	899	848	848	847	820	899	899	899
Minimum	18,5	17	19	18,3	15,1	16,3	17,6	15,5	13,5	15	12,6
25% Percentile	26,3	26,7	26,6	26,2	25,1	25	25,3	25,1	23,3	22,9	23,6
Median	28,9	28,8	29,1	29	27,7	27,5	27,7	27,6	25,7	25,7	26,1
75% Percentile	31,45	31,6	31,45	31,6	30,3	30,1	30,2	30,3	28,4	28,1	28,5
Maximum	39,9	43,2	40,3	39,6	38,2	41,3	40,5	36,8	37,3	38,7	37,3
Mean	28,82	28,98	29	28,96	27,68	27,57	27,83	27,68	25,79	25,53	26,01
Std. Deviation	3,667	3,722	3,642	3,707	3,81	3,717	3,707	3,622	3,833	3,719	3,875
Std. Error	0,1223	0,1241	0,1215	0,1236	0,1308	0,1277	0,1274	0,1265	0,1278	0,124	0,1293
Lower 95% CI	28,58	28,74	28,76	28,72	27,42	27,32	27,58	27,43	25,54	25,29	25,76
Upper 95% CI	29,06	29,22	29,24	29,2	27,94	27,82	28,08	27,93	26,05	25,78	26,27
Normality Test											
KS distance	0,02469	0,02302	0,01958	0,02898	0,02045	0,02497	0,02567	0,03998	0,02114	0,02495	0,02106
P value	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10
Passed normality test (*=0.05)?	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
P value summary	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Tabla A-3.2 (cont.) Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de temperatura máxima diaria por mes de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido.

Temperatura Máxima	MARm	abr-01	abr-02	abr-03	ABRILm	may-01	may-02	may-03	MAYOm	jun-01	jun-02
Number of values	899	899	899	899	870	899	899	899	899	899	899
Minimum	15,4	9	10,5	11	12,7	6,2	7,5	5,1	5,8	4	2,5
25% Percentile	23,2	19,35	19,8	19,3	19,25	16	15,7	15,8	15,65	12,7	12,15
Median	26	21,9	22,1	21,6	21,9	18,6	18,2	18,5	18	15,1	14,9
75% Percentile	28,7	24,7	24,45	24,2	24,45	21,1	21,3	21,4	20,8	17,8	17,5
Maximum	37,2	34,1	32,1	33,7	33,3	30,5	31,7	33,5	31	25,8	24,8
Mean	25,99	22,04	22,1	21,75	21,95	18,6	18,46	18,57	18,35	15,13	14,81
Std. Deviation	3,745	3,942	3,654	3,596	3,759	3,9	4,055	3,975	4,015	3,759	3,697
Std. Error	0,1249	0,1315	0,1219	0,1199	0,1274	0,1301	0,1352	0,1326	0,1339	0,1254	0,1233
Lower 95% CI	25,75	21,78	21,87	21,52	21,7	18,35	18,2	18,31	18,09	14,88	14,57
Upper 95% CI	26,24	22,3	22,34	21,99	22,2	18,86	18,73	18,83	18,61	15,37	15,05
Normality Test											
KS distance	0,03126	0,03398	0,01958	0,02098	0,02284	0,02006	0,03574	0,02577	0,04596	0,02183	0,02417
P value	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	0,0448	P > 0.10	P > 0.10
Passed normality test (*=0.05)?	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes
P value summary	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns

Tabla A-3.2 (cont.) Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de temperatura máxima diaria por mes de 29 años de clima generado y una muestra de 29 años de clima medido.

	jun-03	JUNIOm	jul-01	jul-02	jul-03	JULIOm	ago-01	ago-02	ago-03	AGOSTO m	sep-01
Temperatura Máxima											
Number of values	899	870	899	899	899	899	899	899	899	899	899
Minimum	2,6	5,8	1,9	1,4	3	5,5	3	1,3	-3,6	5,8	5,8
25% Percentile	12,6	12,4	11,7	11,55	13,05	11,4	13,1	13,3	13,35	13,2	15,3
Median	15,2	15	14,5	14,7	16,5	14,3	16,6	16,4	16,5	16,4	18,2
75% Percentile	17,75	17,7	17,8	17,9	19,8	17,3	19,9	19,9	19,6	19,75	20,9
Maximum	27,1	26,2	29,3	28,3	30	28,6	30,6	32,6	29,3	79,4	33,1
Mean	15,22	15,14	14,72	14,77	16,5	14,62	16,56	16,55	16,45	16,81	18,25
Std. Deviation	3,789	3,672	4,379	4,542	4,821	4,295	4,855	4,71	4,715	5,07	4,353
Std. Error	0,1264	0,1245	0,146	0,1515	0,1608	0,1433	0,1619	0,1571	0,1573	0,1691	0,1452
Lower 95% CI	14,97	14,9	14,43	14,47	16,18	14,34	16,25	16,24	16,15	16,48	17,96
Upper 95% CI	15,47	15,39	15	15,06	16,82	14,9	16,88	16,86	16,76	17,15	18,53
Normality Test											
KS distance	0,02323	0,04678	0,02994	0,02227	0,02916	0,04319	0,02998	0,02606	0,02086	0,04474	0,03181
P value	P > 0.10	0,0444	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	0,0699	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	0,0547	P > 0.10
Passed normality test (*=0.05)?	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
P value summary	Ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Tabla A-3.2 (cont.) Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de temperatura máxima diaria por mes de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido.

Temperatura Máxima	sep-02	sep-03	SEPTm	oct-01	oct-02	oct-03	OCTm	nov-01	nov-02	nov-03	NOVm
Number of values	899	899	899	899	899	899	899	899	899	899	899
Minimum	6,3	5,8	8,1	9,2	5,4	9	11,7	10,4	9,5	10,1	8,9
25% Percentile	15,25	15,3	15,05	18,8	18,7	18,6	18,4	21,4	21,5	20,9	20,9
Median	18,4	18,1	18	21,7	21,4	21,2	21,3	24,3	24,2	24,3	23,9
75% Percentile	21,3	21,25	21,1	24,2	23,8	24,5	24,4	27,1	27,1	27,4	27,3
Maximum	32,6	29,9	31,7	34	33,6	35,9	33,8	37,7	35,8	36	36,7
Mean	18,3	18,19	18,24	21,5	21,28	21,57	21,44	24,13	24,32	24,2	23,91
Std. Deviation	4,428	4,258	4,335	4,125	4,048	4,48	4,116	4,313	4,187	4,384	4,696
Std. Error	0,1477	0,142	0,1446	0,1376	0,135	0,1494	0,1373	0,1439	0,1396	0,1462	0,1566
Lower 95% CI	18,01	17,91	17,96	21,23	21,02	21,28	21,17	23,85	24,05	23,91	23,6
Upper 95% CI	18,59	18,47	18,52	21,77	21,55	21,86	21,71	24,41	24,59	24,48	24,22
Normality Test											
KS distance	0,02393	0,02581	0,03418	0,03512	0,02648	0,03345	0,02797	0,02506	0,0197	0,03071	0,02766
P value	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10
Passed normality test (*=0.05)?	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
P value summary	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Tabla A-3.2 (cont.) Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de temperatura máxima diaria por mes de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido.

Temperatura Máxima	dic-01	dic-02	dic-03	DICm
Number of values	899	899	899	899
Minimum	15	16,5	15,9	16,5
25% Percentile	24,8	24,6	24,9	24,6
Median	27,4	27,5	27,6	27,6
75% Percentile	30,1	30,2	30,4	30,1
Maximum	40,7	40	39,3	39,7
Mean	27,52	27,51	27,58	27,38
Std. Deviation	4,002	4,14	4,035	3,884
Std. Error	0,1335	0,1381	0,1346	0,1295
Lower 95% CI	27,26	27,24	27,32	27,13
Upper 95% CI	27,78	27,78	27,85	27,64
Normality Test				
KS distance	0,0225	0,02382	0,01899	0,03151
P value	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10
Passed normality test (*=0.05)?	Yes	Yes	Yes	Yes
P value summary	ns	ns	ns	ns

Tabla A-3.3 Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de temperatura mínima diaria por mes de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido

Temperatura Mínima	ene-01	ene-02	ene-03	ENEROm	feb-01	feb-02	feb-03	FEBm	mar-01	mar-02	mar-03
Number of values	930	930	930	899	847	848	847	820	930	930	930
Minimum	7,8	7,9	9	9,4	8	8,4	8	8,5	5,5	6,1	6,5
25% Percentile	15,5	15,4	15,7	15,6	14,9	14,8	15,3	15,35	13,3	13,2	13,4
Median	17,5	17,3	17,7	18	16,9	16,8	17,2	17,4	15,5	15,5	15,4
75% Percentile	19,5	19,3	19,7	19,8	19,1	18,95	18,9	19,4	17,5	17,7	17,7
Maximum	25,4	27,1	25,1	26,7	26,6	26,5	26	24,2	23,3	27,1	24,9
Mean	17,44	17,34	17,65	17,66	16,98	16,8	17,04	17,25	15,48	15,51	15,47
Std. Deviation	2,885	3,023	2,912	2,957	3,086	3,018	2,773	2,944	2,979	3,124	3,055
Std. Error	0,09461	0,09912	0,09549	0,09861	0,106	0,1036	0,09527	0,1028	0,09767	0,1024	0,1002
Lower 95% CI	17,26	17,15	17,46	17,46	16,77	16,59	16,86	17,05	15,29	15,31	15,27
Upper 95% CI	17,63	17,54	17,84	17,85	17,19	17	17,23	17,46	15,67	15,71	15,67
Normality Test											
KS distance	0,0233	0,02351	0,02484	0,05326	0,0209	0,02324	0,03034	0,05171	0,02361	0,02502	0,02859
P value	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	0,0122	0.10	P > 0.10	P > 0.10	0,0249	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10
Passed normality test (*=0.05)?	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes
P value summary	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns

Tabla A-3.3 (cont.) Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de temperatura mínima diaria por mes de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido

MARZOm	abr-01	abr-02	abr-03	ABRILm	may-01	may-02	may-03	MAYOm	jun-01	jun-02	jun-03	JUNIOm	jul-01	jul-02
899	900	900	900	870	930	930	930	899	900	900	900	870	930	930
6,4	1,9	0,9	1,8	2,5	-5,6	-4	-2,1	-0,2	-5,1	-5,1	-4,6	-2,1	-6,7	-4,3
14	9,8	10,05	9,9	10,1	6,5	6,4	6,5	6,6	3,8	3,7	4	4,05	3,3	3,2
16,2	12,1	12,3	12,2	12,7	8,9	9	8,8	9,2	6,2	6,1	6,5	6,45	5,9	5,7
18,2	14,4	14,5	14,3	15,15	11,45	11,4	11,6	11,95	8,8	8,8	8,7	9,3	8,4	8,1
24,7	21,8	22	20,6	21,9	20,8	21,1	18,2	22,9	18,3	16	16,7	19,7	17,1	20,6
15,98	12,09	12,31	12,08	12,62	8,942	8,888	8,928	9,418	6,258	6,194	6,446	6,853	5,866	5,726
3,098	3,358	3,474	3,343	3,532	3,597	3,605	3,539	3,822	3,749	3,649	3,571	3,862	3,725	3,611
0,1033	0,1119	0,1158	0,1114	0,1198	0,118	0,1182	0,116	0,1275	0,125	0,1216	0,119	0,1309	0,1221	0,1184
15,77	11,87	12,08	11,87	12,38	8,71	8,656	8,7	9,168	6,013	5,955	6,213	6,596	5,626	5,494
16,18	12,31	12,54	12,3	12,85	9,173	9,12	9,156	9,669	6,503	6,433	6,68	7,11	6,106	5,959
0,0496	0,0179	0,0246	0,0208	0,02477	0,02313	0,02679	0,03157	0,02985	0,02444	0,02007	0,02098	0,05104	0,02241	0,01601
	P >	P >	P >											
0,024	0,10	0,10	0,10	P > 0,10	P > 0,10	P > 0,10	P > 0,10	P > 0,10	P > 0,10	P > 0,10	P > 0,10	0,0215	P > 0,10	P > 0,10
No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes
*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns

Tabla A-3.3 (cont.) Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de temperatura mínima diaria por mes de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido

jul-03	JULIOm	ago-01	ago-02	ago-03	AGOm	sep-01	sep-02	sep-03	SEPTm	oct-01	oct-02	oct-03	OCTm	nov-01
930	930	930	930	930	930	900	900	900	900	930	930	930	930	900
-6,8	-3	-2,9	-4,2	-6,2	-2,4	-4,6	-1,5	-2,1	-0,4	1,1	-1,5	-1,8	1,9	2,3
3,2	3,2	4,1	4,2	4,2	4,6	5,8	5,7	5,5	5,9	8,5	8,5	8,3	8,8	10,8
5,75	6	6,4	6,5	6,6	7	8,1	8,1	8	8,3	10,8	10,8	10,4	11,2	13,2
8,2	9,2	9	9	8,9	9,7	10,5	10,5	10,2	10,7	13,1	13,1	13,2	13,75	15,4
18,4	20,2	16,4	17,7	16,9	19,6	18,7	19,2	17,4	20,5	20,9	20,3	20,8	20,8	21,8
5,672	6,397	6,51	6,602	6,478	7,364	8,053	8,094	7,869	8,418	10,84	10,78	10,63	11,19	13,15
3,738	4,187	3,56	3,55	3,55	3,816	3,424	3,452	3,446	3,487	3,294	3,322	3,402	3,405	3,341
0,1226	0,1373	0,1167	0,1164	0,1164	0,1251	0,1141	0,1151	0,1149	0,1162	0,108	0,1089	0,1115	0,1117	0,1114
5,431	6,127	6,281	6,374	6,25	7,118	7,829	7,868	7,644	8,19	10,63	10,56	10,41	10,97	12,94
5,912	6,666	6,739	6,831	6,707	7,61	8,277	8,32	8,094	8,646	11,06	10,99	10,85	11,41	13,37
0,02291	0,04464	0,02995	0,01865	0,02397	0,04488	0,02051	0,01731	0,02379	0,03608	0,01802	0,01991	0,03635	0,03373	0,01933
P > 0.10	0,0491	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	0,0472	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10
Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
ns	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Tabla A-3.3 (cont.) Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de temperatura mínima diaria por mes de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido

nov-02 900	nov-03 900	NOVm 900	dic-01 930	dic-02 930	dic-03 930	DICm 913
2,9	1,2	-1	4,8	4,9	6,7	0,5
11,1	11	11,1	13,75	13,6	13,5	13,75
13,2	13,2	13,5	16	15,9	15,7	16,3
15,5	15,4	16	18,1	18,1	18	18,4
24,6	25,2	22,8	24,8	24,3	25,9	23,4
13,27	13,16	13,29	15,91	15,84	15,81	15,89
3,325	3,208	3,737	3,184	3,234	3,245	3,428
0,1108	0,1069	0,1246	0,1044	0,106	0,1064	0,1134
13,06	12,95	13,04	15,71	15,63	15,6	15,67
13,49	13,37	13,53	16,12	16,04	16,02	16,12
0,02588	0,02896	0,03904	0,02425	0,0206	0,02819	0,05771
				P >		
P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	0.10	P > 0.10	0,0046
Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
ns	ns	ns	ns	ns	ns	**

Tabla A-3.4 Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de radiación diaria por mes de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido

Radiación	ene-01	ene-02	ene-03	ENEROm	feb-01	feb-02	feb-03	FEBm	mar-01	mar-02	mar-03	MARm
Number of values	930	930	930	930	847	848	847	848	930	930	930	930
Minimum	137	109	101	0	79	135	25	52,9	162	104	94	0
25% Percentile	536	540	514	551,9	478	474	482	434,1	379,5	376,5	381,5	342,5
Median	643	644	647	693,6	574	575	570	607,8	460	463	463	499,3
75% Percentile	711	711	712,5	747,8	637	639	632,5	683,5	519,5	519	521	575,5
Maximum	804	803	804	1241	761	753	752	929,5	659	657	654	829
Mean	613,7	615,4	608,5	637,4	552,8	551,7	549,2	557,7	444,9	447,2	446,4	456,5
Std. Deviation	120,5	121,7	129,2	191,5	110,1	112,2	110,9	188,3	97,42	97,71	99,57	167,7
Std. Error	3,953	3,991	4,236	6,278	3,782	3,855	3,811	6,466	3,195	3,204	3,265	5,498
Lower 95% CI	605,9	607,6	600,2	625,1	545,3	544,2	541,7	545	438,7	440,9	440	445,7
Upper 95% CI	621,4	623,3	616,8	649,8	560,2	559,3	556,6	570,4	451,2	453,5	452,8	467,3
Normality Test												
KS distance	0,1309	0,1239	0,1413	0,1319	0,09657	0,113	0,09521	0,1178	0,07511	0,08008	0,09105	0,1101
P value	P<0.0001	P<0.0001	P<0.0001	P<0.0001	P<0.0001	P<0.0001	P<0.0001	P<0.0001	P<0.0001	P<0.0001	P<0.0001	P<0.0001
Passed normality test (*=0.05)?	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
P value summary	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***

Tabla A-3.4 (cont.) Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de radiación diaria por mes de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido

abr-01	abr-02	abr-03	ABRILm	may-01	may-02	may-03	MAYOm	jun-01	jun-02	jun-03	JUNIOm	jul-01	jul-02	jul-03	JULIOm	ago-01
900	900	900	900	930	930	930	930	900	900	900	900	930	930	930	930	930
28	95	33	32,1	76	38	20	32,1	22	62	45	32,1	54	10	52	3	45
273,5	280	273	219,1	207	207	212	160,6	164	161	163	108	179	181,5	181	122,1	242
336,5	340	332	351,2	252	253	255	264,9	199	195	195	197,7	216	213	218	228	291
387	387	384	424,7	293	294	297	314	230	226	228	260,8	249	252	253	285,2	347
497	510	502	1016	389	382	407	673,1	318	315	312	420,2	342	362	341	454,8	462
327,2	333	327	330,5	248,2	248,2	251,3	243,7	198	194	196	187,5	213,7	214,4	215,7	211,1	290,5
78,89	73,35	75,63	134,9	56,91	58,68	58,31	94,62	49,99	46,51	48,06	79,03	52,4	51,87	52,12	89,5	71
2,63	2,445	2,521	4,497	1,866	1,924	1,912	3,103	1,666	1,55	1,602	2,634	1,718	1,701	1,709	2,935	2,328
322,1	328,2	322,1	321,7	244,6	244,4	247,5	237,6	194,7	191	192,8	182,3	210,3	211,1	212,3	205,3	286
332,4	337,8	332	339,3	251,9	252	255	249,8	201,2	197	199,1	192,6	217,1	217,7	219	216,8	295,1
0,0618	0,05176	0,0452	0,07356	0,04229	0,04187	0,04472	0,09575	0,02801	0,02525	0,02491	0,09632	0,02086	0,02435	0,02475	0,1026	0,04198
								P >	P >	P >		P >	P >	P >		
0,0021	0,0161	0,0506	0,0001	0,0718	0,0768	0,0485	P<0.0001	0.10	0.10	0.10	P<0.0001	0.10	0.10	0.10	P<0.0001	0,0754
No	No	Yes	No	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
**	*	ns	***	ns	ns	*	***	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	***	ns

Tabla A-3.4 (cont.) Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de radiación diaria por mes de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido

ago-02 930	ago-03 930	AGOm 930	sep-01 900	sep-02 900	sep-03 900	SEPTm 900	oct-01 930	oct-02 930	oct-03 930	OCTm 930	nov-01 900	nov-02 900	nov-03 900	NOVm 900	dic-01 930
1	100	32,1	74	67	43	32,1	55	45	123	10,8	125	107	57	32,1	113
248	245	181,1	335	333	326	264,7	386	390,5	393	319,1	491	484	490	434,6	531,5
299	299	319,1	403	397	393	421,8	471	474,5	467,5	520,7	590	587,5	587	634,5	629,5
344	345	378,6	459	460	455	503,1	555	544	551	621,5	682	672,5	673	714,2	728
461	475	815,2	596	592	617	926	726	735	709	898,4	797	793	800	1050	812
293,4	293,8	289,7	395,2	391,6	389,6	390,8	466	465	467,3	478,8	573,5	570,2	569,4	574,1	614,8
71	70,13	125,4	88,9	89	88,02	157,8	117,2	113,4	106,8	193,1	125,1	127	124,2	207,8	125,1
2,328	2,3	4,111	2,963	2,967	2,934	5,259	3,842	3,719	3,502	6,332	4,17	4,234	4,142	6,927	4,101
288,8	289,2	281,6	389,4	385,8	383,8	380,5	458,4	457,7	460,4	466,3	565,3	561,9	561,2	560,5	606,8
298	298,3	297,8	401	397,4	395,3	401,2	473,5	472,3	474,2	491,2	581,7	578,5	577,5	587,7	622,8
0,04014	0,03281	0,09761	0,04243	0,04852	0,04469	0,08447	0,03544	0,03924	0,04026	0,09277	0,08745	0,0711	0,0682	0,1191	0,096
P >	P >	P < 0.0001	0,0783	0,0289	0,0549	P < 0.0001	P >	P >	0,0981	P < 0.0001	P < 0.0001	0,0002	0,0005	P < 0.0001	P < 0.0001
0,0998	0,10	No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No	No	No
Yes	Yes	***	ns	*	ns	***	ns	ns	ns	***	***	***	***	***	***
ns	ns														

Tabla A-3.5 Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de precipitación mensual de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido

Precipitación mensual	ene-01	ene-02	ene-03	ENEROm	feb-01	feb-02	feb-03	FEBm	mar-01	mar-02	mar-03	MARm
Number of values	29	30	30	29	30	30	30	29	30	30	30	29
Minimum	41,3	38,8	23,1	22,5	17,7	15,5	19,1	31,3	16,3	26,3	20,5	27,5
25% Percentile	60,75	74,9	57,6	47,45	59,15	53	75,7	52,45	78,55	60,6	64,1	59,6
Median	84,4	122,9	104,9	85,9	107,9	84	107,1	88,7	133,7	107,5	107,5	95,2
75% Percentile	126,3	150,7	129	138	129,6	156,7	149,4	132,4	179,1	146	173,8	156,6
Maximum	279,4	286,3	259,6	202,1	251,4	261,2	292	299,2	266,3	282,3	493,9	441,6
Mean	100,6	118	109,9	96,09	104,3	105,7	117,6	108,8	130,1	118,1	133,3	130
Std. Deviation	56,27	53,28	63,51	53,31	56,3	69,03	65,43	73,79	69,14	63,84	95,59	100,6
Std. Error	10,45	9,727	11,6	9,899	10,28	12,6	11,95	13,7	12,62	11,66	17,45	18,68
Lower 95% CI	79,22	98,1	86,18	75,81	83,31	79,93	93,15	80,71	104,3	94,29	97,64	91,7
Upper 95% CI	122	137,9	133,6	116,4	125,4	131,5	142	136,9	155,9	142	169	168,2
Normality Test												
KS distance	0,1477	0,07705	0,1806	0,143	0,1255	0,1696	0,1143	0,2277	0,1137	0,1336	0,2287	0,2162
P >	0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	0.10	0.10	0.10	0,0987	0.10	0.10	0,0866	0.10
Passed normality test (*=0.05)?	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
P value summary	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Tabla A-3.5 (cont.) Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de precipitación mensual de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido

abr-01 30	abr-02 30	abr-03 30	ABRILm 29	may-01 30	may-02 30	may-03 30	MAYOm 29	jun-01 30	jun-02 30	jun-03 30	JUNIOm 29	jul-01 30	jul-02 30	jul-03 30	JULIOm 29
15,3	16,6	6,9	10,5	2,3	0,6	0,3	3,7	0,3	8,4	9,9	0	7,3	2,5	2,6	7,4
42,05	39,4	35,4	35,05	56,6	24,95	54,2	33,2	20,7	37,25	25,05	27,9	35,35	43,15	36,15	38,55
79,85	81,2	59,35	81,2	103,9	74,45	73,1	75,2	38	57,25	49,5	60,9	64,2	54,05	59,35	45,8
123,8	127,6	132,1	149,2	165	135,4	131	117,3	95,5	110,3	110,6	111,1	99,85	92,1	94,35	79,2
334,2	241	192,5	276	274,3	281,9	239,4	355,4	184,6	341,2	321,3	282,2	178,9	150,2	130,1	137,9
95,67	91,1	74,39	97,63	111,2	90,67	94,49	87,13	56,13	83,88	71,99	79,47	74,54	66,75	64,39	57,09
71,85	59,06	50,7	70,24	66,18	79,23	62,55	72,29	47,89	74,7	67,51	68,88	45,27	35,22	34,9	31,21
13,12	10,78	9,257	13,04	12,08	14,47	11,42	13,42	8,744	13,64	12,33	12,79	8,265	6,43	6,372	5,795
68,84	69,05	55,46	70,92	86,51	61,08	71,14	59,63	38,24	55,99	46,78	53,26	57,63	53,59	51,36	45,22
122,5	113,2	93,33	124,4	135,9	120,3	117,9	114,6	74,01	111,8	97,2	105,7	91,44	79,9	77,43	68,96
0,2125	0,1197	0,2028	0,1169	0,08942	0,1366	0,1978	0,1271	0,2509	0,1728	0,1982	0,1646	0,1209	0,164	0,1072	0,1906
P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	0,0458	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10	P > 0.10
Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Tabla A-3.5 (cont.) Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de precipitación mensual de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido

ago-01	ago-02	ago-03	AGOm	sep-01	sep-02	sep-03	SEPTm	oct-01	oct-02	oct-03	OCTm	nov-01	nov-02	nov-03
30	30	30	29	30	30	30	29	30	30	30	29	30	30	30
0,6	1,6	7,3	6,4	2,7	7,7	0	24,8	24,5	23,5	43,4	13,5	23,4	18,6	24,4
37,25	41,65	56,8	32,75	48,4	32	31,45	37,9	53,85	50,3	87,55	54,35	86,7	61	64,7
77,35	76,7	84,8	61,9	69,15	65,75	54,2	63,7	112,8	75,8	115,7	100,5	135,1	97	96,25
123,3	106	117,1	99,75	90,3	106,7	110,3	112,4	135,7	125,7	160,8	153,3	187,3	125,2	134,5
235,1	201,3	227,1	186,7	192,4	238,7	325,9	178,7	244,6	295,2	294,2	289,6	600,3	219,2	198,5
86,08	78,43	91,53	71,52	73,1	75,58	79,9	76,87	104,1	94,29	131,9	111,5	148,9	99,34	102
61,52	46,63	49,64	49,97	41,37	56,84	67,99	47,35	49,16	59,62	59,15	67,57	111,4	51,3	46
11,23	8,513	9,063	9,28	7,553	10,38	12,41	8,793	8,975	10,89	10,8	12,55	20,34	9,366	8,398
63,11	61,02	72,99	52,51	57,65	54,36	54,51	58,86	85,71	72,03	109,8	85,75	107,3	80,19	84,8
109,1	95,85	110,1	90,53	88,54	96,8	105,3	94,88	122,4	116,6	154	137,2	190,5	118,5	119,2
0,12	0,09269	0,1235	0,1228	0,1378	0,1412	0,1724	0,177	0,1217	0,1442	0,1561	0,1113	0,1773	0,09965	0,07392
P >		P >	P >	P >	P >	P >	P >	P >	P >	P >	P >	P >		
0.10	P > 0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	P > 0.10	P > 0.10
Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Tabla A-3.5 (cont.) Resultados de Estadísticos Descriptivos de 3 muestras de precipitación mensual de 29 años de clima generado y un a muestra de 29 años de clima medido

NOVm	dic-01	dic-02	dic-03	DICm
29	30	30	30	29
20	28,2	3,5	5,8	16,3
61,1	44,5	56,15	53,05	44,1
111,2	91,35	88,3	85,65	77,3
149,2	140,3	128,6	125,2	160,2
401,3	258,2	462,6	219,7	246,9
115,5	102,5	103,3	93,99	101,1
74,86	64,84	85,68	51,73	67,61
13,9	11,84	15,64	9,445	12,55
86,99	78,24	71,27	74,67	75,42
143,9	126,7	135,3	113,3	126,9
0,1533	0,1557	0,2101	0,1576	0,155
P >	P >	P >	P >	P >
0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
ns	ns	ns	ns	ns

Tabla A3.6-a. Períodos de retorno para valores diarios de escurrimiento, pérdida de sedimento, tasa pico de precipitación y lámina de precipitación (pp). Suelo BELc, 3% de pendiente, rotación soja-trigo.

Largo de Pendiente (m)	Período de retorno (años)	Escurrecimiento diario (mm)	Pérdida de sedimento diario (Mg/ha)	Tasa de pp. pico diaria (mm/h)	Lámina de pp. diaria (mm)
100	2	63.6	1.6	126.2	94.2
	5	81.5	2.1	142.2	117.1
	10	95.3	2.6	151.1	133.5
	20	111.2	3.1	163.9	143.1
	25	111.4	3.5	164.3	148.5
	50	131.4	4	170.9	152.8
200	2	65.7	2.1	87.4	94.2
	5	83.7	3	116.3	117.1
	10	95.9	3.9	129.3	133.5
	20	112	4.9	142.4	143.1
	25	113.2	5.2	146.6	148.5
	50	137.8	6.5	151.1	152.8
300	2	66.5	2.6	67.8	94.2
	5	85.2	4.1	93	117.1
	10	99.5	5.3	111.8	133.5
	20	112	6.5	123.6	143.1
	25	114.5	6.7	123.8	148.5
	50	140.2	9.7	129.4	152.8

Tabla A3.6-b. Períodos de retorno para valores diarios de escurrimiento, pérdida de sedimento, tasa pico de precipitación y lámina de precipitación (pp). Suelo BETb, 3% de pendiente, rotación soja-trigo.

Largo de Pendiente (m)	Período de retorno (años)	Escurrecimiento diario (mm)	Pérdida de sedimento diario (Mg/ha)	Tasa de pp. pico diaria (mm/h)	Lámina de pp. diaria (mm)
100	2	66.7	1	116.8	94.2
	5	83.4	1.4	139.8	117.1
	10	101	2	152.5	133.5
	20	112.6	2.6	159.8	143.1
	25	117.3	2.6	160.9	148.5
	50	139.8	2.7	167.9	152.8
200	2	69.1	1.3	82.2	94.2
	5	86.2	2.1	109.1	117.1
	10	106	3	127.6	133.5
	20	116.7	3.9	142.1	143.1
	25	117.4	4.2	142.2	148.5
	50	142.9	5.6	146.5	152.8
300	2	70	1.8	66.4	94.2
	5	85.1	2.9	90	117.1
	10	107.6	4	110.9	133.5
	20	117.2	5.6	118.9	143.1
	25	119.5	5.8	124.8	148.5
	50	143.3	7.9	129.1	152.8

Tabla A3.6-c. Períodos de retorno para valores diarios de escurrimiento, pérdida de sedimento, tasa pico de precipitación y lámina de precipitación (pp). Suelo BETe, 3% de pendiente, rotación soja -trigo.

Largo de Pendiente (m)	Período de retorno (años)	Escurrecimiento diario (mm)	Pérdida de sedimento diario (Mg/ha)	Tasa de pp. pico diaria (mm/h)	Lámina de pp. diaria (mm)
100	2	70.6	1.5	124	94.2
	5	85.7	2	144.8	117.1
	10	102.2	2.9	156.3	133.5
	20	116.3	4	164.6	143.1
	25	118.4	4.2	165.2	148.5
	50	140.1	4.3	170.6	152.8
200	2	71.3	2	89.1	94.2
	5	87.5	3.1	119	117.1
	10	106.4	4.3	134.1	133.5
	20	117.4	5.5	144.6	143.1
	25	118.4	5.9	145	148.5
	50	141.1	6.8	149.9	152.8
300	2	71.5	2.8	72.3	94.2
	5	88.1	4.4	96.5	117.1
	10	108	5.2	118.3	133.5
	20	117.8	7	128.4	143.1
	25	118.4	8	129.4	148.5
	50	142.8	9.5	130.9	152.8

Tabla A3.6-d. Períodos de retorno para valores diarios de escurrimiento, pérdida de sedimento, tasa pico de precipitación y lámina de precipitación (pp). Suelo BSTc, 3% de pendiente, rotación soja-trigo.

Largo de Pendiente (m)	Período de retorno (años)	Escurrecimiento diario (mm)	Pérdida de sedimento diario (Mg/ha)	Tasa de pp pico diaria (mm/h)	Lámina de pp diaria (mm)
100	2	52.7	2.4	119.9	94.2
	5	67.5	3.2	140.5	117.1
	10	77.1	3.7	147.9	133.5
	20	82.2	4.3	159.2	143.1
	25	83.2	4.3	159.3	148.5
	50	91	4.7	165.1	152.8
200	2	52.7	2.6	85.3	94.2
	5	67.5	3.6	119.9	117.1
	10	77.1	4.3	127.9	133.5
	20	82.1	5	134.7	143.1
	25	85.9	5	137.2	148.5
	50	94.9	5.4	147.6	152.8
300	2	50.7	2.7	59.3	94.2
	5	67.6	3.7	87.8	117.1
	10	77	4.4	99.2	133.5
	20	82.8	5.8	117.2	143.1
	25	87.1	6	118.7	148.5
	50	97.6	6.4	130.9	152.8