

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO DEL SUELO EN DOS MANEJOS
CONTRASTANTES EMPLEANDO EL MODELO WEPP

por

BLANCO ALVES Carlos Nicolás

Tesis presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de *Magister* en Ciencias
Agrarias opción Ciencias del
Suelo

MONTEVIDEO

URUGUAY

2016

Tesis aprobada por el tribunal integrado por el Ing. Agr. (PhD) Fernando García Préchac, la Ing. Agr. (PhD) Lucía Puppo y el Ing. Agr. (M.Sc.) Alvaro Otero el de 2016. Autor: Ing. Agr. Carlos Nicolás Blanco Alves. Director: Ing. Agr. (PhD) Mario Pérez Bidegain.

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa por aguantar muchas ausencias en estos años.

A mis familiares por el apoyo en este camino transitado durante la Maestría.

A mi tutor Mario Pérez Bidegain por el apoyo y la paciencia.

A Leticia Martínez por el aporte de la información de las determinaciones de campo.

A mis jefes directos Pancracio Cánepa y Mónica Barbazán por permitirme faltar en algunas instancias prácticas cuando tenía que asistir a algún curso de la Maestría.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VI
SUMMARY.....	VII
<u>1 INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1 BALANCE HÍDRICO.....	3
<u>1.1.1 Evapotranspiración</u>	5
<u>1.1.2 Distribución de la evapotranspiración en la zona radicular</u>	9
<u>1.1.3 Percolación</u>	11
<u>1.1.4 Flujo subsuperficial</u>	13
1.2 Implementación del modelo.....	17
<u>1.2.1 Base de datos topografía</u>	17
<u>1.2.2 Base de datos de clima</u>	18
<u>1.2.3 Base de datos de suelo</u>	19
<u>1.2.4 Base de datos de manejo</u>	19
1.3 Validación de modelos.....	20
1.4 Análisis de sensibilidad.....	23
<u>2 EVALUACIÓN DEL MODELO WEPP PARA PREDECIR EL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO EN FORESTACIÓN CON PINOS EN EL NORESTE DE URUGUAY</u>	25
2.1 RESUMEN.....	25
2.2 SUMMARY.....	26
2.3 INTRODUCCIÓN.....	26
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
<u>2.4.1 Sitio de estudio</u>	28
<u>2.4.2 Mediciones</u>	28
<u>2.4.3 Entradas de WEPP</u>	30
2.4.3.1 Base de datos de Clima.....	31
2.4.3.2 Base de datos de Topografía.....	31
2.4.3.3 Base de datos de Suelo.....	31
2.4.3.4 Base de datos de Manejo.....	33
2.5 VALIDACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO.....	34

2.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
2.7 CONCLUSIÓN	41
BIBLIOGRAFÍA.....	41
<u>3 EVALUACIÓN DEL MODELO WEPP PARA PREDECIR EL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO EN PASTIZALES NATURALES EN EL NORESTE DE URUGUAY</u>	45
3.1 RESUMEN.....	45
3.2 SUMMARY	46
3.3 INTRODUCCIÓN.....	46
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
<u>3.4.1 Sitio de estudio</u>	48
<u>3.4.2 Mediciones</u>	49
<u>3.4.3 Entradas de WEPP</u>	51
3.4.3.1 Base de datos de Clima	51
3.4.3.2 Base de datos de Topografía.....	52
3.4.3.3 Base de datos de Suelo	52
3.4.3.4 Base de datos de Manejo.....	53
3.5 VALIDACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO	54
3.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	55
3.7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
3.8 CONCLUSIÓN	63
BIBLIOGRAFÍA.....	64
<u>4 CONCLUSIONES GENERALES</u>	68
BIBLIOGRAFÍA.....	70

RESUMEN

Uruguay se ha caracterizado por ser un país ganadero con predominio del campo natural como base alimenticia. En las últimas décadas se ha dado el crecimiento del rubro forestal. Este cambio en el uso del suelo puede producir alteraciones en la dinámica del agua del suelo. Para detectar estos cambios existen modelos de predicción como WEPP. Dicho modelo es de simulación diaria continua basado en procesos hidrológicos. El objetivo de este trabajo es validar el componente balance hídrico del modelo WEPP en dos cuencas, una, bajo campo natural y otra bajo forestación. Para ello se utilizaron datos de agua en el suelo medidos con sonda de neutrones cuatro veces al año hasta 1,3 m de profundidad durante diez años en dos catenas de suelos una sobre campo natural y otra sobre uso forestal. Para el análisis estadístico se utilizó el coeficiente de Nash & Sutcliffe, coeficiente de determinación (CD) y recta de regresión para la validación del modelo y se realizó un análisis de sensibilidad por método gráfico. La estimación del contenido de agua del suelo del modelo WEPP en campo natural en los perfiles C (ladera alta), D (ladera media) y F (ladera baja) no fue adecuada ($E = 0,03, -1,29$ y $0,17$ para los perfiles C, D y F, respectivamente) ya que tuvo un coeficiente de eficiencia “insuficiente” según Molnar (2011), La recta de regresión se alejó del ajuste perfecto existiendo una sobreestimación ($p < 0,01$), excepto para el perfil F donde no hubo diferencia entre la recta de regresión y la 1:1. Para forestación, la performance del modelo fue similar que para campo natural. El coeficiente de eficiencia fue “insuficiente” para los tres perfiles ($E = -0,01, -1,74$ y $-0,08$ para los perfiles C, D y F respectivamente). Hubo diferencia significativa entre la recta de regresión y la línea 1:1 para el perfil D ($p < 0,01$) sin embargo no ocurrió lo mismo para los perfiles C y F ($p > 0,01$). Los resultados indican que es necesario continuar con los trabajos de validación del modelo WEPP para utilizarlo en condiciones locales.

Palabras clave: *Pinus taeda*, campo natural, agua en el suelo.

SUMMARY

Uruguay has been characterized by its livestock production based on native pastures. During the last decades the forestry sector has grown. This land use change could produce changes on soil water dynamics. To detect these changes exist soil prediction models, like WEPP. The objective of this work was to validate the soil water balance component of WEPP in two watersheds, one under native pasture and the other one afforested. We used soil water data measured with neutron probe four times a year up to 1.3 m depth in two catenas, one under native pastures and the other one afforested. For the statistical analysis, we used the Nash-Sutcliffe coefficient (E), the coefficient of determination (CD), and the regression line to validate the model, and the graphical method for the sensibility analysis. The WEPP model estimates on soil profiles C (summit), D (shoulder), and F (footslope) were not adequate (E = 0,03, -1,29 y 0,17 for soil profiles C, D y F, respectively) because the coefficient of efficiency was not sufficient according to Molnar (2011). The regression line showed an overestimation ($p > 0.01$), except for soil profile F where the regression line was not different from the 1:1 line. For afforestation, the WEPP model performance was similar than for native pastures. The coefficient of efficiency was not sufficient for the three soil profiles (E = -0,01, -1,74 y -0,08 for soil profiles C, D, and F, respectively). It was a difference between the regression line and the 1:1 line for soil profile D ($p < 0.01$), however it was not different for soil profiles C and F ($p > 0,01$). The results indicate that it is necessary to keep working on WEPP model validation for local conditions.

Keywords: *Pinus taeda*, natural field, soil water.

1 INTRODUCCIÓN

Uruguay comprende una superficie de 176.000 km² en el límite norte de Río de la Plata y en el margen oeste del Río Uruguay. Se caracteriza por ser de clima templado sub- húmedo, con precipitaciones que varían de 980 mm en el sur a 1400 mm en el norte con una muy alta variabilidad inter estacional e interanual que ocasionan la ocurrencia de eventos extremos como son las sequías e inundaciones y con una temperatura media decreciente de norte a sur que va desde 20 a 16 °C. Estas características climáticas llevan a que Uruguay forme parte de pastizales del Río de la Plata, que se extienden por 70 millones de hectáreas en Uruguay, este de Argentina entre los grados 30 y 39 de latitud sur, y la mitad austral del Estado de Río Grande do Sul, constituyendo una de las áreas de praderas más grandes del mundo (Pérez Arrarte, 2007).

De hecho la mayor parte de la producción pecuaria del Uruguay se desarrolla sobre pasturas naturales, las cuales ocupan alrededor del 85% del área dedicada a la ganadería siendo ésta la principal actividad económica del Uruguay (Berretta, 1996; Pérez Arrarte, 2007; Latterra y Rivas, 2005). No obstante en la última década, el sector forestal ha tenido un fuerte empuje en el Uruguay. La actividad ha sido incentivada y promovida por el Estado en sus inicios y desarrollada principalmente por empresas privadas. Este aumento del área se ha podido llevar a cabo también porque el país cuenta con condiciones climáticas favorables para la forestación, estando situado en la misma latitud que muchos países en los que se llevan a cabo emprendimientos forestales de gran importancia como Sudáfrica, Nueva Zelanda, Argentina y Chile (Grosskoff et al., 2003).

Independientemente de la actividad agropecuaria que se haga referencia, éstas se caracterizan por ser altamente influenciadas por las condiciones climáticas y su variabilidad, sobre todo por las precipitaciones (Castaño et al., 2010). Incluso las sequías han sido identificadas como la

amenaza de origen meteorológico que ha causado mayor impacto en los sistemas ganaderos pastoriles de Uruguay (Cruz et al., 2007; MGAP y FAO, 2013).

Por esta razón se hace necesario poder estimar el contenido de agua del suelo en forma segura. Una de las metodologías que puede ser utilizada es el balance hídrico llevado a cabo por el modelo WEPP, modelo mediante el cual se puede estimar la evapotranspiración actual, déficit y excesos de agua del suelo con una base diaria. Este modelo es una herramienta que a partir de dicho balance hídrico permite estimar erosión y ha sido ampliamente usado para la planificación de tierras agrícolas y forestales (Flanagan et al., 2007). Pero para poder hacer uso de él es imprescindible validarlo para la zona donde se lo quiera emplear, proceso mediante el cual según Reynolds (1984) y Mitchell (1997) se comparan las predicciones del modelo con datos observados a campo.

WEPP (Water Erosion Prediction Project) es un modelo desarrollado entre 1985 y 1995 por un equipo interinstitucional de científicos dirigido por el USDA que puede ser usado en diferentes escalas. Está basado en un conjunto de programas y modelos (De Regoyos Sáinz et al. 2002). Es un modelo que permite hacer simulaciones diarias desarrolladas para reemplazar otros modelos ya existentes como es el caso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Laflen et al. 1994). Este modelo se basa en la generación de un clima de manera estocástica involucrando procesos hidrológicos así como de erosión con desprendimiento de suelo por las gotas de lluvia y flujo de agua, transporte de sedimentos por flujo de agua y deposición (Flanagan et al., 1995; Flanagan et al., 2001; Laflen, 2010). Mantiene una determinación diaria de las condiciones del suelo y de la biomasa por encima y debajo del suelo. Hace una estimación de la acumulación de toda el agua que cae sobre la superficie del suelo, proveniente de la lluvia, nieve o riego (Nearing et al. 1989; Nearing et al. 1990). Por otro lado, en la generación del modelo WEPP se han incluido una gran diversidad

de vegetación y características del suelo para desarrollar una ecuación general que describa el proceso de erosión en el espectro de diferentes tipos de pastizales que deben ser revisadas para cada situación (Simanton et al., 1987; Simanton & Renard, 1992; Alberts et al., 1995).

De acuerdo a lo que dicen Chartier y Rostagno (2010) dentro del modelo se incluyen componentes para la generación del clima (dependiendo de los datos disponibles), suelos congelados, acumulación y derretimiento de nieve, riego, infiltración, flujo superficial hidráulico, balance de agua, crecimiento de plantas, descomposición de residuos, suelo perturbado por laboreo, consolidación, erosión y deposición, a través de cuatro bases de datos, en un rango de escalas de tiempo, incluyendo eventos de tormentas individuales, totales mensuales, totales anuales o un valor promedio anual basados en el dato para una serie larga de años (Renschler , 2003).

El modelo WEPP con el transcurso del tiempo se ha ido mejorando a través de diferentes versiones y de ellas la más reciente es una interface de cuenca que se puede usar en línea (Flanagan et al. 2013) desarrollado para ser usado específicamente para cuencas forestales poniendo especial énfasis en el flujo sub-superficial.

El modelo WEPP tiene incorporado un componente de balance hídrico que se describe a continuación.

1.1 BALANCE HÍDRICO

Este componente dentro del modelo WEPP está diseñado de manera que se le debe suministrar datos de clima, infiltración y crecimiento de los cultivos para poder estimar el contenido de agua del suelo en la zona radicular además de la evapotranspiración durante todo el período de simulación. Según Savabi y Williams (1995) WEPP utiliza un período de simulación de 24 horas.

En el modelo WEPP el balance hídrico tiene en cuenta datos de infiltración, escurrimiento, evaporación directa del suelo, transpiración de la planta, deshielo y filtraciones; y puede ser representado mediante la siguiente ecuación:

$$\Theta = \Theta_{in} + (P - I) \pm S - Q - ET - D - Q_d$$

Siendo Θ el contenido de agua en la zona radicular para un día dado (m), Θ_{in} es el contenido de agua inicial del suelo en la zona radicular (m), P es la precipitación acumulada (m), I es la interceptación de la precipitación por la vegetación (m), S es el contenido de agua como nieve (+) cuando el deshielo y el derretimiento es igual todos los días, (-) cuando hay acumulación de nieve), Q es la cantidad acumulada de escurrimiento superficial (m), ET es la cantidad acumulada de evapotranspiración (m), D es la cantidad acumulada de pérdidas por percolación fuera de la zona radicular (m) y Q_d es el flujo lateral sub-superficial (m). En Uruguay el parámetro "S" no es tenido en cuenta debido a que no ocurren nevadas. La interceptación de la precipitación es el agua almacenada sobre el suelo y que se encuentra principalmente sobre la vegetación (Yu-Jun Cui y Zornberg, 2008) y de acuerdo a lo mencionado por Savabi y Stott en 1994 puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$I = 0,001(3,7 VE - 1,10 \times 10^{-4} VE^2)$$

Donde VE es la biomasa viva sobre el suelo en $kg.m^2$.

Según Yu-Jun Cui y Zornberg (2008) la interceptación es insignificante pero cuando se trata de árboles densos se puede llegar a producir una importante reducción de la intensidad de la precipitación.

En el modelo WEPP la precipitación es particionada entre lluvia y nieve de acuerdo a la temperatura del aire pero debido a que en Uruguay de acuerdo

a las condiciones meteorológicas no se producen nevadas, se considerará únicamente la lluvia.

1.1.1 Evapotranspiración

La evapotranspiración se compone por la evaporación que se produce directamente desde el suelo y la transpiración desde las plantas. En el proceso de evaporación se generan cambios en el estado del agua debido a que se da un cambio en la energía cinética del agua. En la transpiración el agua que es absorbida por las plantas es transportada a través del sistema vascular hasta los estomas lugar a partir del cual es transpirada (Yu-Jun Cui y Zornberg, 2008). Por lo que para la determinación de la evapotranspiración se tiene en consideración la energía solar la cual suministra calor, el flujo de calor del suelo, el calor latente necesario para la evaporación y el contenido de agua que hay en el suelo (Yu-Jun Cui y Zornberg, 2008) y en el modelo WEPP para calcularla se tomó la ecuación de Ritchie a la cual se le han realizado algunas modificaciones (Ritchie, 1972). De todas maneras para determinar este componente dependiendo de los datos meteorológicos con los cuales se cuenta, se puede escoger entre dos opciones. En el caso en el que se cuenta con datos de radiación diaria, temperatura, viento y temperatura en el punto de rocío o humedad relativa, el modelo puede usar la función de viento original (Penman 1963; y Jensen, 1974):

$$Eu = \frac{\delta}{\delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\gamma + \delta} 6,43 (1,0 + 0,53 uz) (e_z^0 - e_z)$$

Donde **Eu** = es la evapotranspiración potencial diaria ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$), **δ** = pendiente de la curva de presión de vapor saturado a la temperatura media del día, **γ** = constante psicrométrica, **G** = flujo de calor del suelo ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$), **Rn** = radiación neta ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$), **μz** = velocidad del viento ($m.s^{-1}$), **e_z^0** = presión de vapor saturado (KPa), **e_z** = presión de vapor (Kpa). **Eu** es convertida a

metros por día dividiéndolo por $2,501 - 2,361 * 10^{-3} T$, donde T es la temperatura promedio del aire (Harrison, 1963).

La otra opción es en el caso en que solo el dato de radiación solar y temperatura están disponibles el modelo usa un método diferente que es el de Priestly-Taylor (1972):

$$E_u = 0,0013 \frac{R_{nl} \delta}{58,3 \delta + \gamma}$$

Donde R_{nl} = radiación solar neta diaria (ly). La radiación neta en la ecuación de Penman y en la de Priestly-Taylor es obtenida por multiplicar la radiación solar diaria entrante por $(1 - A)$, donde A es el albedo (0 – 1,0).

El Albedo es la radiación que es reflejada por una superficie y es evaluado en WEPP teniendo en consideración el suelo, cultivos y cobertura de nieve. En el caso nuestro donde no existe nieve, el albedo va a tomar el valor del albedo del suelo y en WEPP puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$A = 0,23 (1 - C_f) + (A_s) C_f$$

En esta ecuación 0,23 es el albedo de las plantas, C_f es el índice de cobertura del suelo (0 – 1,0), y A_s es el albedo del suelo.

A su vez el valor del índice de cobertura del suelo es calculado usando la ecuación:

$$C_f = e^{(-0,000029 C)}$$

Donde C es la suma de la biomasa viva sobre el suelo y el residuo de plantas ($Kg ha^{-1}$), que es determinado durante el crecimiento del cultivo.

El valor de la pendiente de la curva de presión de vapor saturada a temperatura media del aire δ en la ecuación de Penman y Priestly-Taylor puede ser determinada a partir de:

$$\delta = \frac{5304}{T_k^2} e^{(21,23 - (5304/T_k))}$$

Donde T_k es la temperatura del aire promedio diaria, en grados kelvin. La constante psicrométrica es calculada con la ecuación $\gamma = 6,6 * 10^{-4} PB$. Donde PB es la presión barométrica (KPa) que es calculada por la ecuación:

$$PB = 101 - 0,0115 he + 5,44 * 10^{-7} he^2$$

Donde he es la elevación del sitio.

Según deVries (1963) en WEPP el flujo de calor del suelo es estimado teniendo en consideración la temperatura del aire y la presión de vapor saturada, en KPa es calculada usando la ecuación:

$$e_z^0 = \exp \frac{16,78T - 116,9}{T + 237,3}$$

Donde T es el promedio de la temperatura diaria en °C. En la ecuación anterior donde se calculó la presión de vapor se debió utilizar la temperatura al punto de rocío.

“Tanto la evaporación potencial del suelo, E_{sp} , y la transpiración de la planta, E_{tp} , son predichas usando las ecuaciones siguientes”:

$$E_{sp} = E_u e^{(-0,4 L)}$$

$$E_{tp} = (1 - E_{sp}/E_u) * E_u$$

Donde L es el índice de área foliar definido como el área de hojas de la planta en relación con el área de superficie de suelo.

“La evaporación del suelo desnudo, **E_{sb}**, es calculado en dos estados. En la primera etapa la evaporación del suelo es limitado únicamente por la energía disponible sobre la superficie del suelo y, como consecuencia se considera que es igual a la evaporación potencial del suelo, **E_{sp}**. El límite superior de la etapa uno para el cálculo de la evaporación se calcula usando la ecuación (Ritchie, 1972):”

$$E_{su} = 0,009 (T_r - 3,0)^{0,42}$$

Donde **E_{su}**, es el límite superior de la evaporación del suelo de la etapa uno (m), y **T_r** es la transmisividad del suelo (mm.d^{-0.5}) que depende de la clase textural de la capa superficial del suelo:

$$T_r = 4,165 + 0,02456 S_a - 0,01703 C_l - 0,0004 S_a^2$$

Donde **S_a**, es el porcentaje de arena en la capa del suelo desnudo evaporado y **C_l**, es el porcentaje de arcilla en la capa del suelo desnudo evaporado. En esta ecuación se ve con claridad el efecto de la textura donde el contenido de arena y arcilla pueden cambiar la transmisividad del suelo y por lo tanto influir sobre la evaporación.

“Cuando la evaporación acumulada del suelo supera el límite superior de la etapa 1, **E_{su}**, comienza la etapa dos de evaporación. Esta etapa de evaporación del suelo se estima usando la ecuación:”

$$S_2 = 0,001 T_r (d_2^{1/2} - (d_2 - 1)^{1/2})$$

Donde **S₂** es la etapa dos de la evaporación del suelo desnudo para un día (m.d⁻¹) y **d₂** es el número de días desde que comenzó la etapa dos de evaporación.

La evaporación del suelo desnudo calculada, **E_{sb}**, en cualquier etapa es reducida con el incremento de los residuos de plantas, usando la ecuación:

$$E_s = E_{sb} e^{(-0,000064 Cr)}$$

Donde E_s = evaporación actual del suelo ($m.d^{-1}$), E_{sb} = evaporación del suelo desnudo ($m.d^{-1}$) y Cr = residuos de plantas sobre el suelo. En esta ecuación se ve que en la medida que el residuo aumente, se reduce la evaporación directa del suelo lo cual puede cambiar el contenido de agua del suelo.

“La transpiración potencial de las plantas ajustada es computada como una función lineal del índice de área foliar L y E_{tp} hasta un L de 3”.

$$E_{tp} = \frac{E_{tp} L}{3} \quad L \leq 3$$

Donde E_{tp} es la transpiración potencial de la planta diaria ajustada ($m.d^{-1}$). Con valores de L mayores a 3, la transpiración potencial de la planta no se ajusta por el índice de área foliar.

1.1.2 Distribución de la evapotranspiración en la zona radicular

Para la determinación de la evapotranspiración E_s en la zona radicular se tienen en cuenta la cobertura de nieve (que en nuestras condiciones no está presente), el contenido de agua dentro del suelo en la profundidad efectiva y además se considera la máxima profundidad de suelo influenciada por el proceso de evaporación dx . En el modelo WEPP la evapotranspiración se puede producir a partir de la capa de nieve o a partir de una combinación entre el agua contenida en la nieve y en el suelo. En Uruguay debido a las condiciones climáticas donde no se dan eventos de nevadas, toda el agua evapotranspirada proviene del suelo.

En el modelo WEPP para predecir la profundidad a partir de la cual se va a dar la evapotranspiración, ds , se utiliza la siguiente ecuación:

$$d_s = d_x \frac{E_s}{\Theta} - \Theta_r d_x \quad E_s \leq \Theta - (\Theta_r d_x)$$

$$d_s = d_x \quad E_s > \Theta - (\Theta_r d_x)$$

Donde **ds**, es la profundidad de suelo desde donde se evapora el agua para cualquier día dado (m), **dx**, es la máxima profundidad de suelo influenciada por el proceso de evaporación (m) (Lane y Stone, 1983). **Es**, es la predicción actual diaria de la evaporación del suelo (m), **Θ**, es el contenido de agua del suelo de las capas por encima de dx (m) y **Θr**, es el contenido de humedad residual, fracción por volumen (m³.m⁻³).

Dentro de la evapotranspiración si bien tenemos por un lado la evaporación directa desde el suelo, también dicha evapotranspiración se compone de la distribución de la transpiración del cultivo en la zona radicular, **Rz**, que en WEPP es calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$U_{Pi} = \frac{E_{tp}}{1 - e^{(-V)}} \left[1 - e^{\left[-V \frac{h_i}{RZ} \right]} \right] - \sum_{j=1}^{i-1} U_j$$

(Tomado de Savabi y Williams, 1995)

Donde **UPi** es la tasa de uso potencial de agua en la capa del suelo **i** (m.d⁻¹), la cual depende de la evapotranspiración y **V** es un parámetro de tasa de profundidad usado (3.065 es usado en WEPP, asumiendo cerca de 30 por ciento del uso total del agua proviene del 10 por ciento de la zona radicular), **hi** es profundidad de la capa del suelo **i** expresada en (m), **RZ** es la profundidad de la zona radicular (m), y **U** es el uso del agua real de la capa del suelo por encima de la capa **i** (m). Ese uso real del agua del suelo el modelo lo calcula mediante el empleo de la siguiente ecuación:

$$U_i = U_{pi} \qquad \Theta_i > \Theta_c \ U_i$$

$$U_i = U_{pi} \frac{\Theta_i}{\Theta_c \ U_i} \qquad \Theta_i \leq \Theta_c \ U_i$$

En estas ecuaciones Θ_i es el contenido de agua del suelo en la capa i (m), y Θ_c es el contenido de agua del suelo que es crítica debajo del cual las plantas crecen en estrés hídrico expresado en fracción por volumen ($m^3.m^{-3}$). Θ_c es un parámetro dependiente del cultivo indicado por el usuario. El valor por defecto usado por WEPP es 0,25. U_i es el límite superior de contenido de agua en el suelo para la capa i , (m). Mediante estas ecuaciones la planta en el caso que en la capa “ i ” el contenido de agua no sea suficiente para su crecimiento tiene la posibilidad de extraer agua de capas que se encuentren por debajo y en las cuales el contenido de agua sea adecuado. Con esto queda reflejado el movimiento del agua dentro del suelo y que puede ser aprovechada por las plantas.

1.1.3 Percolación

Para predecir la percolación WEPP usa técnicas de almacenamiento a través de cada capa del suelo dentro de la zona radicular. Además de la percolación, el modelo WEPP simula el flujo lateral sub-superficial y flujo de drenaje. Este componente de flujo sub-superficial va a depender de la diferenciación textural del suelo. En cada capa, el contenido de agua superior a la capacidad de campo correspondiente de cada capa pasa por percolación hacia la capa siguiente. En el caso del agua que se mueve por debajo de la zona radicular es considerado una pérdida y no es tomada en cuenta. Es fundamental para tener una estimación de la percolación, el cálculo de la conductividad hidráulica saturada que es determinada para cada capa basada en las propiedades físicas del suelo tales como la textura del suelo, materia orgánica y porosidad. El pasaje del agua a través de las capas del suelo puede

verse enlentecido por diferentes motivos como por ejemplo fragmentos gruesos presentes en las diferentes capas, capas congeladas y una capa inferior saturada o que está cerca de la saturación (Savabi y Williams, 1995).

La percolación de agua que se va moviendo hacia capas más profundas en la medida que se va superando la capacidad de campo de cada una se puede calcular empleando la siguiente ecuación:

$$pe_i = (\Theta_i - FC_i) \left[1 - e^{\left[\frac{-\Delta t}{t_i} \right]} \right] \quad \Theta_i > FC_i$$

$$pe_i = 0 \quad \Theta_i \leq FC_i$$

(Tomado de Savabi y Williams, 1995)

Donde pe_i es la tasa de percolación a través de la capa i (m.d-1), FC_i es el contenido de agua a capacidad de campo (a 33 Kpa de tensión para muchos suelos) para la capa i (m), Δt es el intervalo de viaje (s), y t_i es el tiempo de viaje (s).

El tiempo de pasaje del agua a través de una capa en consideración es dependiente de la capacidad de campo de cada capa y de la conductividad hidráulica de dicha capa y es calculado con la ecuación de almacenamiento lineal:

$$t_i = \frac{\Theta_i - F_{ci}}{K_{sai}}$$

Donde K_{sai} es la conductividad hidráulica ajustada para la capa i (m.s⁻¹). La conductividad hidráulica varía de la conductividad saturada, K_s , la cual tiene un valor cercano a cero cuando el contenido de agua de la capa está cerca de capacidad de campo. La K_{sai} es dependiente de otros parámetros que se ven en la ecuación que se muestra a continuación.

$$K_{sai} = K_{si} \left[\frac{\Theta_i}{UL_i} \right]^{Bi}$$

Donde K_{sai} es la conductividad hidráulica saturada para la capa i (m.s-1) y Bi es un parámetro que provoca que la K_{sai} se aproxime a cero cuando Θ_i se aproxima a FC_i . Dicho parámetro es calculado de la siguiente manera.

$$Bi = \frac{-2,7}{\log \frac{FC_i}{UL_i}}$$

La constante -2,655 en la ecuación anterior asegura una K_{sai} de $0,002 * K_{si}$ a capacidad de campo.

Como se mencionó anteriormente el flujo a través de la capa del suelo podría ser restringido por una capa inferior que está en o cerca de la saturación. El efecto del contenido de agua de la capa inferior es calculado en la ecuación siguiente:

$$pe_i = pe_i \sqrt{1 - \frac{\Theta_{i+1}}{UL_{i+1}}}$$

(Tomado de Savabi y Williams, 1995)

Donde pe_i es la tasa de percolación ajustada por el contenido de agua ($i+1$) de la capa inferior (m.d⁻¹).

1.1.4 Flujo subsuperficial

Dentro del balance hídrico en WEPP se tiene en cuenta el flujo superficial que según Horton (1933) predomina cuando la intensidad de la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo y ha sido

considerado en su momento como la única fuente de generación de escorrentía en la mayoría de los modelos hidrológicos.

Sin embargo, sobre laderas con una superficie de alta conductividad hidráulica y con un horizonte argilúvico muy desarrollado como es el caso de Uruguay, según Hursh (1936), el flujo sub-superficial puede ser una parte dominante en el escurrimiento. Dunne en 1978 expresó que este flujo ha sido reportado para una amplia variedad de regiones. Estudios de campo de flujo sub-superficial han mostrado que una elevada anisotropía en sentido vertical en el suelo causa que el flujo sub-superficial sea una parte importante del escurrimiento de una ladera y en este sentido Luce (1995) menciona que incluso en bosques naturales el flujo lateral sub-superficial es predominante. Covert et al. (2005), en una aplicación de WEPP para simular la escorrentía y la erosión en las cuencas forestales perturbadas, hizo hincapié en que es necesario representar adecuadamente los procesos de flujo lateral sub-superficial en WEPP. Por consiguiente Sloan y Moore (1984) evaluaron cinco modelos de flujo sub-superficial de base física y luego de una extensa revisión de métodos para simular el flujo lateral sub-superficial, el método de almacenamiento y descarga cinemático desarrollado por Sloan y Moore (1984) ha sido seleccionado para ser usado en el modelo WEPP. El modelo de Sloan y Moore (1984) de flujo lateral sub-superficial usa la ecuación de continuidad de masa con la totalidad de la ladera como volumen de control. En WEPP se asume un segmento de laderas idealizado de longitud L , pendiente de ángulo α y una capa impermeable a una profundidad D (Figura 1).

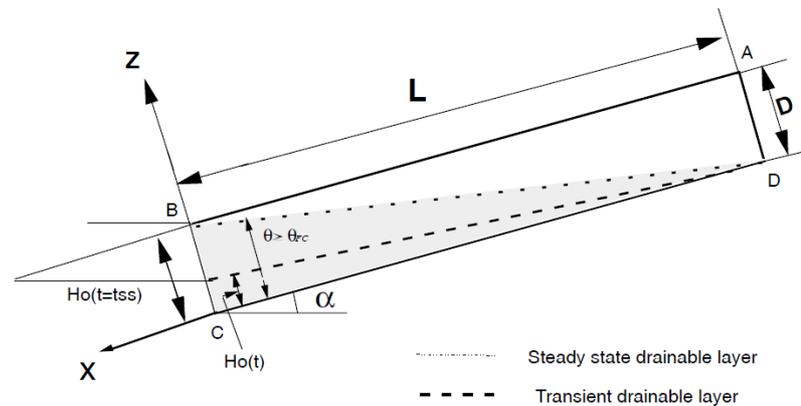


Figura 1. Representación esquemática del modelo de almacenamiento cinemático (tomado de Sloan y Moore, 1984 citados por Savabi et al. 1995).

“En WEPP, asumimos que la capa de suelo con agua en exceso de capacidad de campo, Θ_{FC} (agua retenida a 33 KPa de tensión para la mayoría de los suelos), está sujeta a percolación hacia capas inferiores y a flujo lateral sub-superficial” (Savabi et al. 1995). La ecuación de continuidad de masa que representa el movimiento de agua en forma de diferencias finitas se puede escribir como:

$$\frac{S_2 - S_1}{d_2 - d_1} = P_e - (D + ET) L - \frac{q_1 + q_2}{2}$$

Donde **S** es la profundidad de agua drenable (m), **d** es el día de la simulación, **Pe** es el agua percolada a la capa donde se da el drenaje ($m \cdot d^{-1}$), **D** es la infiltración de la capa donde se da el drenaje ($m \cdot d^{-1}$), **ET** es la evapotranspiración real de la capa arable ($m \cdot d^{-1}$), **L** es la longitud (m) y **q** es la descarga de la ladera por unidad de ancho (m) (Sloan et al., 1983). Dado que el balance hídrico de WEPP simula en forma diaria P_e , D y ET , los cálculos del flujo lateral sub-superficial se hacen con una base diaria. El volumen de agua que es drenado se calcula como:

$$S = H_0 \theta_d L/2$$

Donde, H_0 es la profundidad de la capa donde se da el drenaje que es normal a la pendiente (m), y θ_d es el agua de drenaje y es calculada como:

$$\theta_d = \theta - (\theta_{FC} - \theta_a)$$

Donde θ_d es el contenido de humedad del suelo ($m \cdot m^{-3}$), θ_{FC} es el contenido de agua del suelo a capacidad de campo ($m \cdot m^{-3}$), θ_a es el aire atrapado ($m \cdot m^{-3}$).

Flujo lateral sub-superficial de la ladera de 1 metro de ancho es calculado usando la ecuación:

$$q = 86400 H_0 K_{e(\theta)} \sin(\alpha)$$

Donde q es el flujo lateral sub-superficial ($m \cdot d^{-1}$), K_e es la conductividad hidráulica horizontal ($m \cdot s^{-1}$) al contenido de humedad θ , y α es el ángulo de la pendiente promedio.

El espesor drenable, H_0 (m) para un día dado es calculado por (Sloan y Moore, 1984)

$$H_0(d) = H_0(d-1)(L \theta - 86400 K_{e(\theta)} \sin(\alpha) + 2 L(P_e - (D + ET)))$$

La capa donde se da el drenaje recibe agua de la capa superior a través de la percolación. El agua en la capa donde se da el drenaje está sujeta a percolación a capas inferiores y a movimiento lateral. En la ladera con diferentes elementos de flujo superficial (OFEs) la rutina de flujo sub-superficial simula el flujo de agua de cada OFE hacia abajo en la pendiente pasando de un OFE a otro.

1.2 Implementación del modelo

Las cuatro bases de datos que según Nicks et al. (1995) utiliza el modelo WEPP en la estimación de los principales parámetros son una limitante para su aplicación bajo condiciones de pastizales naturales de nuestro país y la región donde no se encuentra solamente creciendo una especie vegetal sino que se trata de una comunidad de especies creciendo en el mismo tiempo y espacio. Los parámetros del modelo para infiltración, escurrimiento y producción de sedimentos son inicialmente estimados a partir de una condición de suelo desnudo y posteriormente son ajustados en función de la cobertura vegetal y de las características superficiales del suelo. Si bien las condiciones de referencia pueden ser apropiadas para las condiciones relativamente homogéneas de los cultivos, donde los suelos son frecuentemente roturados con implementos mecánicos (Chartier & Rostagno, 2010), éstas no representan adecuadamente las condiciones de pastizales naturales donde ya desde un principio tenemos vegetación creciendo sobre el suelo. Este aspecto puede ser un desafío para el funcionamiento correcto del modelo en condiciones de pasturas naturales en Uruguay. En las condiciones de un bosque artificial, si bien el modelo tiene bases de datos para situaciones de forestación, las propiedades de los suelos en Uruguay donde se instalan estos bosques pueden ser diferentes con respecto a las características de los suelos cargados en WEPP.

1.2.1 Base de datos topografía

El archivo de entrada por topografía se basa en la orientación de la pendiente, longitud y grado de inclinación en diferentes sitios del perfil. El usuario puede simular diferencias en tipos de suelo o manejo a lo largo de la longitud de una ladera mediante el uso de elementos de flujo superficial (EFO). Estos están definidos como una sección especificada de la ladera con una región de suelo y manejo homogéneos (Flanagan y Livingston, 1995), y son

las unidades básicas que se tienen en cuenta para modelación de los procesos hidrológicos superficiales, de erosión y de crecimiento vegetal (Romero y Stroosnijder, 2002).

1.2.2 Base de datos de clima

WEPP acepta dos diferentes tipos de archivos de clima: el formato estándar CLIGEN (Climate Generator) (Nicks et al. 1995) y el generador BPCDG (Breakpoint Climate Data Generator para WEPP usando conjuntos observados estándar de datos climáticos) puede ser la única opción cuando no existen datos climáticos históricos.

El CLIGEN se desarrolló inicialmente para aplicarse en los EE.UU. Este archivo requiere datos atmosféricos estadísticos mensuales de largo alcance, para generar una secuencia diaria de datos meteorológicos simulados por los años que se desee; incluyendo medias, desviaciones estándar y coeficientes de asimetría de la precipitación, probabilidades de un día húmedo seguido de un día húmedo, y de un día húmedo seguido de una día seco; temperaturas medias, máximas y mínimas del aire, radiación solar y dirección y velocidad del viento (Zeleeke y Flanagan, 1999; Zeleeke, 2001; Larose et al., 2004). Esto produce la información necesaria para el modelo de erosión del suelo así como otra información para estimar el estatus del suelo, biomasa y agua. WEPP puede usar los datos históricos o puntuales de precipitación. El número y distribución de eventos de precipitación son generados usando el modelo de Markov al cual hay que indicarle las condiciones iniciales del día anterior (húmedo o seco), y el modelo determina estocásticamente si la precipitación ocurre en el día actual (Flanagan et al., 1995).

El BPCDG es un programa independiente, que ayuda a crear puntos de ruptura de datos climáticos para WEPP a partir de aforos estándar de lluvia y de conjuntos de datos climáticos provenientes de cualquier estación

meteorológica (Zeleeke y Flanagan, 1999) de la zona de estudio. Este programa es muy usado en los EE.UU. En el caso de este trabajo de tesis se utilizó ésta opción para la generación del archivo de clima donde se usaron datos climáticos desde el año 2003 al 2009 conteniendo datos de radiación, temperatura, punto de rocío, velocidad y dirección del viento, humedad relativa así como también datos de precipitación para el Departamento de Tacuarembó.

1.2.3 Base de datos de suelo

El archivo de suelo requiere información de las características físicas de la superficie del suelo como por ejemplo conductividad hidráulica y de cada una de las capas subsuperficiales. Los datos requeridos para las capas subsuperficiales son: arena, arcilla, materia orgánica, contenido de fragmentos rocosos y capacidad de intercambio catiónico. Requiere además información sobre el albedo, el nivel inicial de saturación de agua, el porcentaje de porosidad llenada por agua; parámetros de erosión tales como de erosión entre canales causado por el impacto de las gotas de lluvia, erosión en canales y pequeños canales, esfuerzo crítico cortante y la conductividad hidráulica efectiva (Flanagan y Livingston, 1995).

1.2.4 Base de datos de manejo

El archivo de manejo es el más complejo y se basa en información acerca de parámetros de plantas y sus características, prácticas de cultivo, manejo de plantas y residuos, drenaje sub-superficial y rotación de cultivos donde además cada práctica de manejo se ordena de manera cronológica (Flanagan y Livingston, 1995; Romero y Stroosnijder, 2002).

En la cuenca en estudio en el Acrisol de Tacuarembó la vegetación que se encuentra sobre el suelo es campo natural el cual constituye la base alimenticia de la ganadería de la zona. En estos suelos el tapiz vegetal del

campo natural es muy denso, con pocas leguminosas espontáneas y marcado predominio de especies estivales que concentran según Bemhaja (2001) el 80% de la producción forrajera en los meses de primavera-verano, produciendo alrededor de 5 toneladas de materia seca lo que explica la vocación criadora de la región. La vegetación natural está predominantemente formada por gramíneas perennes estivales donde hay muy baja proporción de invernales y de leguminosas nativas (Castro, 1979).

1.3 Validación de modelos

Los modelos para poder ser utilizados en una determinada región, deben ser puestos a prueba a través de un proceso de validación que según Barrales et al. (2004) la validación es una etapa muy importante en la modelación de sistemas pero tiene dificultades desde el punto de vista conceptual y práctico. Dentro de este proceso una parte importante es la validación empírica, que para Reynolds (1984), Mitchell (1997) y Legates (1999) se realiza para poder hacer comparaciones de las predicciones del modelo con respecto a las observaciones a campo. Schlesinger et al (1979) citado por Sargent (1999), dicen que la validación es la comprobación de que un modelo computarizado posee un rango satisfactorio de exactitud consistente con la aplicación prevista del modelo y que de esa manera puede representar bien la realidad.

“Para Aguilar (1997) y Rauscher et al. (2000) estas comparaciones, se tienen que efectuar usando métodos estadísticos adecuados, con un nivel de confianza aceptable, de tal modo que las inferencias sean correctas”. Además Sargent (1999) sostiene que un modelo debe ser desarrollado con un propósito específico y su validación debe ser determinada teniendo en cuenta ese propósito.

Un modelo es considerado válido para un conjunto de condiciones experimentales si es preciso dentro de determinados rangos considerados como aceptables (Sargent, 1999).

Mitchell (1997) agregó que para efectuar validación, los modeladores utilizan procedimientos simples, incluyendo gráficos de dispersión de predicciones y observaciones, algunas veces con regresión, la cual es pensada como método objetivo y cuantitativo para medir cuán bueno es un modelo.

Reckhow et al. (1990), Flavelle (1992) y Mayer et al. (1994) se pusieron de acuerdo en que es necesario tener un método que sea objetivo y cuantitativo para poder validar los modelos. En ese sentido propusieron la regresión como técnica de validación pero junto con Harrison (1990) reconocieron los problemas de la regresión cuando se quería satisfacer los supuestos cuando ésta era empleada para la validación.

“Prodan et al. (1997) proponen que no se recomienda la realización de inferencia estadística al realizar una validación debido a que las pruebas adecuadas son paramétricas, requiriendo supuestos que generalmente no se cumplen en los datos bajo análisis. Una aseveración similar llevó a Harrison (1990) a sugerir que los métodos estadísticos para estudios de validación se confinen al uso de instrumentos descriptivos (y no inferenciales) combinados con comparaciones gráficas, y que la calificación del modelo en cuanto a su validez sea efectuada por especialistas”.

Mitchell (1997) propuso un método que se basa en graficar las desviaciones (predicción menos observación) y que no requiere de los tradicionales supuestos de los métodos estadísticos.

La calidad de la predicción se determinó mediante el cálculo de un coeficiente de eficiencia de ajuste del modelo (Nash & Sutcliffe, 1970):

$$E = 1 - \frac{\sum(Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum(Q_i - \bar{Q})^2}$$

Donde **E** es la eficiencia del modelo, **Q_i** representa el valor observado del evento *i*, **Q_{sim,i}** es el valor simulado del evento *i* y **Q̄** es la media de los valores observados. Este coeficiente puede variar entre menos infinito a uno. Una eficiencia de 1 ($E = 1$) corresponde a un ajuste perfecto entre los valores observados y estimados. Una eficiencia de 0 ($E = 0$) indica que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos observados, mientras que una eficiencia negativa indica que la media observada es mejor que la predicción obtenida a partir del modelo.

“WEPP ha sido validado en una gran variedad de países que incluyen a 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), además 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 recién está comenzando (Jorge et al., 2010) y están realizándose varias tesis de maestría en torno a su validación y aplicación a nuestras condiciones” (Jorge et al. 2010). El mayor obstáculo en estos casos es el desarrollo de una base de datos climática adecuada para lo cual se han desarrollado métodos para el desarrollo de estos archivos a partir de registros existentes de clima. Los parámetros de plantas probablemente deben ser modificados para representar mejor el crecimiento en nuestras condiciones así como también las prácticas de manejo y los archivos de suelos deben ser generados donde probablemente se deben hacer ajustes. WEPP contiene una representación gráfica que ayuda mucho en la evaluación de los parámetros de plantas

chequeando mejor el comportamiento en cuanto a la curva de crecimiento, manejo y en las operaciones.

1.4 Análisis de sensibilidad

Brazier et al., (2000) advierten la necesidad de ser precavido a la hora de transferir modelos a sitios en los que no hayan sido calibrados, para predecir escenarios de escurrimiento y erosión, ya que este es un sitio donde se cuenta con poca información y por lo tanto con mayor incertidumbre. De hecho, varios estudios indican que, en ciertos lugares, WEPP no hace una buena estimación del escurrimiento y erosión cuando utiliza sus ecuaciones para determinar 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; 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, el cual según Saltelli et al., (2004) citados por Ascough II et al., (2012) “es una técnica usada para evaluar cómo la incertidumbre en la salida del modelo se puede influir a través de diferentes fuentes de incertidumbre en las entradas del modelo”. Uno de los parámetros más sensibles citados en la literatura identificado son los valores base para la conductividad hidráulica efectiva (K_b) ya que a través de ella se modifica la cantidad de agua que puede entrar al suelo así como también el movimiento del agua dentro del suelo (Nearing et al., 1990; Tiscareno-López et al., 1993; Pandey et al., 2009; Shen et al., 2009).

A nivel internacional son escasos los trabajos donde se realiza la validación del componente balance hídrico del modelo WEPP en manejos de pasturas naturales y de forestación. Por esta razón en este trabajo de tesis se tiene como objetivo ajustar y validar el componente balance hídrico del modelo

WEPP en una ladera bajo campo natural y una ladera forestada con *Pinus taeda* partiendo de las hipótesis que el modelo WEPP hace una buena simulación del contenido de agua del suelo en ambas situaciones de manejo en Uruguay.

Dentro del trabajo de tesis se incluyen dos artículos a ser publicados en la revista Agrocienza Uruguay.

2 EVALUACIÓN DEL MODELO WEPP PARA PREDECIR EL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO EN FORESTACIÓN CON PINOS EN EL NORESTE DE URUGUAY

Blanco, N¹ 2*. Pérez Bidegain, M¹. Bentancur, O³.

¹ *Departamento de Suelos y Aguas. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Av. Garzón 780*

² *Departamento del Agua. Universidad de la República, Cenur Noroeste. Rivera 1350.*

³ *Departamento de Estadística. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Av. Garzón 780.*

cnicoblanco@gmail.com

2.1 RESUMEN

El aumento del área forestada produjo un cambio en el uso de la tierra planteando en distintos ámbitos inquietudes e incertidumbres relacionadas con los impactos ambientales. . El objetivo de este trabajo fue validar el componente balance hídrico del modelo WEPP en condiciones de uso forestal con pinos en Uruguay. Para ello se utilizaron datos de agua en el suelo medidos con sonda de neutrones cuatro veces en el año hasta 1,3 m de profundidad durante diez años sobre una catena de suelos en la cuenca forestada. Lo simulado por WEPP se lo comparó con los datos medidos. Los resultados indican que para los tres perfiles en consideración el modelo WEPP tuvo un comportamiento considerado como insuficiente ($E = -0,01, -1,74$ y $-0,08$ para los perfiles C (ladera alta), D (ladera media) y F (ladera baja), respectivamente). La recta de regresión fue diferente de la línea 1:1 solo para el perfil D. Se eliminaron puntos fuera de la recta de calibración por generar errores en la determinación del contenido de agua en el suelo. Luego de remover estos datos medidos, el coeficiente de eficiencia (Nash Sutcliffe) fue de 0.6 en el perfil C y la línea de regresión no fue diferente de la 1:1. . Los resultados indican que se deben ajustar parámetros como la evapotranspiración del modelo WEPP para lograr una mejor performance.

Palabras clave: Balance hídrico, *Pinus taeda*, validación.

2.2 SUMMARY

The increase in forest area was a change in land use in raising different concerns and uncertainties related to the environmental impacts. One of the most important concerns is related to soil hydrological changes. Those changes could affect soil water dynamics, and its effects on water surface runoff and soil erosion. It is necessary to have models to evaluate these impacts. The objective of this work was to validate the soil water balance component of WEPP under pines afforestation in Uruguay. We used soil water data measured with neutron probe four times a year up to 1.3 m depth for a 10 years-period on a catena in a forested watershed. WEPP model estimates were compared to the measured data. The results indicate that for the three soil profiles the WEPP model performance was insufficient ($E = -0,01$ -1,74 y -0,08 for soil profiles C (summit), D (shoulder) y F (footslope), respectively). The regression line was different than the 1:1 line only on soil profile D. To eliminate errors on measured soil water content, we eliminated the data outside the calibration range. After this, the coefficient of efficiency (Nash Sutcliffe) was 0.6 for soil profile C, and the regression line was not different from the 1:1 line. The results indicate that it is necessary to adjust evapotranspiration parameters to improve the WEPP model performance.

Keywords: water balance, *Pinus taeda*, validation.

2.3 INTRODUCCIÓN

El territorio uruguayo en su totalidad está dentro de la región de los pastizales del Río de la Plata (León et al., 1992) los cuales según Piñeiro (2011) han sido pastoreados por herbívoros domésticos por más de 400 años. Sin embargo en los últimos años el uso tradicional del suelo ha ido modificándose en Uruguay, debido al desarrollo de otros rubros agropecuarios como es el caso del sector forestal, el cual ha sido impulsado a través de leyes específicas (Ley Forestal N° 15.939 de Diciembre de 1987) (Barreto, 2008).

Desde el año 1990 y durante los siguientes 19 años, la superficie de bosques plantados con especies de rápido desarrollo, principalmente eucaliptos y pino, paso de 45.000 hectáreas a aproximadamente 1.000.000. Por otra parte, debido a que los suelos de prioridad forestal tienen una extensión de 3,6 millones de hectáreas y que la industria forestal está en pleno desarrollo instalando nuevas plantas con aumento de la demanda de materia prima para la producción de pasta de celulosa y madera, se espera un mayor crecimiento de la superficie (Silveira et al., 2010). De acuerdo a datos relevados por el MGAP (2003) la mayoría del área forestada corresponde al género *Eucalyptus* (69 %) y *Pinus* (27 %). Dentro del género *Pinus*, la especie de uso más difundido en Uruguay es *Pinus taeda*, ubicándose actualmente en los Departamentos de Tacuarembó, Rivera y Paysandú.

El aumento del área destinada a plantaciones forestales supone un cambio en el uso de la tierra que plantea en distintos ámbitos (instituciones del Estado, sectores privados, y organizaciones de la sociedad civil) inquietudes e incertidumbres relacionadas con los impactos ambientales de estas plantaciones (Silveira et al., 2003; Chescheir et al., 2006) ya que generan transformaciones en algunas propiedades del suelo que pueden favorecer los procesos erosivos, vinculados al aumento del escurrimiento superficial del agua (Edeso et al., 1997) pudiendo generar problemas en la calidad de los recursos hídricos. Ante esta situación es fundamental contar con herramientas que nos permitan estimar la erosión del suelo teniendo en consideración el balance hídrico del suelo para de esta manera prever la cantidad de agua que fluye sobre y debajo de la superficie del suelo considerando la capacidad de almacenamiento de agua del suelo. En este sentido el modelo WEPP es una de las herramientas más usadas para poder simular la erosión y la producción de sedimentos, siendo necesaria su validación para las condiciones productivas de Uruguay.

El objetivo de este artículo es validar el componente balance hídrico del modelo WEPP para situaciones de forestación en Uruguay.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo en una cuenca forestada con *Pinus taeda* ubicada en el establecimiento forestal “La Corona”, Departamento de Tacuarembó, Uruguay (31°38'09"S, 55°41'48"W). La topografía de la cuenca se caracteriza por un paisaje ondulado con colinas rocosas que sobresalen de basalto y arenisca. El material generador de los suelos son areniscas sedimentario eólicas y silicificadas de las Unidades Rivera y Tacuarembó, (Sacco y Falco, 1975; Durán, 1995; Falco, 1996; Pérez Gomar, 1999). De acuerdo a datos analíticos el suelo se trata de un Acrisol Ocrico Típico (Typic Hapludult según la clasificación del Soil Taxonomy (USDA)) que presenta variaciones en cuanto a la secuencia de horizontes en su perfil. Debido a estas diferencias, se tomaron tres puntos de monitoreo que corresponden a tres posiciones topográficas, ladera alta: perfil C, ladera media: perfil D y ladera baja: perfil F.

Sobre el Acrisol de la cuenca en estudio se implantó un bosque de *Pinus taeda*. En el caso de este sitio la técnica empleada para la implantación del bosque fue laborear 1/3 del área a ser forestada usando un marco de plantación de 4 por 2,5m y una densidad de 1000 árboles. A su vez en la base de datos de manejo se cargaron datos del campo natural alternando con los datos del manejo forestal para lograr simular la situación de fila y entre fila que se genera en realidad en el bosque.

2.4.2 Mediciones

La información meteorológica diaria (temperatura del aire, humedad relativa, precipitaciones, dirección y velocidad de viento y radiación solar) se

obtuvo mediante un sistema automático de medición (Campbell Scientific CR 10X, Logan, UT, USA) en una estación meteorológica próxima al rodal.

El contenido de agua en el suelo fue monitoreado mediante termalización de neutrones en tres posiciones topográficas (alto, medio y bajo) hasta una profundidad de 1,3 m, en intervalos de 0-15, 15-30, 30-50, 50-70, 70-90, 90-110-130 cm. En cada una de las posiciones topográficas se instalaron tres tubos de acceso en la fila y entrefila de plantación, respectivamente. Las medidas fueron realizadas cuatro veces al año durante el período 2003-2009

La calibración de la sonda se realizó tomando muestras en un amplio rango de condiciones de humedad, registrando las lecturas de las relaciones de cuentas a profundidades determinadas. Al finalizar, se tomaron muestras de suelo no disturbadas a las mismas profundidades y se determinó la humedad volumétrica. Posteriormente se relacionó el número de cuentas leído en la sonda (número de neutrones retrodispersados en el suelo), normalizados a un valor de referencia (número de neutrones retrodispersados dentro del blindaje) con el contenido de humedad del suelo para lo cual se ajustó una recta de regresión para diferentes capas de los tres perfiles en consideración que se pueden ver en las figuras 2, 3 y 4.

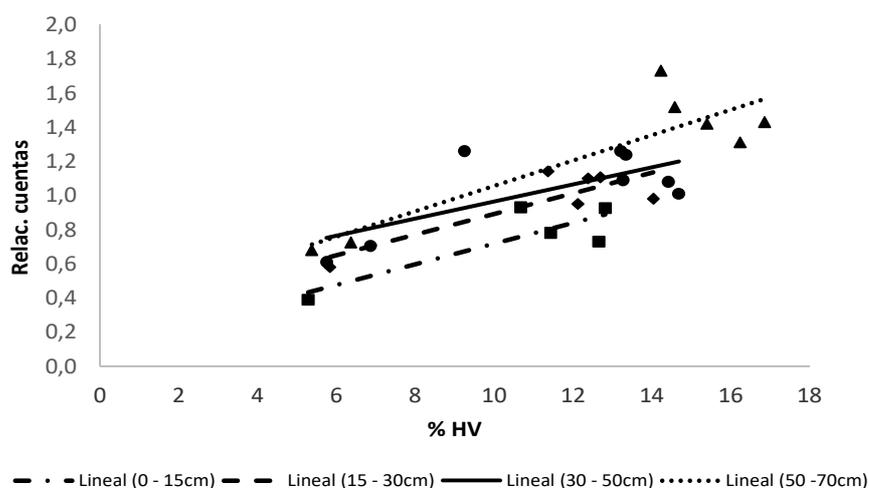


Figura 2. Curvas de calibración para las 4 primeras capas del perfil C.

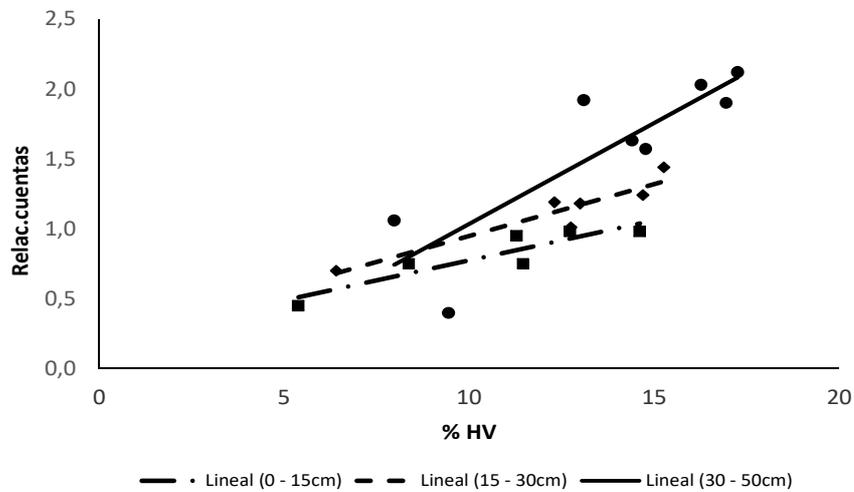


Figura 3. Curvas de calibración para las 3 primeras capas del perfil D.

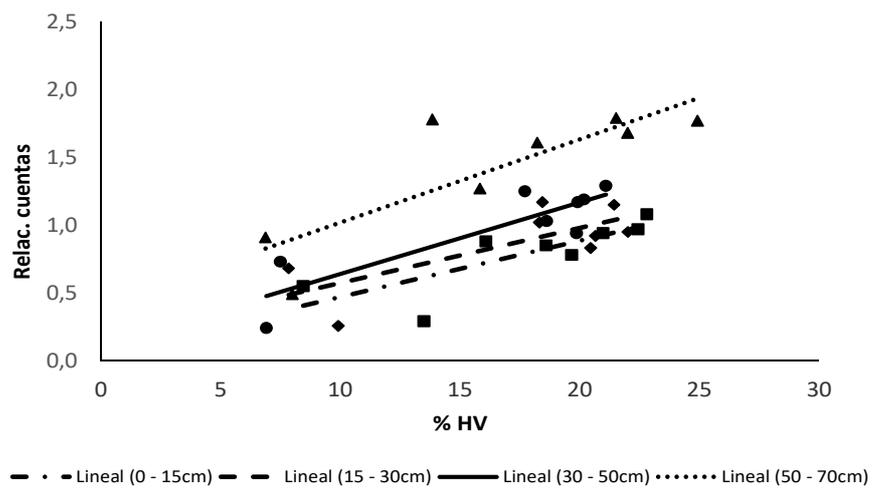


Figura 4. Curvas de calibración para las 4 primeras capas del perfil F.

2.4.3 Entradas de WEPP

El modelo de ladera WEPP versión 2012.800 fue utilizada en este estudio. Este modelo requiere cuatro bases de datos: clima, topografía, suelo y manejo de cultivos (Nicks et al., 1995).

2.4.3.1 Base de datos de Clima

Para la generación del archivo de clima en WEPP se usó el generador de clima BPCDG (Breakpoint data) utilizando como insumo los datos climáticos desde el año 2003 al 2009 conteniendo datos de radiación, temperatura, punto de rocío, velocidad y dirección del viento, humedad relativa así como también datos de precipitación para el Departamento de Tacuarembó.

2.4.3.2 Base de datos de Topografía

Para la generación de la base de datos de topografía se dividió a la ladera en partes iguales a las cuales se le asignó un porcentaje de pendiente que varía dentro de un rango para cada perfil de acuerdo a lo observado en campo. En el cuadro siguiente se incluyen los rangos del grado de pendiente que se tuvieron en consideración de acuerdo al perfil de que se trate.

Cuadro 1. Rango de pendiente de los tres perfiles.

Perfil	Pendiente general (%)
C	12-15%
D	6-12%
F	< 5%

2.4.3.3 Base de datos de Suelo

Las características de los perfiles que ocupan diferentes posiciones topográficas en la ladera se pueden ver en los siguientes cuadros.

Cuadro 2. Descripción del perfil C (ladera alta)

Propiedades	Horizontes			
	A _{u1}	A _{u2}	B _t	C
Espesor (cm)	0-78	78-99	99-133	133 a +
Color	5YR3/4	s/d	2,5YR4/8	s/d
Arena	83,2	80,1	61,2	s/d
Limo	8,9	9,5	10,5	s/d
Arcilla	7,9	10,4	28,3	s/d
Estructura	Bloques sub-angulares finos		Granular	Bloques angulares

Cuadro 3. Descripción del perfil D (ladera media)

Propiedades	Horizontes			
	A	B _{t1}	B _{t2}	C
Espesor (cm)	0-48	48-80	80-114	114 a +
Color	7,5YR3/2	s/d	10YR5/4	s/d
Arena	71,7	54,1	63,3	67
Limo	12,8	11,8	11,1	10,6
Arcilla	15,5	34,1	25,6	22,4
Estructura	Bloques sub angulares	Bloques angulares medios débiles	Bloques angulares medios moderados	Bloques angulares medios y moderados

Cuadro 4. Descripción del perfil F (ladera baja)

Propiedades	Horizontes			
	A	E	B _t	C
Espesor (cm)	0-38	38-72	72-104	104 a +
Color	10YR3/2	s/d	7,5YR6/6	s/d
Arena	74,2	75,9	63,1	s/d
Limo	13,1	12,8	12,3	s/d
Arcilla	12,7	11,3	24,6	s/d
Estructura	Bloques sub angulares medios, débiles	Bloques sub angulares finos, muy débiles	s/d	s/d

En la base de datos de suelos se realizó una división entre los perfiles de suelos donde se implantó *Pinus taeda* y aquellos que se encuentran en la entrefila con campo natural. El hecho de haber laboreado solamente la porción de suelo donde se iban a implantar *Pinus taeda* provocó que se produjera la pérdida de una parte del horizonte A. Para poder simular esta pérdida de suelo se eliminaron 20 cm del horizonte A de los tres perfiles en la fila de *Pinus*

taeda. Esta división en la base de datos lleva a que se tengan dos elementos de flujo superficial (OFE).

2.4.3.4 Base de datos de Manejo

Se emplearon los valores predeterminados por WEPP en la base de datos “Forest Perennial”. La excepción fueron la eficiencia de uso de la radiación (BER), temperaturas cardinales para *Pinus taeda*, profundidad de arraigamiento, IAF e índice de cosecha (HI). En el caso de la profundidad de arraigamiento se utilizaron variaciones de acuerdo al perfil en consideración, llegando hasta la parte superior del horizonte argilúvico. El cuadro 5 presenta los valores de los parámetros que se modificaron en la base de datos de manejo mencionados anteriormente.

Cuadro 5. Parámetros utilizados en WEPP.

Parámetro	
BER	20 Kg/MJ
IAF	1,58**
T max	38 °C***
T óptima	20 °C***
T base	13 °C***
T crítica	- 20 °C***
Profundidad de arraigamiento	0,78-0,5-0,72 m*

*Profundidades de arraigamiento para los perfiles C, D y F respectivamente.

**Gándara, 2013.

***Manual de viveros para la producción de especies forestales en contenedor.

Los datos de estos parámetros fueron obtenidos a partir de investigaciones realizadas para condiciones regionales lo cual permite lograr que el modelo realice una simulación de crecimiento de *Pinus taeda* similar a la observada en la realidad.

2.5 VALIDACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

Se empleó el coeficiente de eficiencia (Nash y Sutcliffe, 1970) mediante el cual se comparan los datos observados con los simulados por el modelo mediante el empleo de la siguiente fórmula.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Donde E es la eficiencia del modelo, Q_i representa el valor observado del evento i, $Q_{sim,i}$ es el valor simulado del evento i y \bar{Q} es la media de los valores observados.

Por otro lado se tomó también a la regresión lineal entre datos simulados y observados para validar el modelo mediante la consideración del intercepto y la pendiente de la recta de regresión haciendo la evaluación además si la recta de regresión de la simulación se alejaba o no significativamente de la recta de ajuste perfecto tomando un nivel de significación de 0,05.

Además se tuvo en consideración el coeficiente de determinación (CD) propuesto por Tedeschi (2006) el cual se calcula tomando en consideración la siguiente ecuación:

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (f(X_1, \dots, X_p)_i - \bar{Y})^2}$$

Donde CD es el coeficiente de determinación, Y_i es el i ésimo valor observado, \bar{Y} es el promedio de los datos observados y $f(X_1, \dots, X_p)$ son los valores estimados por el modelo.

A través del coeficiente de determinación (CD) se mide la proporción de la varianza total de los valores observados explicada por los datos predichos. Es decir que se mide la dispersión de los datos simulados con respecto a la media de los datos observados por lo que en la medida que esta diferencia sea mayor, el CD va a tener valores más cercanos a cero.

2.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las figuras 5, 6 y 7 muestran la evolución del contenido de agua medido y simulado por WEPP en la zona radicular para los perfiles considerados en tres posiciones topográficas diferentes (perfil C ladera alta, perfil D ladera media y perfil F ladera baja) en una misma ladera desde el año 2003 hasta el 2009.

Dentro del balance de agua del suelo hay dos factores que tienen influencia, estas son la evapotranspiración potencial y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo. Estos últimos componentes determinan que las plantas tengan mayor o menor cantidad de agua para su crecimiento. En la zona de estudio se realizó la validación para la fila hasta donde comenzaba el horizonte argilúvico para cada uno de los perfiles.

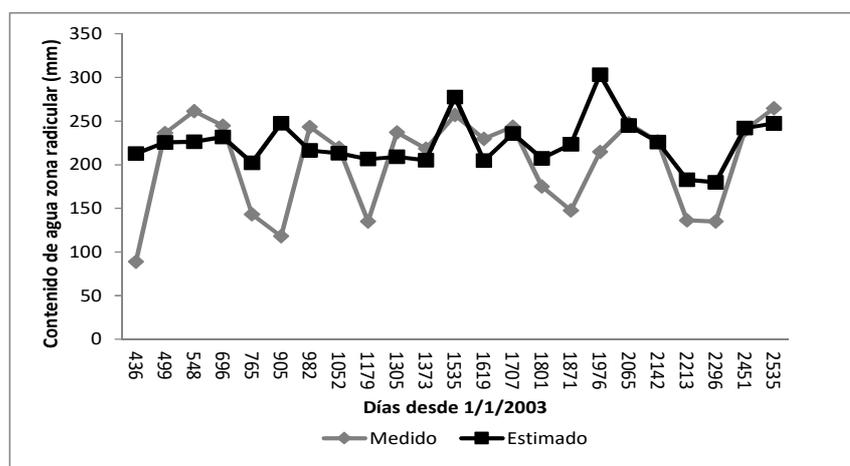


Figura 5. Comparación de datos del contenido de agua en la zona radicular medidos y simulados por WEPP para tres repeticiones en promedio del perfil C.

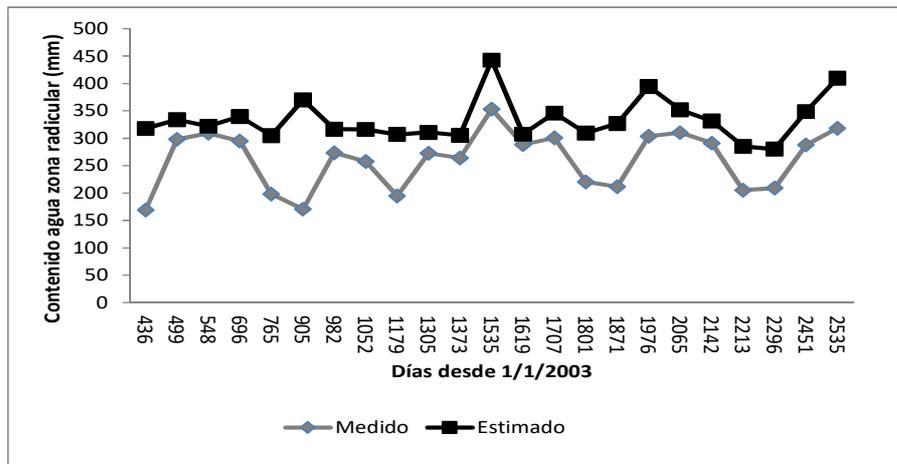


Figura 6. Comparación de datos del contenido de agua en la zona radicular medidos y simulados por WEPP para tres repeticiones en promedio del perfil D.

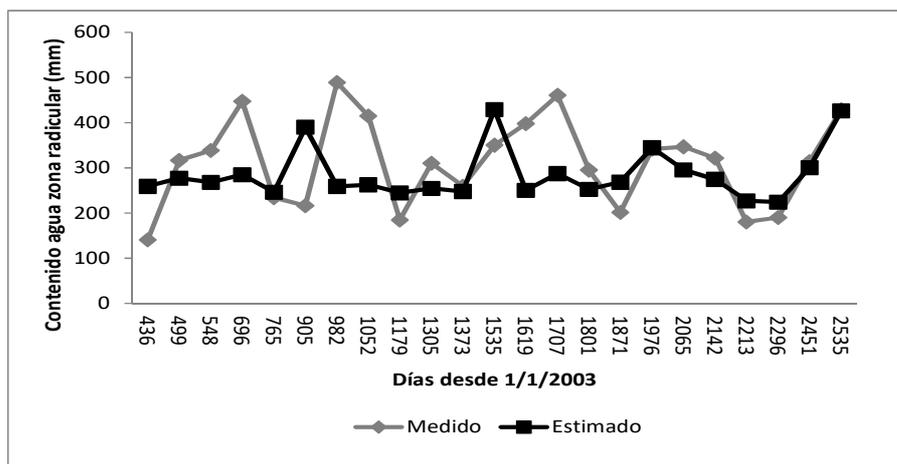


Figura 7. Comparación de datos del contenido de agua en la zona radicular medidos y simulados por WEPP para tres repeticiones en promedio del perfil F.

A pesar de haber utilizado parámetros sugeridos por la bibliografía y que se muestran en el cuadro 5 los cuales han permitido una correcta simulación de la producción de biomasa, en los perfiles C y F se han dado situaciones de sobre y subestimación por parte del modelo. En el perfil D se genera una situación de sobreestimación del agua del suelo por parte del modelo en todo el período de evaluación. Si bien el modelo en general ha copiado la tendencia de la evolución del agua del suelo, en algunos momentos puntuales de la evaluación se ha generado un mayor desfase entre el

contenido de agua simulado por el modelo y lo medido en el campo. De hecho en el día 905 del período de evaluación, el modelo tuvo un aumento del contenido de agua del suelo mientras que en el suelo se registraba una disminución, mostrando por lo tanto comportamiento opuesto para los tres perfiles. De acuerdo al resultado del análisis estadístico que se muestra en el cuadro 6, en ninguno de los tres perfiles se logra un coeficiente de Eficiencia de Nash Sutcliffe considerado como aceptable (Nash y Sutcliffe, 1970) ya que los valores obtenidos son negativos.

Cuadro 6. Indicadores estadísticos

Suelo	E	CD	b0	b1	p-val
C	-0,01	2,24	18,65	0,82	0,14
D	-1,74	0,38	7,23	0,76	< 0,001
F	-0,08	2,43	170,37	0,5	0,21

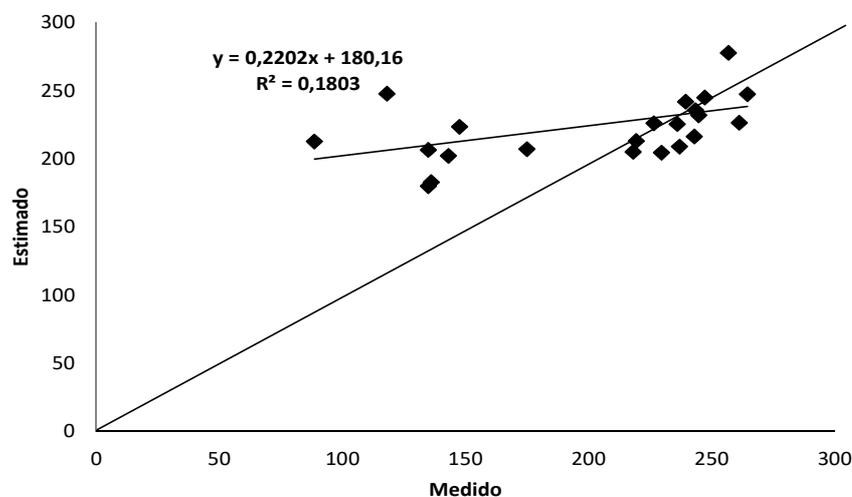


Figura 8. Recta de regresión de la simulación de WEPP para el perfil C y recta de ajuste perfecto.

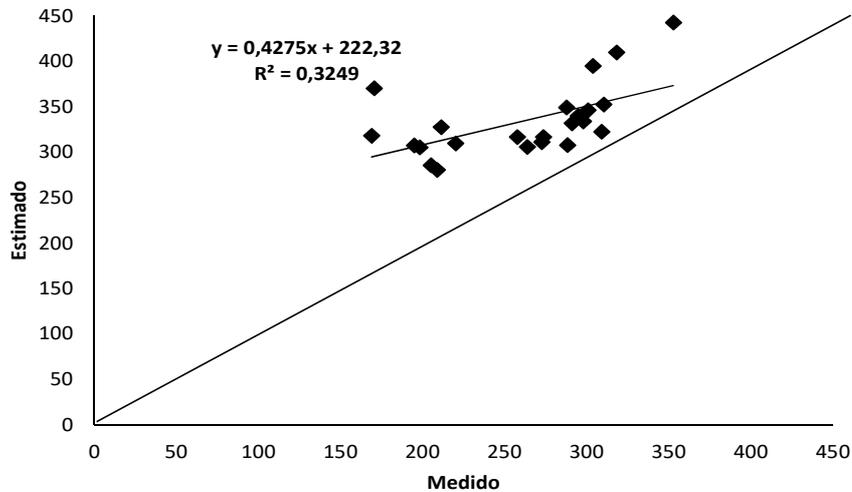


Figura 9. Recta de regresión de la simulación de WEPP para el perfil D y recta de ajuste perfecto.

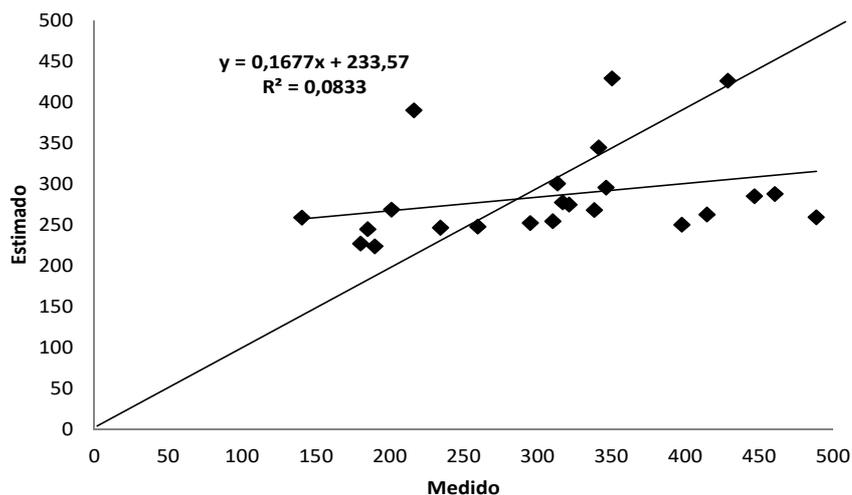


Figura 10. Recta de regresión de la simulación de WEPP para el perfil F y recta de ajuste perfecto.

Para los tres perfiles analizados, en el caso del perfil C y F es donde se han obtenido los mayores valores de coeficiente de determinación (ver cuadro 1) siendo en ambos casos mayor la varianza de los datos observados con respecto a los simulados pero tienen valores promedio similares. En las dos situaciones para que se produzca menor varianza de los datos simulados el modelo debió sobreestimar los valores de bajo contenido de agua y subestimar los contenidos altos. Esto se puede observar en las figuras 5, 6 y 7.

Ante los resultados expuestos, es claro que se genera un problema por la falta de ajuste del modelo por lo que se decidió analizar tres puntos que se los puede considerar como claves para el balance hídrico. En primera instancia se decidió realizar una comparación de la estimación de la evapotranspiración simulada por el modelo WEPP y la información suministrada por INIA Tacuarembó donde utilizan la ecuación de Penman Monteith. Una vez realizados los promedios para los diferentes años del período de evaluación se pudo observar que el modelo WEPP estimó una menor evapotranspiración que la estimada por INIA (ver cuadro 7) con lo cual el suelo se encuentra más húmedo que en la realidad.

Cuadro 7. Comparación valores de ETP estimada por WEPP y lo reportado por INIA.

Año	ET promedio WEPP (mm/d)	ET promedio INIA (mm/d)
2003	1,94	2,7
2004	2,32	2,8
2005	2,41	2,7
2006	2,03	2,8
2007	2,45	3,0
2008	2,41	3,2
2009	2,8	3,2

Además se había generado un problema en el procedimiento de calibración de la sonda ya que por la textura del suelo fue imposible extraer muestras para determinar los contenidos de agua más bajos por lo cual los puntos de contenidos de agua del suelo que quedaran por fuera de la recta de regresión podrían tener algún efecto perjudicial sobre la performance del modelo. Por lo expuesto se decidió realizar la eliminación de aquellos puntos de medición de agua del suelo de los perfiles C y D que quedaban por fuera de la recta de regresión y de esa manera poder evaluar realmente el modelo evitando los efectos externos. En el caso del perfil F no existían puntos que quedaran por fuera de la recta de regresión utilizada en la calibración. Para el perfil C, con la eliminación de estos datos se logró un mayor acercamiento de los datos observados y los simulados lográndose la corrección de los

desfasajes que se generaban cuando se usaban todos los datos como se puede ver en la figura 8 e incluso el coeficiente de eficiencia que se consideraba como insuficiente según Molnar (2011) ($MEF = -0,01$) pasa a tener valores buenos ($MEF = 0,6$) con una recta de regresión que no se aleja significativamente de la recta de ajuste perfecto ($p \text{ val} > 0,05$). En cambio para el perfil D no se han registrado cambios de importancia en el coeficiente de eficiencia ya que sigue teniendo valores negativos al igual que la recta de regresión que no ha presentado cambios significativos.

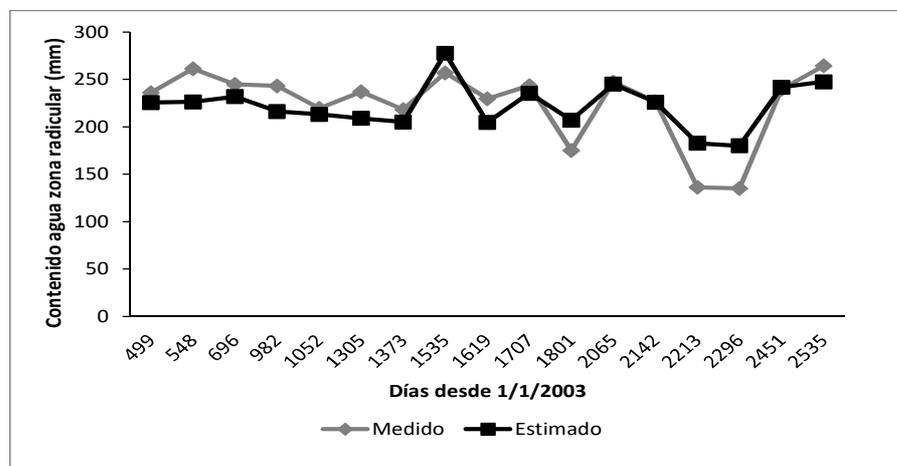


Figura 11. Comparación de datos del contenido de agua en la zona radicular medidos y simulados por WEPP para tres repeticiones en promedio del perfil C con menos datos.

Como tercer punto se tuvo en consideración el flujo lateral sub-superficial. Aunque se hayan realizado los ajustes antes mencionados de los datos se siguen obteniendo valores de coeficiente de eficiencia que no son aceptables. Esto puede deberse a que el modelo no ha generado flujo sub-superficial lateral como se ve en la realidad por observaciones de campo. Esto puede alterar la simulación de la redistribución del agua una vez que entra al suelo y por lo tanto generando ese desfase entre los datos observados y simulados.

2.7 CONCLUSIÓN

Para lograr una correcta simulación de la curva de crecimiento del *Pinus taeda* fue necesario la modificación de algunos parámetros claves tomando como punto de partida la base de datos que venía diseñada para la producción forestal en la interface de WEPP.

El componente balance hídrico del modelo WEPP para laderas fue testeado usando datos medidos de agua en el suelo con sonda de neutrones hasta 1,3 m de profundidad en la fila y en la entrefila del área forestada. Los resultados indican que el modelo WEPP no fue capaz de simular el contenido de agua del suelo en forma aceptable ya que no se han obtenido adecuados valores de coeficiente de eficiencia de Nash Sutcliffe para los tres perfiles considerados. De todas maneras para los perfiles C y F la recta de regresión no se aleja significativamente de la recta de ajuste perfecto.

Se han detectado inconvenientes en la calibración de la sonda de neutrones con contenidos bajos de agua del suelo y una menor evapotranspiración por parte del modelo. Por lo que para lograr un mejor ajuste se debería hacer alguna corrección de valores de entrada como puede ser el índice de área foliar de manera de lograr una buena simulación de la evapotranspiración y de esta manera lograr una simulación adecuada del modelo WEPP.

BIBLIOGRAFÍA

Barreto P. 2008. Efectos iniciales de la forestación sobre la calidad del agua de escurrimiento en una cuenca del río Tacuarembó. Tesis de Maestría. Montevideo. Uruguay. Facultad de Agronomía. 60 p.

Chescheir GM, Von Stackelberg N, Amatya D, Skaggs R. 2006. Effects of afforestation on the hydrologic behavior of a basin in the Tacuarembó River. Progress Report for 2005-06 submitted to Weyerhaeuser Foundation.

Biological and Agricultural Engineering Department, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA.

Delgado S, Alliaume F, García Préchac F, Hernández J. 2006. Efecto de las plantaciones de *Eucalyptus* sp sobre el recurso suelo en Uruguay. *Agrociencia*. Vol. 10(2):95-107.

Durán A. 1995. Orden III: Suelos saturados lixiviados. Orden IV: Suelos desaturados lixiviados. En: *Los suelos del Uruguay*. Montevideo. Hemisferio Sur. pp. 187-256.

Edeso J, Marauri P, Merino A, González M^a J. 1997. Determinación de la tasa de erosión hídrica en función del manejo forestal: La cuenca del río Santa Lucía (Gipuzkoa). *Lurralde: Investigación y espacio*. (20): 67-104.

Falco L. 1996. Estudio de suelos en el Departamento de Tacuarembó a escala 1:100000. Formación Tacuarembó. Mesozoico Triasico. MGAP (Ministerio de ganadería, agricultura y pesca)- Dirección de Suelos –I.M.Tacuarembó. 51 p.

Gándara J. 2013. Curso estacional del estado hídrico, crecimiento y actividad fotosintética en un rodal de *Pinus taeda* L. en Uruguay. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 96 p.

León R. 1992. Río del Plata grasslands. Regional sub-divisions. RT Coupland editores. *Ecosystems of the World*. Amsterdam. (8): 376-407.

MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). Dirección General Forestal. 2003. Boletín estadístico, Año 4, N° 3. Dirección General Forestal, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Montevideo, Uruguay.

Molnar P. 2011. "Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.

Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I – A discussion of principles, Journal of Hydrology. 10(3): 282-290.

Nicks AD, Lane LJ, Gander GA. 1995. Weather generator. En: USDA-ARS-USDI (ed). Technical documentation. Water Erosion Prediction Project (WEPP). Rep. 10. NSERL West Lafayette, Indiana, USA. pp: 2.1-2.7.

Pérez Gomar, E. 1999. Sistema solo-planta de campo nativo submetido ao uso de herbicidas para semeadura direta de forrageiras de estacao fría. Tesis de Maestrado. Santa María, Brasil. Universidade Federal de Santa María. 81p.

Piñeiro G. 2011. Impactos de la ganadería sobre la dinámica del C y N en los pastizales del Río de la Plata. En: Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. FPTA (Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria) N° 175. INIA. 79-96.

Sacco G, Falco L. 1975. Estudio semi-detallado de suelos. Estación Experimental del Norte, Departamento de Tacuarembó. CIAAB. MGAP- (Centro de investigaciones agrícolas A. Boerger y Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca) Dirección de Suelos y Fertilizantes. 24p.

Savabi MR, Williams JR. 1995. Water Balance and Percolation. WEEP Document.

Silveira L, Chreties C, Alonso J, Amorín C, De Izaguirre P, Crisci M, Symonds S, Martínez L, García M, García F, Delgado S, Clérici C, Bentancor L, Hill M, Alliaume F, Cabral P, Audicio P, Iroumé A, Huber A, Schipilov A. 2010. Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas. Serie FPTA-INIA 32.

Silveira L, Martinez L, Alonso J. 2003. Efecto de la sustitución de campo natural por plantaciones forestales, sobre los recursos hídricos en el Uruguay. En: Tercer Congreso Latinoamericano de manejo de cuencas hidrográficas. Arequipa. Perú.

Tedeschi LO. 2006. Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems* 89(2): 225-247.

Uruguay. Poder Legislativo. 1987. Ley N° 15939. Ley Forestal, aprobación y declaración de interés nacional [En línea]. Consultado 10 de junio 2015. Disponible en: https://www.mef.gub.uy/innovaportal/file/1707/1/ley_15939.pdf

3 EVALUACIÓN DEL MODELO WEPP PARA PREDECIR EL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO EN PASTIZALES NATURALES EN EL NORESTE DE URUGUAY

Blanco, N¹ 2*. Pérez Bidegain¹, M. Bentancur, O³.

¹ *Departamento de Suelos y Agua. Universidad de la República, Facultad de agronomía. Av. Garzón 780.*

² *Departamento del Agua. Universidad de la República, Cenur Noroeste. Rivera 1350.*

³ *Departamento de Estadística. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Av. Garzón 780.*

* cnicoblanco@gmail.com

3.1 RESUMEN

El modelo WEPP es un modelo basado en procesos que estima escurrimiento y erosión hídrica a nivel de ladera y de pequeñas cuencas, y para lo cual mantiene un balance hídrico del suelo a paso diario. El objetivo de este trabajo fue validar el componente balance hídrico del modelo WEPP en una catena bajo campo natural. Para ello se utilizaron datos de agua en el suelo medidos con sonda de neutrones cuatro veces en el año hasta 1,3 m de profundidad durante diez años sobre una catena de suelos en la cuenca de campo natural. Lo simulado por WEPP se lo comparó con los datos medidos. El coeficiente de eficiencia fue 0,03 y -1,29 para los perfiles C y D, respectivamente) valores considerados como insuficientes. De acuerdo a la recta de regresión WEPP sobreestima el contenido de agua ($p < 0,01$). En el perfil F (ladera baja) el coeficiente de eficiencia es 0.17, pero la línea de regresión no se diferencia de la línea 1:1. Al eliminar los datos de agua registrados por fuera de la recta de regresión de calibración, los resultados han demostrado una mejora en el ajuste para el perfil C no registrándose igual mejora para los perfiles D y F. WEPP se ha utilizado en forma satisfactoria en campo natural para la evaluación de la condición hidrológica, sin embargo los resultados sugieren la necesidad de calibrar el modelo para las condiciones locales.

Palabras clave: balance hídrico, validación, campo natural.

3.2 SUMMARY

WEPP is a process-based model that estimates water runoff and soil erosion at hillslope and watershed scale, maintaining a soil water balance on a daily base. The objective of this work was to validate the soil water balance component of WEPP on a soil catena under native pastures. We used a soil water data measured with neutron probe four times a year up to 1.3 m depth for a 10 years-period on a soil catena in a native pasture watershed. WEPP model estimates were compared to the measured data. The coefficient of efficiency was 0,03 y -1,29 for soil profiles C and D, respectively, values that are considered insufficient. According to the regression line WEPP overestimates the soil water content ($p < 0.01$). For soil profile E (fooslope) the coefficient of efficiency is 0.17, but the regression line did not differ from the 1:1 line. After delete the measured soil water points that fall outside the calibrated regression line, the coefficient of efficiency improved for soil profile C, but it did not for D and F. WEPP has succeed to evaluate the hydrological condition under native pastures, however the results suggests that WEPP needs calibration for the local conditions.

Keywords: water balance, validation, natural field.

3.3 INTRODUCCIÓN

El Uruguay está ubicado entre los 30 y 35 grados de latitud sur, en una zona considerada como subtropical templada (CIAAB, 1971). La ausencia de sistemas montañosos importantes en Uruguay genera que las variables climáticas no tengan grandes variaciones de magnitud dentro del territorio.

Las características climáticas determinan que el territorio uruguayo se encuentre en su totalidad dentro de la región de los pastizales del Río de la Plata donde tienen mayor importancia relativa las gramíneas C4 y especies leñosas (León et al., 1992). El campo natural es considerado como el componente principal de alimentación de rodeos y majadas en los sistemas

productivos ganaderos predominantes en la mayor parte del país (Risso et al., 2005). De hecho Laterra y Rivas (2005) sostienen que el campo natural representa más del 70% de la superficie del país.

El uso pastoril al cual son sometidos los suelos ha llevado a que se hayan detectado diferentes grados de degradación de las pasturas naturales que determinan que la productividad de la ganadería haya disminuido y según Boggiano et al., (2005) dentro de las causas de esta degradación se pueden mencionar los manejos inadecuados del pastoreo y la fijación de las cargas animales. El mantenimiento de estas altas cargas animales (altas presiones de pastoreo) sobre las pasturas naturales en forma permanente puede generar degradación, reduciendo la presencia de especies invernales e incrementando la presión de pastoreo sobre las estivales. Esto genera según Pereira (2011) un aumento del porcentaje de suelo desnudo, o sea suelo sin la protección de la cobertura vegetal con la consecuente producción de cambios en algunos componentes del balance hídrico y que por lo tanto la lluvia pueda tener algún efecto erosivo sobre el suelo.

Por lo tanto es necesario contar con herramientas de predicción que permitan conocer cómo es la dinámica del agua en el suelo para de esa manera evitar que se generen cambios perjudiciales e irreversibles sobre el suelo y la vegetación de los pastizales naturales (Bestelmeyer et al., 2003; Chartier y Rostagno, 2006).

En este sentido la utilización de los modelos matemáticos se ha convertido en una herramienta útil en la predicción de las pérdidas de suelo por erosión hídrica siendo una herramienta fundamental en el análisis del balance hídrico. Para ello es fundamental validar el balance hídrico del suelo para poder estimar el flujo de agua superficial teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y las precipitaciones de la región.

La información publicada sobre la validación del componente balance hídrico del modelo WEPP en ambientes de pastizales en Uruguay es muy escasa. Es por ello que este artículo tiene como objetivo validar el componente balance hídrico del modelo WEPP para ambientes de pastizales.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo en una cuenca cuya vegetación es de campo natural ubicada en el establecimiento “La Corona”, Departamento de Tacuarembó, Uruguay (31°38'09”S, 55°41'48”W). La topografía de la cuenca se caracteriza por un paisaje ondulado con colinas rocosas que sobresalen de basalto y arenisca. El material generador de los suelos son areniscas sedimentarias eólicas y silicificadas de las Unidades Rivera y Tacuarembó, (Sacco y Falco, 1975; Durán, 1995; Falco, 1996; Pérez Gomar, 1999). De acuerdo a datos analíticos el suelo se trata de un Typic Hapludult según la clasificación del Soil Taxonomy (USDA) que presenta variaciones en cuanto a la secuencia de horizontes en su perfil. Debido a estas diferencias, se tomaron tres puntos de monitoreo que corresponden a tres posiciones topográficas, ladera alta: perfil C, ladera media: perfil D y ladera baja: perfil F.

Las comunidades de campo natural que se encuentran en la cuenca son características de la región con un ciclo netamente estival y una producción de forraje de 5 toneladas de materia seca con el 80% correspondiente al período primavera-verano (Bemhaja, 2001). Esto último se explica porque la producción sigue la curva de crecimiento de las principales gramíneas estivales. Aunque existe variación en la producción invernal, ésta es mínima, donde la contribución de las especies invernales es menor al 5% y las estivales se encuentran en latencia (Bemhaja, 2001).

3.4.2 Mediciones

La información meteorológica diaria (temperatura del aire, humedad relativa, precipitaciones, dirección y velocidad de viento y radiación solar) se obtuvo mediante un sistema automático de medición (Campbell Scientific CR 10X, Logan, UT, USA) en una estación meteorológica próxima al rodal.

El contenido de agua en el suelo fue monitoreado mediante termalización de neutrones en tres posiciones topográficas (alto, medio y bajo) hasta una profundidad de 1,3 m, en intervalos de 0-15, 15-30, 30-50, 50-70, 70-90, 90-110-130 cm. En cada una de las posiciones topográficas se instalaron tres tubos de acceso en la fila y entrefila de plantación, respectivamente. Las medidas fueron realizadas cuatro veces al año durante el período 2003-2009

La calibración de la sonda se realizó tomando muestras en un amplio rango de condiciones de humedad, registrando las lecturas de las relaciones de cuentas a profundidades determinadas. Al finalizar, se tomaron muestras de suelo no disturbadas a las mismas profundidades y se determinó la humedad gravimétrica y volumétrica. Posteriormente se relacionó el número de cuentas leído en la sonda (número de neutrones retrodispersados en el suelo), normalizados a un valor de referencia (número de neutrones retrodispersados dentro del blindaje) con el contenido de humedad del suelo para lo cual se ajustó una recta de regresión para diferentes capas de los tres perfiles en consideración que se pueden ver en las figuras 12, 13 y 14.

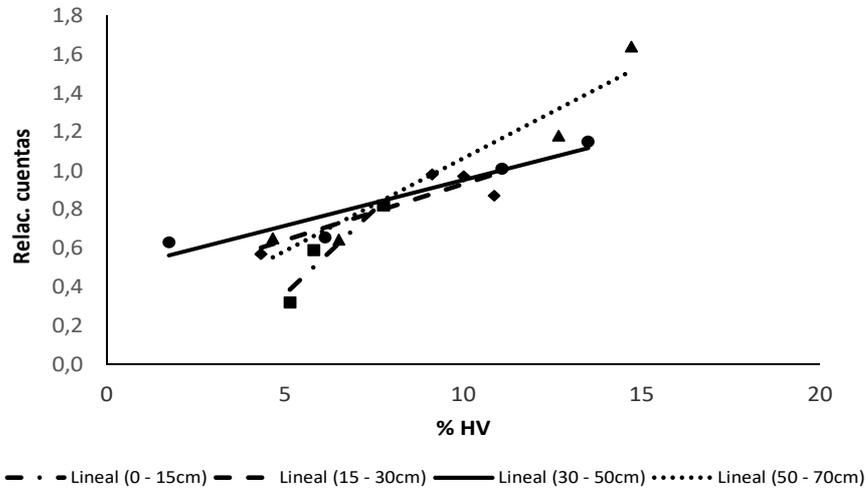


Figura 12. Curvas de calibración para las 4 primeras capas del perfil C

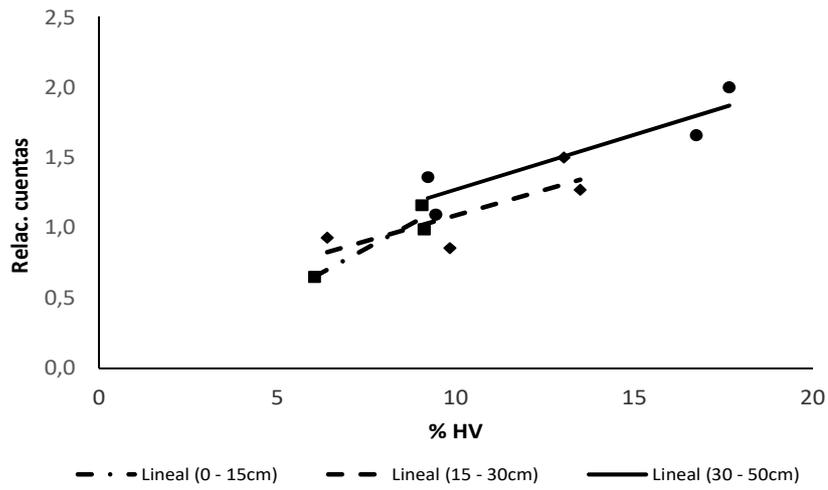


Figura 13. Curvas de calibración para las 3 primeras capas del perfil D.

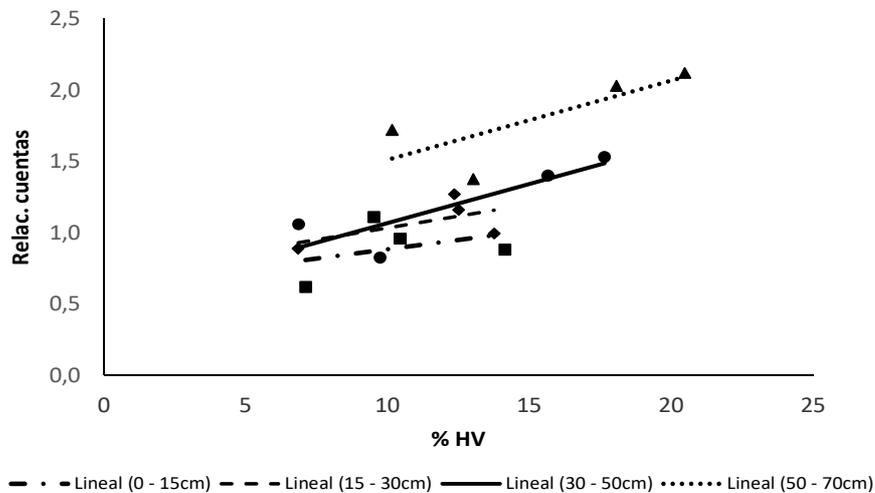


Figura 14. Curvas de calibración para las 4 primeras capas del perfil F.

3.4.3 Entradas de WEPP

El modelo de ladera WEPP versión 2012.800 fue utilizada en este estudio. Este modelo requiere cuatro bases de datos: clima, topografía, suelo y manejo de cultivos (Nicks et al., 1995).

3.4.3.1 Base de datos de Clima

Para la generación del archivo de clima en WEPP se usó el generador de clima BPCDG (Breakpoint data) utilizando como insumo los datos climáticos desde el año 2003 al 2009 conteniendo datos de radiación, temperatura, punto de rocío, velocidad y dirección del viento, humedad relativa así como también datos de precipitación para el Departamento de Tacuarembó. Para poder armar la base de datos de clima se debe crear una planilla en Microsoft Excel donde se deben incluir todos los datos climáticos y se le pide a WEPP que lea los datos que precisa de cada una de las columnas de dicha planilla.

3.4.3.2 Base de datos de Topografía

Para la generación de la base de datos de topografía se dividió a la ladera en partes iguales a las cuales se le asignó un porcentaje de pendiente que varía dentro de un rango para cada perfil de acuerdo a lo observado en campo. En el cuadro siguiente se incluyen los rangos del grado de pendiente que se tuvieron en consideración de acuerdo al perfil de que se trate.

Cuadro 8. Rango de pendiente de los tres perfiles.

Perfil	Pendiente general (%)
C	12-15%
D	6-12%
F	< 5%

3.4.3.3 Base de datos de Suelo

Los tres perfiles representativos para la simulación fueron ubicados de manera consecutiva en la misma ladera uno al lado del otro de acuerdo a la posición que ocupaban en la ladera siendo el orden: perfil C, perfil D y perfil F. De esta manera la combinación de cada uno de los perfiles junto con la topografía y el manejo constituyeron tres elementos de flujo superficial (OFE) diferentes.

Las características de los perfiles que ocupan diferentes posiciones topográficas en la ladera se pueden ver en los siguientes cuadros.

Cuadro 9. Descripción del perfil C (ladera alta)

Propiedades	Horizontes			
	A_{u1}	A_{u2}	B_t	C
Espesor (cm)	0-78	78-99	99-133	133 a +
Color	5YR3/4	s/d	2,5YR4/8	s/d
Arena	83,2	80,1	61,2	s/d
Limo	8,9	9,5	10,5	s/d
Arcilla	7,9	10,4	28,3	s/d
Estructura	Bloques sub-angulares finos	Granular	Bloques angulares	s/d

Cuadro 10. Descripción del perfil D (ladera media)

Propiedades	Horizontes			
	A	B _{t1}	B _{t2}	C
Espesor (cm)	0-48	48-80	80-114	114 a +
Color	7,5YR3/2	s/d	10YR5/4	s/d
Arena	71,7	54,1	63,3	67
Limo	12,8	11,8	11,1	10,6
Arcilla	15,5	34,1	25,6	22,4
Estructura	Bloques sub angulares	Bloques angulares medios débiles	Bloques angulares medios moderados	Bloques angulares medios y moderados

Cuadro 11. Descripción del perfil F (ladera baja)

Propiedades	Horizontes			
	A	E	B _t	C
Espesor (cm)	0-38	38-72	72-104	104 a +
Color	10YR3/2	s/d	7,5YR6/6	s/d
Arena	74,2	75,9	63,1	s/d
Limo	13,1	12,8	12,3	s/d
Arcilla	12,7	11,3	24,6	s/d
Estructura	Bloques sub angulares medios, débiles	Bloques sub angulares finos, muy débiles	s/d	s/d

3.4.3.4 Base de datos de Manejo

En el balance hídrico que realiza WEPP es fundamental ajustar la base de datos con la mayor precisión posible de manera de poder lograr que el modelo pueda generar un valor de evapotranspiración que se acerque a lo que ocurre en la realidad. Teniendo en cuenta que el campo natural es una comunidad de especies que coexisten en el espacio y tiempo, es difícil tener un único valor de algunos parámetros como por ejemplo las temperaturas cardinales. Por ello se tuvo en cuenta que por el tipo de suelo dominante en la cuenca donde hay un amplio predominio de especies estivales, se consideró al *Paspalum dillatum* como una especie dominante. La mayoría de los datos utilizados fueron los de la base de datos “shortgrass prairie”. La excepción fueron los datos de eficiencia de uso de la radiación, temperaturas cardinales, grados día para la estación de crecimiento, máximo índice de área foliar y profundidad de arraigamiento. La modificación de estos parámetros

permitió una simulación cercana a la realidad del crecimiento vegetal y una adecuada evolución del IAF del campo natural.

Cuadro 12. Parámetros utilizados en WEPP.

Parámetro	
BER	15 Kg/MJ
T max	40 °C**
T óptima	30 °C**
T base	13 °C**
T crítica	- 5 °C**
Grados día estación de crecimiento	600 GD**

*Ajustado procurando lograr una adecuada simulación de biomasa.

**Ibrahim, M.

***Lezama, F.

3.5 VALIDACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

Para la validación del balance hídrico se tuvo en consideración algunos estadísticos que según la bibliografía se usan en la validación de modelos. Uno de ellos es el coeficiente de eficiencia mediante el cual se comparan los datos observados con los simulados por el modelo mediante el empleo de la siguiente fórmula.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Donde E es la eficiencia del modelo, Q_i representa el valor observado del evento i, $Q_{sim,i}$ es el valor simulado del evento i y \bar{Q} es la media de los valores observados.

Por otro lado se tomó también a la regresión lineal para validar el modelo mediante la consideración del intercepto y la pendiente de la recta de regresión haciendo la evaluación además si la recta de regresión de la

simulación se alejaba o no significativamente de la recta de ajuste perfecto tomando un nivel de significación de 0,05.

Además se tuvo en consideración el coeficiente de determinación (CD) propuesto por Tedeschi (2006) el cual se calcula tomando en consideración la siguiente ecuación:

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (f(X_1, \dots, X_p)_i - \bar{Y})^2}.$$

Donde CD es el coeficiente de determinación, Y_i es el i ésimo valor observado, \bar{Y} es el promedio de los datos observados y $f(X_1, \dots, X_p)$ son los valores estimados por el modelo.

A través del coeficiente de determinación (CD) se mide la proporción de la varianza total de los valores observados explicada por los datos predichos. Es decir que se mide la dispersión de los datos simulados con respecto a la media de los datos observados por lo que en la medida que esta diferencia sea mayor, el CD va a tener valores más cercanos a cero.

3.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para el análisis de sensibilidad se procedió a modificar algunos parámetros que se consideran clave en el balance hídrico y analizo en forma gráfica el efecto de esa modificación en los resultados obtenidos.

3.7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las figuras 15, 16 y 17 muestran la evolución del contenido de agua medido y simulado por WEPP en la zona radicular para los perfiles considerados en tres posiciones topográficas diferentes (perfil C ladera alta, perfil D ladera media y perfil F ladera baja) en una misma ladera desde el año 2004 hasta el 2009.

Es importante que los modelos hidrológicos simulen correctamente el escurrimiento y el contenido de agua de la zona radicular. Para esto es importante el modelado del crecimiento de las plantas y el contenido antecedente para los cálculos de infiltración. Hay dos principales influencias en el balance de agua del suelo las cuales son la evapotranspiración potencial y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

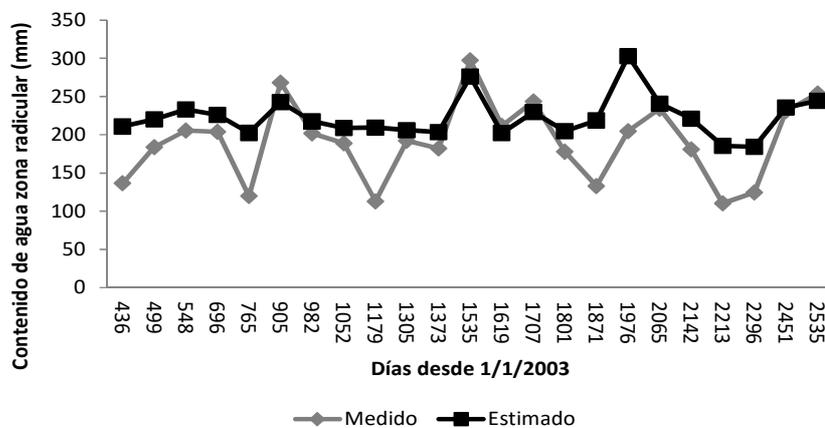


Figura 15. Comparación de datos del contenido de agua en la zona radicular medidos y simulados por WEPP para tres repeticiones en promedio del perfil C.

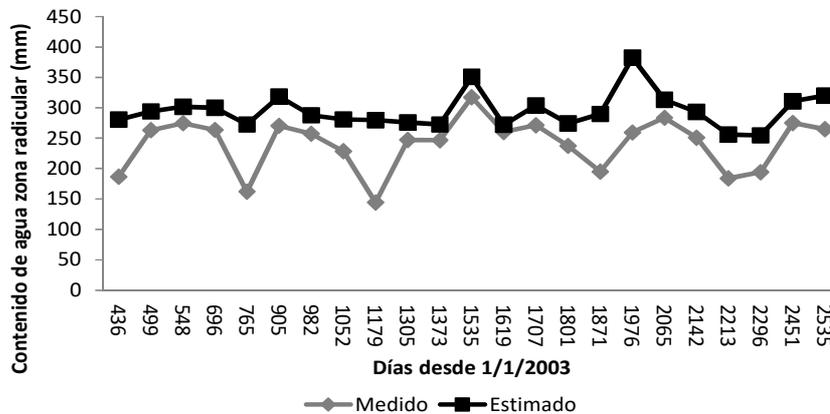


Figura 16. Comparación de datos del contenido de agua en la zona radicular medidos y simulados por WEPP para tres repeticiones en promedio del perfil D.

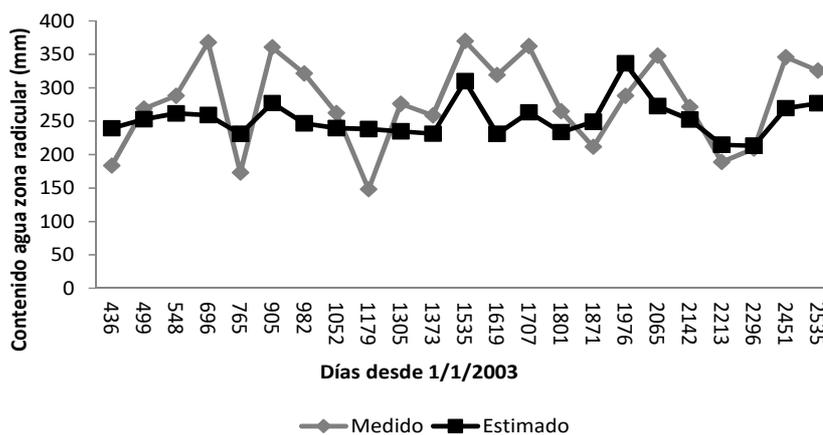


Figura 17. Comparación de datos del contenido de agua en la zona radicular medidos y simulados por WEPP para tres repeticiones en promedio del perfil F.

A través de las tres figuras, se puede ver que para los perfiles C y D el modelo WEPP copia bien los picos de máximo contenido de agua en el suelo teniendo dificultad para simular las reducciones de agua y los valores simulados por WEPP son en su mayoría más altos que los medidos en el campo. Esta misma observación hizo Savabi y Williams (1995) quienes trabajando en la validación del modelo WEPP en una cuenca con pradera en Kansas, encontraron que los valores de agua en el suelo considerando la totalidad del perfil eran mayores a los medidos con sonda de neutrones en el

suelo. Por el contrario para el perfil F en algunos momentos del período de simulación los valores de agua en el suelo medido son mayores y en otros momentos se encuentran por debajo de los simulados. De todas maneras en los tres perfiles se han dado situaciones en las cuales el contenido de agua medido ha tenido una disminución en algunos momentos puntuales pero el modelo no fue capaz de copiar esa disminución en la simulación.

De acuerdo al análisis estadístico, ninguno de los tres perfiles tuvo un coeficiente de eficiencia considerado por Molnar (2011) como aceptable a pesar que para el perfil C y F la eficiencia tuvo valores positivos. Esta falta de ajuste del modelo puede además ser corroborada cuando se ve que la recta de regresión se aleja de la recta de ajuste perfecto ($pval < 0,05$) con valores de coeficiente de determinación que son bajos para los tres perfiles (cuadro 13, figura 18, 19 y 20). Con esos valores bajos del coeficiente de determinación se entiende que la variabilidad de los ocurrido son es bien explicada por el modelo. Los resultados de eficiencia logrados para los tres perfiles fueron menores que los encontrados por Savabi et al. (1995) quienes trabajando sobre parcelas de campo natural obtuvieron un coeficiente de eficiencia de 0,46.

Para el caso de los tres perfiles analizados, el que está ubicado en la ladera baja es el que tiene el mayor coeficiente de determinación por lo que los datos simulados están más concentrados en torno a la media de los datos observados. Esto se puede apreciar observando las gráficas 18, 19 y 20. Para que esto ocurra se tuvo que haber producido una sobreestimación del contenido de agua en los valores bajos y una subestimación en los valores altos de agua en el suelo.

Este comportamiento se puede deber a que la estimación de evapotranspiración que hace el modelo WEPP está por debajo de los valores suministrados por INIA Tacuarembó donde utilizan la ecuación de Penman Monteith (ver cuadro 6). Esta menor evapotranspiración genera que el

contenido de agua del suelo simulado por WEPP sea mayor que el medido en el campo al producirse un menor secado (figuras 15, 16 y 17). Por otro lado se ha producido un problema con la calibración de la sonda de neutrones en los puntos más bajos de agua del suelo ya que se hacía muy difícil la extracción de muestras de suelos para poder determinar el contenido gravimétrico de agua con esos contenidos de agua.

Cuadro 13. Comparación de la Evapotranspiración simulada por WEPP y lo reportado por INIA Tacuarembó.

Año	ET promedio WEPP (mm/d)	ET promedio INIA (mm/d)
2003	1,79	2,7
2004	1,51	2,8
2005	1,43	2,7
2006	1,35	2,8
2007	1,52	3,0
2008	2,17	3,2
2009	1,78	3,2

Ante esta situación y viendo los resultados obtenidos, se decidió eliminar los puntos en el que el contenido de agua del suelo medido estaban por debajo del punto más bajo de la recta de calibración para evitar que puedan tener algún efecto perjudicial sobre la performance del modelo y de esa manera poder evaluar realmente el modelo evitando los efectos externos. En el caso del perfil F no se realizó la eliminación de ningún punto debido a que no existían puntos de agua en el suelo por fuera de la recta de calibración. Los resultados indican que se logró generar un ajuste adecuado ya que el coeficiente de eficiencia pasó a tener valores considerados por Molnar (2011) como aceptables. A su vez la recta de regresión no tiene diferencias significativas con la recta de ajuste perfecto ($pval < 0,05$). Para el perfil D sin embargo no se ha producido un cambio en los resultados comparado con la situación cuando se hacía el análisis con todos los datos (cuadro 15).

Cuadro 14. Indicadores estadísticos con todos los datos de agua medida en el suelo.

Suelo	E	CD	b0	b1	p-val
C	0.03	0.47	-93.00	1.27	0.003
D	-1.29	0.48	-22.50	0.89	0.000003
F	0.17	3.09	-70.69	1.37	0.11

Cuadro 15. Indicadores estadísticos con menos datos de agua medida en el suelo.

Suelo	E	CD	b0	b1	p-val
C	0.74	2.69	-108.51	1.49	0.05
D	-0.85	0.44	-73.80	1.12	< 0,001

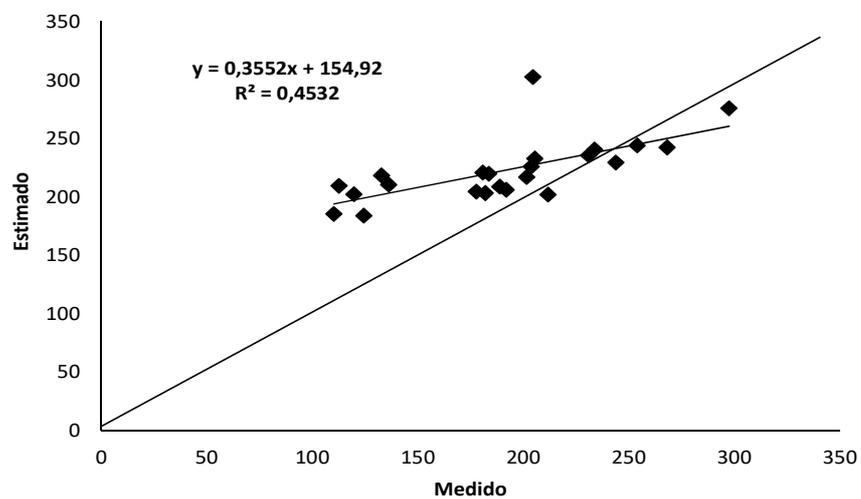


Figura 18. Recta de regresión de la simulación de WEPP para el perfil C y recta de ajuste perfecto.

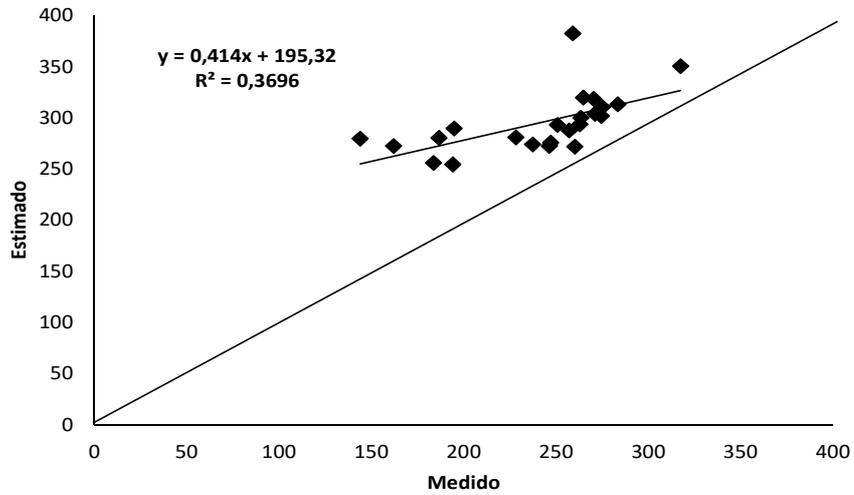


Figura 19. Recta de regresión de la simulación de WEPP para el perfil D y recta de ajuste perfecto.

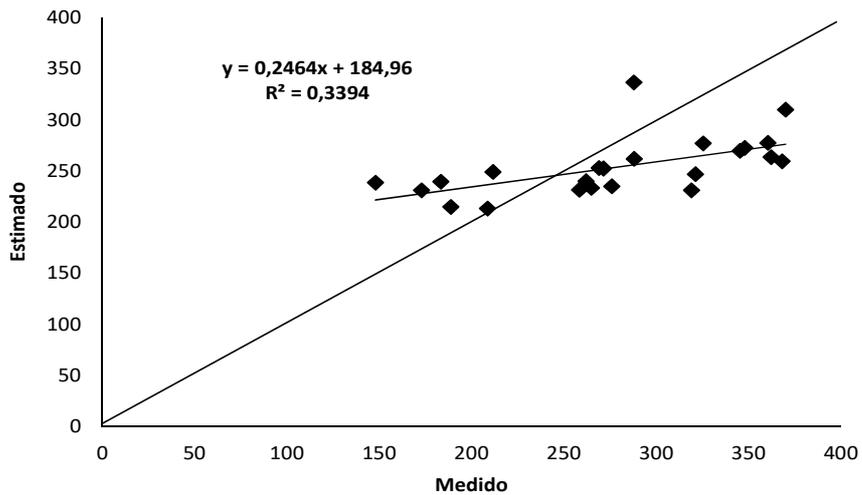


Figura 20. Recta de regresión de la simulación de WEPP para el perfil F y recta de ajuste perfecto.

Por otro lado se decidió hacer un análisis de sensibilidad modificando el coeficiente de eficiencia de uso de la radiación ya que se considera un parámetro clave ya que puede generar diferencias en la producción de biomasa y de esta manera modifica la evapotranspiración. Una vez realizada esa modificación se evaluó cuáles fueron los cambios que se pudieron haber producido para los tres perfiles en algunos indicadores estadísticos utilizados como es el caso de la Eficiencia de uso de la radiación (Nash y Sutcliffe, 1970)

y en el intercepto y la pendiente de la recta de regresión (b_0 y b_1). Dicho análisis se puede ver en forma gráfica en las figuras 21, 22 y 23.

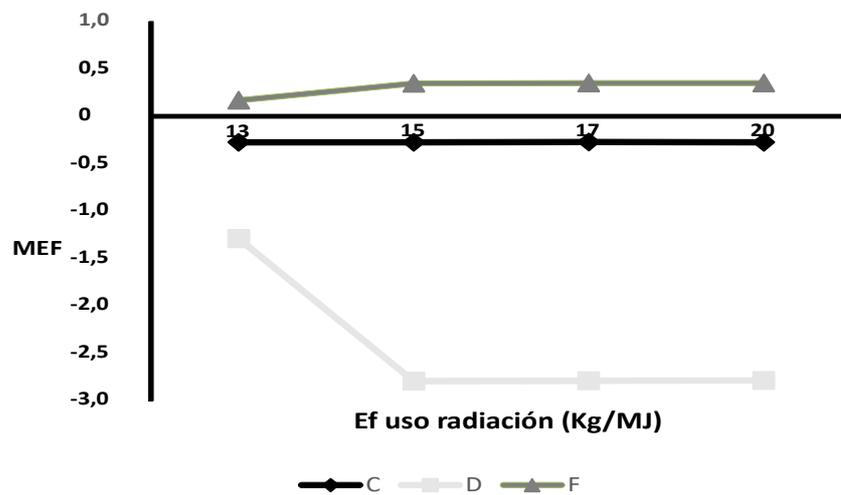


Figura 21. Evolución del coeficiente de Eficiencia de Nash Sutcliffe para los 3 perfiles con la modificación de la Eficiencia de uso de la radiación.

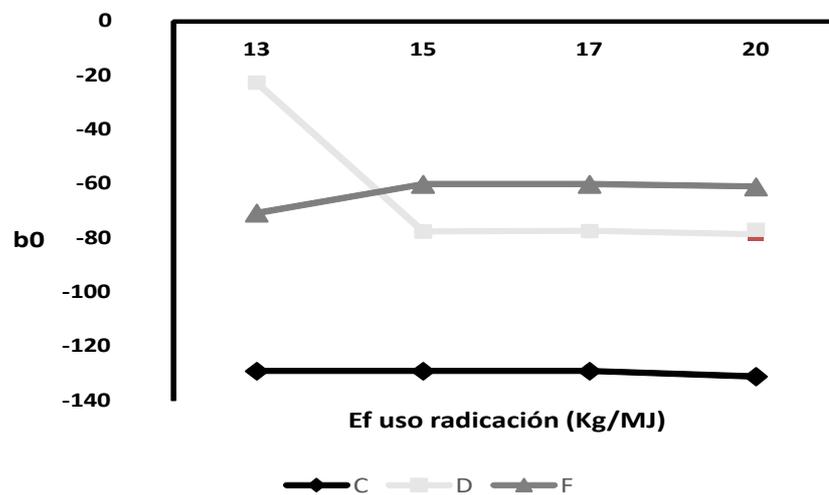


Figura 22. Evolución del intercepto de la recta de regresión para los 3 perfiles con la modificación de la Eficiencia de uso de la radiación.

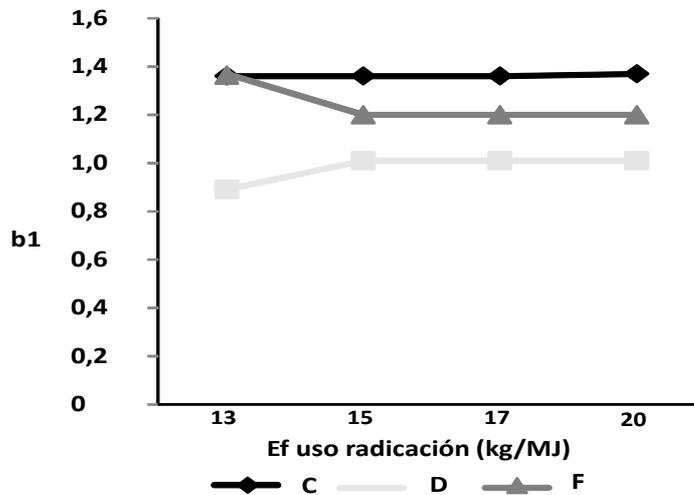


Figura 23. Evolución de la pendiente de la recta de regresión para los 3 perfiles con la modificación de la Eficiencia de uso de la radiación.

De este análisis se desprende que el modelo no ha sido sensible ante la modificación de la eficiencia de uso de la radiación salvo en el caso del perfil D en el cual para los tres indicadores estadísticos se ve una modificación para los dos primeros valores de eficiencia de uso de la radiación.

3.8 CONCLUSIÓN

La situación del campo natural el cual está compuesto por un conjunto de plantas de diferentes especies puede afectar la simulación de la evapotranspiración por el modelo WEPP por tener cada componente diferente índice de área foliar y por consiguiente diferente efecto sobre el componente evapotranspiración.

El componente balance hídrico del modelo WEPP para laderas fue testeado usando datos medidos de agua en el suelo con sonda de neutrones hasta 1,3 m de profundidad sobre campo natural. Los resultados indican que el modelo no tiene un ajuste perfecto demostrado por la desviación significativa de la recta de regresión del modelo ($P < 0,01$) y por los bajos coeficientes de eficiencia de Nash Sutcliffe para los perfiles C y D. Para el

perfil F de ladera baja si bien no se puede decir que hay sobreestimación ni subestimación por no alejarse la recta de regresión significativamente del ajuste perfecto, se ha obtenido un coeficiente de Nash Sutcliffe que según Molnar (2011) no puede ser considerado como aceptable. Estos resultados pueden ser explicados por inconvenientes en la calibración de la sonda de neutrones con contenidos bajos de agua del suelo y por otro lado una menor evapotranspiración por parte del modelo WEPP. Por lo que para lograr un mejor ajuste no se deberían considerar los puntos donde el contenido de agua del suelo es muy bajo debido a que están por fuera de la recta de regresión de la calibración. En este sentido sería recomendable poder encontrar alguna metodología que nos permita obtener puntos bajos de contenidos de agua en el suelo que nos permitan hacer una mejor calibración en suelos de texturas gruesas. Por otro lado se debería hacer alguna corrección de valores de entrada como puede ser el índice de área foliar de manera de lograr una buena simulación de la evapotranspiración. Al eliminar los puntos con contenidos muy bajos de agua en el suelo para el perfil C, se han logrado cambios importantes en el comportamiento del modelo obteniendo un coeficiente de eficiencia de 0,74 y la recta de regresión no se separa en forma significativa del ajuste perfecto. En el perfil D si bien se han logrado mejores resultados de coeficiente de eficiencia (-0,85), sigue siendo considerado como insuficiente de acuerdo a lo establecido por Molnar (2011) y la recta de regresión sigue siendo significativamente diferente a la recta de ajuste perfecto.

BIBLIOGRAFÍA

Bemhaja M. 2001. Tecnologías para la mejora de la producción de forraje en suelos arenosos. En: Risso y Berretta (Eds). Tecnologías forrajeras para sistemas Ganaderos de Uruguay. INIA Tacuarembó. Boletín de divulgación 76: 109-121.

Bestelmeyer BT, Brown JR, Havstad KM, Alexander R, Chavez G, Herrick JE. 2003. Development and use of state and transition models for rangelands. *Journal of Range Manage.* 56:114-126.

Boggiano P, Zanoniani R, Millot JC. 2005. Respuestas del campo natural a manejos con niveles crecientes de intervención. En: Gómez R, Albicette, M (Eds). Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural. INIA. Serie técnica N° 151. Unidad de agronegocios y difusión de INIA. 105-113.

CIAAB (Centro de investigaciones agrícolas A. Boerger). 1971. Clima y Agricultura. Ministerio de Ganadería y Pesca – CIAAB. Boletín de Divulgación N° 9. Colonia – Uruguay. 56p.

Chartier MP, Rostagno CM. 2006. Soil erosion thresholds and alternative states in northeastern Patagonian rangelands. *Rangeland Ecology and Management.* 59(6):616-624.

Durán A. 1995. Orden III: Suelos saturados lixiviados. Orden IV: Suelos desaturados lixiviados. En: Los suelos del Uruguay. Montevideo. Hemisferio Sur. pp. 187-256.

Falco L. 1996. Estudio de suelos en el Departamento de Tacuarembó a escala 1:100000. Formación Tacuarembó. Mesozoico Triasico. MGAP (Ministerio de ganadería, agricultura y pesca)- Dirección de Suelos –I.M.Tacuarembó. 51 p.

Laterra P, Rivas M. 2005. Bases y herramientas para la conservación in situ y el manejo integrado de los recursos naturales en los Campos y Pampas del Cono Sur. *Agrociencia*, 9(1-2): 169-178.

León R. 1992. Río del Plata grasslands. Regional sub-divisions. RT Coupland editores. *Ecosystems of the World.* Amsterdam. (8): 376-407.

Lezama F, Altesor A, Pereira M, Paruelo JM. 2011. Descripción de la heterogeneidad florística de las principales regiones geomorfológicas de Uruguay. En: Altesor A, Ayala W, Paruelo J M (Eds). Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales.. Serie FPTA N° 26.

Molnar P. 2011. "Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.

Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I – A discussion of principles, Journal of Hydrology. 10(3):282-290.

Nicks AD, Lane LJ, Gander GA. 1995. Weather generator. En: USDA-ARS-USDI (ed). Technical documentation. Water Erosion Prediction Project (WEPP). Rep. 10. NSERL West Lafayette, Indiana, USA. pp: 2.1-2.7.

Pereira, M. 2011. Manejo y conservación de las pasturas naturales del Basalto. Instituto Plan Agropecuario. 78p.

Pérez Gomar, E. 1999. Sistema solo-planta de campo nativo submetido ao uso de herbicidas para sementeira direta de forrageiras de estação fria. Tesis de Maestrado. Santa María, Brasil. Universidade Federal de Santa María. 81p.

Risso D, Ayala W, Bermúdez R, Berretta E. 2005. Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural. INIA. Serie Técnica N° 151. 123p.

Sacco G, Falco L. 1975. Estudio semi-detallado de suelos. Estación Experimental del Norte, Departamento de Tacuarembó. CIAAB. MGAP- (Centro de investigaciones agrícolas A. Boerger y Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca) Dirección de Suelos y Fertilizantes. 24p.

Savabi MR, Williams JR. 1995. Water Balance and Percolation. WEEP Document.

Savabi MR, Young RA, Benoit GR, Witte JM, Flanagan DC. 1995. Winter Hydrology. Citeseer.

Tedeschi LO. 2006. Assessment of the adequacy of mathematical models.
Agricultural Systems 89(2): 225-247.

4 CONCLUSIONES GENERALES

En el Uruguay en las últimas décadas se han producido cambios en el tapiz que originalmente se encontraba por la inclusión de otros rubros como por ejemplo el forestal. Esto ha llevado a que se produzcan modificaciones geomorfológicas que pueden producir alteraciones en por ejemplo la dinámica del agua del suelo. Para posibilitar el estudio de estos cambios se usan algunas herramientas como son los modelos de simulación dentro de los cuales el modelo WEPP parece ser muy adecuado.

Del trabajo de esta tesis se concluye que el modelo WEPP no ha tenido la capacidad de simular de una manera aceptable el contenido de agua del suelo demostrado por los indicadores estadísticas analizados presentando generalmente una sobre estimación del contenido de agua del suelo para las dos situaciones de manejo estudiadas. Estos problemas se deben a algunos inconvenientes detectados en la menor simulación de la evapotranspiración lo cual genera que el suelo tenga mayor contenido de agua. Sumado a ello se detectaron problemas en la calibración de la sonda de neutrones debido a la textura del suelo por lo que fue complejo determinar los contenidos bajos de agua en el suelo. A su vez en el campo se podía ver el movimiento de agua dentro del suelo por flujo subsuperficial lo cual no fue detectado por WEPP.

Ante estos resultados se recomienda el estudio en profundidad de algunos parámetros que se pueden considerar claves en el funcionamiento del modelo para las condiciones locales. Dentro de estos parámetros se puede mencionar la eficiencia de uso de la radicación para pinos ya que este parámetro controla la simulación del crecimiento de la vegetación la cual es fundamental para la simulación correcta de la evapotranspiración generando variaciones en el contenido de agua del suelo. Por otro lado habría que estudiar la anisotropía para los suelos de nuestro país para mejorar la simulación del movimiento del agua dentro del suelo. Esto se

podría llevar a cabo utilizando un georadar con una antena de alta frecuencia. Por último se deberían estudiar más en profundidad las ecuaciones que generan la simulación del flujo sub-superficial dentro de WEPP para que se pueda ver reflejado en el modelo lo que efectivamente se ve en el campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar C. 1997. Simulación de sistemas, aplicaciones en producción animal. Colección en Agricultura. Pontificia. Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía. Santiago, Chile. 241 p.
- Alberts EE, Nearing MA, Weltz MA, Risse LM, Pierson FB, Zhang JM, Laflen JM, Simanton JR. 1995. Soil component. En: Flanagan DC, Nearing MA. (Eds). USDA-water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. USDA-ARS-NSERL Report No. 10. NSERL, West Lafayette, Indiana, USA, pp 1-47.
- Amorim RSS, Da Silva DD, Pruski FF, De Matos AT. 2010. Avaliação modelos USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. Eng. Agric. Jaboticabal. 30(6): 1046-104.
- Ascough II JC, Flanagan DC, Nearing MA, Engel BA. 2012. Sensitivity and first-order/Monte Carlo uncertainty analysis of the WEPP hillslope erosion model. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 56(2): 437-452.
- Barrales L, Peña I, Fernández de la Reguera P. 2004. Validación de modelos: un enfoque aplicado. Nota Científica. Agricultura Técnica (Chile). 64(1): 66-73.
- Barreto P. 2008. Efectos iniciales de la forestación sobre la calidad del agua de escurrimiento en una cuenca del río Tacuarembó. Tesis de Maestría. Montevideo. Uruguay. Facultad de Agronomía. 60 p.
- Bemhaja M. 2001. Tecnologías para la mejora de la producción de forraje en suelos arenosos. En: Risso y Berretta (Eds). Tecnologías forrajeras para sistemas Ganaderos de Uruguay. INIA Tacuarembó. Boletín de divulgación 76: 109-121.

- Berretta E. 1996. Campo natural: valor nutritivo y manejo. En: Risso D, Berretta E, Morón A (Eds). Producción y manejo de pasturas. INIA Tacuarembó. Serie Técnica n° 80. Unidad de difusión e información tecnológica de INIA. 113-127.
- Bestelmeyer BT, Brown JR, Havstad KM, Alexander R, Chavez G, Herrick JE. 2003. Development and use of state and transition models for rangelands. *Journal of Range Manage.* 56:114-126.
- Boggiano P, Zanoniani R, Millot JC. 2005. Respuestas del campo natural a manejos con niveles crecientes de intervención. En: Gómez R, Albicette, M (Eds). Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural. INIA. Serie técnica N° 151. Unidad de agronegocios y difusión de INIA. 105-113.
- Brazier RE, Beven KJ, Feer J, Rowan JS. 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 Surface Processes and Landforms.* 25(8): 825-845.
- Castaño JP, Giménez A, Ceroni M, Furest J, Aunchayna R. 2010. Caracterización Agroclimática del Uruguay 1980-2009 [En línea]. Consultado el 20 de Junio de 2015. Disponible en: www.inia.org.uy/gras/agroclima/cara_agro/.
- Castro E. 1979. Pasturas Naturales. En: 2da Jornada ganadera de suelos arenosos. MGAP, CIAAB (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Centro de Investigaciones Agronómicas A. Boerger). Estación experimental del Norte. 4-6.
- Chartier MP, Rostagno CM. 2006. Soil erosion thresholds and alternative states in northeastern Patagonian rangelands. *Rangeland Ecology and Management.* 59(6):616-624.

- Chescheir GM, Von Stackelberg N, Amatya D, Skaggs R. 2006. Effects of afforestation on the hydrologic behavior of a basin in the Tacuarembó River. Progress Report for 2005-06 submitted to Weyerhaeuser Foundation. Biological and Agricultural Engineering Department, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA.
- CIAAB (Centro de investigaciones agrícolas A. Boerger). 1971. Clima y Agricultura. Ministerio de Ganadería y Pesca – CIAAB. Boletín de Divulgación N° 9. Colonia – Uruguay. 56p.
- Covert SA, Robichaud PR, Elliot WJ, Link TE. 2005. Evaluation of runoff prediction from WEPP-based erosion models for harvested and burned forest watersheds. Transactions of the ASAE 48 (3): 1091-1100.
- Cruz G, Bettolli ML, Altamirano MA, Rudorff F, Martínez A, Arroyo J, Armoa J, De Torres MF, Tito P. 2007. Evaluación de la vulnerabilidad actual y futura de los sistemas pastoriles frente a la variabilidad y al cambio climático: Caso Uruguay. En: Semana de Reflexión sobre Cambio y Variabilidad Climática. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 146 - 173.
- Delgado S, Alliaume F, García Préchac F, Hernández J. 2006. Efecto de las plantaciones de *Eucalyptus* sp. sobre el recurso suelo en Uruguay. Agrociencia. Vol. 10(2):95-107.
- De Regoyos Sáinz M, García y García AI, Ayuga Téllez, F, Martínez Alvarez V. 2002. Validación del modelo de estimación de la erosión “WEPP” como herramienta para la evaluación de estrategias de gestión y control de los recursos naturales a diferentes escalas de actuación. 2225-2237.

- deVries DA. 1963. Thermal properties of soils. En: van Wijk, W.R. (Eds). Physics of plant environment. North Holland Pub. Co., Amsterdam. 210-235.
- dos Santos LL, Srinivasan VS, de Aragão R. 2010. Parametrização do modelo WEPP em duas sub-bacias do semi-árido Paraibano. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay. 2010.
- Dunne T. 1978. Field studies of hillslope flow processes. Hillslope Hydrology. 227: 227-293.
- Durán A. 1995. Orden III: Suelos saturados lixiviados. Orden IV: Suelos desaturados lixiviados. En: Los suelos del Uruguay. Montevideo. Hemisferio Sur. pp. 187-256.
- Edeso J, Marauri P, Merino A, González M^a J. 1997. Determinación de la tasa de erosión hídrica en función del manejo forestal: La cuenca del río Santa Lucía (Gipuzkoa). Lurralde: Investigación y espacio. (20): 67-104.
- Falco L. 1996. Estudio de suelos en el Departamento de Tacuarembó a escala 1:100000. Formación Tacuarembó. Mesozoico Triasico. MGAP (Ministerio de ganadería, agricultura y pesca)- Dirección de Suelos – I.M.Tacuarembó. 51 p.
- Flanagan DC, Ascough II, JC, Nieber, JL, Misra D, Douglas-Mankin KR. 2013. Advances in soil erosion research: processes, measurement, and modeling. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 56(2): 455-463.

- Flanagan DC, Gilley JE, Franti TG. 2007. Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(5):1603-1612.
- Flanagan DC, Ascough II, JC, Nearing MA, Laflen JM. 2001. The Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model. En: Harmon RS, Doe WW, III (Eds). *Landscape Erosion and Evolution Modeling*. Kluwer Academic/Plenum Publishers. 145–199.
- Flanagan DC, Ascough AD, Nicks MA, Nearing MA, Laflen JM. 1995. Overview of the WEPP erosion prediction model. En: Flanagan DC, Nearing MA (Eds). *USDA – Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation*. USDA – ARS – NSERL Report No.10. NSERL, West Lafayette. 1-12.
- Flanagan DC, Livingston SJ. 1995. USDA Hillslope profile and watershed model documentation. En: USDA-ARS-USDI (Eds). *Technical documentation. Water Erosion Prediction Project (WEPP)*. Rep. No 10. NSERL West Lafayette. 11.1-11.9.
- Flavelle P. 1992. A quantitative measure of model validation and its potential use for regulatory purpose. *Advances in water resources*. 15 (1): 5-13.
- Gándara J. 2013. Curso estacional del estado hídrico, crecimiento y actividad fotosintética en un rodal de *Pinus taeda* L. en Uruguay. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 96 p.
- Gardner RH, Rojder B, Bergstrom U. 1983. PRISM: a systematic method for determining the effect of parameter uncertainties on model predictions.

Technical Report, Studsvik Energiteknik AB report NW-83-/555. Sweden, Nyköping.

Ghidey F, Alberts EE. 1996. Comparison of measured and WEPP predicted runoff and soil loss for Midwest claypan soil. Transactions of the ASAE. 39(4): 1395-1402.

Gonçalves FA. 2008. Validação do modelo WEPP na predição de erosão hídrica para condição edafoclimática da região de Vicosá-MG. Tese de Pós Graduação em Engenharia Agrícola para obtenção do título de Doctor Scientiae. Universidade Federal de Viçosa. Brasil.

Gronsten HA, Lundekvam H. 2006. Prediction of surface runoff and soil loss in southeastern Norway using the WEPP hillslope model. Soil and Tillage Research 85(1–2): 186–199.

Grosskoff R, Saavedra C, Hernández A, Martín D, Tommasino H, Grasso A. 2003. La actividad forestal a través del Censo Agropecuario. Estadísticas Agropecuarias. MGAP-DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Económicas Agropecuarias).

Harrison SR. 1990. Regression of a model on real-system output: an invalid test of model validity. Agricultural Systems. 34 (2): 183-190.

Harrison LP. 1963. Fundamental concepts and definitions relating to humidity. En: Wexler A. (Ed). Humidity and Moisture. Reinhold Publishing Company. 3: 3-70.

Horton RE. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. Transactions Americans Geophysical Union. 14 (1):460-466.

Hursh CR. 1936. Storm-water and absorption. Transactions Americans Geophysical Union. 17 (2): 301-302.

- Jensen ME. 1974. Consumptive use of water and irrigation requirements. Irrigation Water Requirements, Irrigation and Drainage. Div. ASCE. 227.
- Jorge G, Vázquez N, Pérez Bidegain M, Sawchik J, Terra J. 2010. Empleo de un modelo físico para la estimación de escurrimiento y erosión en Uruguay: Primera aproximación. En: Reunión Técnica: Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos. Colonia, Uruguay.
- Laflen JM. 2010. Application of WEPP to sustainable management of a small catchment in southwest Missouri, US, under present land use and with climatic change. Handbook of erosion modeling. 168-185.
- Laflen JM, Flanagan DC, Engel B. 2004. Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP. Journal of the American Water Resources Association. 40:289-297.
- Laflen, JM, Flanagan DC, Ascough JC, Weltz MA, Stone JJ. 1994. The WEPP model and its applicability for predicting erosion on rangelands. Soil Science Society of America, Special publication 38: 11-22.
- Lane LJ, Stone JJ. 1983. Water balance calculations, water use efficiency, and above ground net production. En: Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest. Arizona-Nevada Academy of Science.
- Larose M, Oropeza-Mota JL, Norton D, Turrent-Fernández A, Martínez-Menes M, Pedraza-Oropeza JA, Néstor Francisco-Nicolás. 2004. Application of the wepp model to hillside lands in the tuxtlas, Veracruz, México. Agrociencia. 38 (2): 155-163.
- Laterra P, Rivas M. 2005. Bases y herramientas para la conservación in situ y el manejo integrado de los recursos naturales en los Campos y Pampas del Cono Sur. Agrociencia, 9(1-2): 169-178.

- Legates DR. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*. 35 (1): 233-241 pp.
- León R. 1992. Río del Plata grasslands. Regional sub-divisions. RT Coupland editores. *Ecosystems of the World*. Amsterdam. (8): 376-407.
- Lezama F, Altesor A, Pereira M, Paruelo JM. 2011. Descripción de la heterogeneidad florística de las principales regiones geomorfológicas de Uruguay. En: Altesor A, Ayala W, Paruelo J M (Eds). *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales.. Serie FPTA N° 26*.
- Luce CH. 1995. Forests and wetlands. En: Ward, A. D., Elliot, W. J. (Eds). *Environmental Hydrology*. 253-283.
- Maria IC, Chaves MO, Dechen SCF. 2001. Comparação dos resultados do modelo WEPP com os obtidos em condições de chuva natural, por sete anos, em um latossolo vermelho distroférico típico em campinas, sp. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia (GO), 03 a 06 de mayo de 2001. pp 1-7.
- Martin TN, Dourado-Neto D, Storck L, Burael P, Santos EA. 2008. Regiões homogêneas e tamanho de amostra para atributos do clima no estado de São Paulo, Brasil. *Ciência Rural* 38 (3): 690-697.
- Mayer DG, Stuart MA, Swain A. J. 1994. Regression of real world data on model outuput: an appropriate overall test of validity. *Agricultural Systems*. 45 (1): 93-104.
- MGAP (Ministerio de ganadería, agricultura y pesca), FAO (Food and Agriculture Organization). 2013. *Adaptación a la variabilidad climática*.

Informe en el marco del proyecto TCP–FAO 3302. Montevideo. [En prensa].

MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). Dirección General Forestal. 2003. Boletín estadístico, Año 4, N° 3. Dirección General Forestal, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Montevideo, Uruguay.

Mitchell PL. 1997. Misuse of regression for empirical validation of models. *Agricultural Systems*. 54 (3): 313-326.

Molnar P. 2011. "Calibration". *Watershed Modelling*, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.

Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I – A discussion of principles, *Journal of Hydrology*. 10(3): 282-290.

Nearing MA, Lane LJ, Alberts EE, Laflen JM. 1990. Prediction technology for soil erosion by water: Status and research needs. *Soil Science Society of America Journal*. 54 (6): 1702-1711.

Nearing MA, Foster GR, Lane LJ, Finkner SC. 1989. A process-based soil erosion model for USDA – Water erosion prediction project technology. *Transactions of the ASAE* 32 (5): 1587-93.

Nicks AD, Lane LJ, Gander GA. 1995. Weather generator. En: USDA-ARS-USDI (ed). Technical documentation. Water Erosion Prediction Project (WEPP). Rep. 10. NSERL West Lafayette, Indiana, USA. pp: 2.1-2.7.

Pandey A, Chowdary VM, Mal VC, Billib M. 2009. Application of the WEPP model for prioritization and evaluation of best management practices in an Indian watershed. *Hydrological processes*. 23 (21): 2997-3005.

- Penman HL. 1963. Vegetation and Hydrology. *Soil Science*. 96 (5): 357.
- Pereira, M. 2011. Manejo y conservación de las pasturas naturales del Basalto. Instituto Plan Agropecuario. 78p.
- Pérez Arrarte C. 2007. Plantaciones forestales e impactos sobre el ciclo del agua. Un análisis a partir del desarrollo de las plantaciones forestales en Uruguay. Fonseca, E (Eds). Grupo Guayubirá. Montevideo, Uruguay. 1-56.
- Pérez Gomar, E. 1999. Sistema solo-planta de campo nativo submetido ao uso de herbicidas para sementeira direta de forrageiras de estacao fría. Tesis de Maestrado. Santa María, Brasil. Universidade Federal de Santa María. 81p.
- Pieri L, Bittelli M, Wu JQ, Dun S, Dennis C, Flanagan DC, 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 (1): 84-97.
- Piñeiro G. 2011. Impactos de la ganadería sobre la dinámica del C y N en los pastizales del Río de la Plata. En: Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. FPTA (Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria) N° 175. INIA. pp 79-96.
- Prodan M, Peters R, Cox F, Real P. 1997. Mensura forestal. Serie investigación y educación en desarrollo sostenible. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José. Costa Rica. 586p.
- Rachman A, Anderson SH, Alberts EE, Thompson AL, Gantzer CJ. 2008. Predicting runoff and sediment yield from a stiff stemmed grasses hedge system for a small watershed. *Transactions of the ASABE*. 51(2): 425-432.

- Raclot D, Albergel J. 2006. Runoff and water erosion modeling using WEPP on a Mediterranean cultivated catchment. *Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C.* 31 (17): 1038-1047.
- Rauscher HM, Young MJ, Webb CD, Rohison DJ. 2000. Testing the accuracy of growth and yields models for Southern hardwood forests. *Southern Journal of Applied Forestry.* 24 (3): 176-185.
- Reckhow KH, Clements JT, Dodds RC. 1990. Statistical evaluation of mechanistic water-quality models. *Journal of Environmental Engineering.* 116 (2): 250-268.
- Renschler CS. 2003. Designing geo-spatial interfaces to scale process models: The GeoWEPP approach. *Hydrological Processes.* 17 (5): 1005-1017.
- Reyes MR, Skaggs RW, Bengtson RL. 2004. GLEAMS-SWT with nutrients. *Transactions of ASAE* 47(1): 129-132.
- Reynolds MR Jr. 1984. Estimating the error in model predictions. *Forest Science.* 30 (2): 454-469.
- Risso D, Ayala W, Bermúdez R, Berretta E. 2005. Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural. INIA. Serie Técnica N° 151. 123p.
- Ritchie JT. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8(5): 1204-1213.
- Romero CC, Stroosnijder L. 2002. Evaluación del comportamiento del modelo de erosión WEPP bajo condiciones de los Andes: Caso La Encanada-Perú. Editorial Agraria. 98 p.
- Sacco G, Falco L. 1975. Estudio semi-detallado de suelos. Estación Experimental del Norte, Departamento de Tacuarembó. CIAAB. MGAP-

(Centro de investigaciones agrícolas A. Boerger y Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca) Dirección de Suelos y Fertilizantes. 24p.

Sargent RG. 1999. Validation and verification of simulation models. Proceedings of the Winter Simulation Conference. 39-48.

Savabi MR, Williams JR. 1995. Water Balance and Percolation. WEEP Document.

Savabi MR, Young RA, Benoit GR, Witte JM, Flanagan DC. 1995. Winter Hydrology. Citeseer.

Savabi MR, Stott DE. 1994. Plant residue impact on rainfall interception. Transaction of the ASAE. 37(4): 1093-1098.

Schlesinger S, Crosbie RE, Gagné RE, Innis GS, Lalwani CS, Loch J, Bartos D. 1979. Terminology for Model Credibility. Simulation. 32 (3): 103–104.

Shen ZY, Gong YW, Li YH, Hong Q, Xu L, Liu RM. 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 (10): 1435-1442.

Silveira L, Chreties C, Alonso J, Amorín C, De Izaguirre P, Crisci M, Symonds S, Martínez L, García M, García F, Delgado S, Clérici C, Bentancor L, Hill M, Alliaume F, Cabral P, Audicio P, Iroumé A, Huber A, Schipilov A. 2010. Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas. Serie FPTA-INIA 32.

Silveira L, Martinez L, Alonso J. 2003. Efecto de la sustitución de campo natural por plantaciones forestales, sobre los recursos hídricos en el

Uruguay. En: Tercer Congreso Latinoamericano de manejo de cuencas hidrográficas. Arequipa. Perú.

Simanton JR, Renard KG. 1992. Upland erosion research on rangeland. En: Parsons AJ, Abrahams AD. (Eds). Overland flow: Hydraulics and erosion mechanics. UCL Press (University College), London. 438 pp.

Simanton JR, West LT, Weltz MA, Wingate GD. 1987. Rangeland experiments for Water Erosion Prediction Project. ASAE Paper 87-2545.

Sloan PG, Moore ID. 1984. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*. 20(12):1915-1822.

Sloan PG, Moore ID, Coltharp GB, Eigel JD. 1983. Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds. *Water Resources Inst., University of Kentucky, Lexington, KY*. Rep. 142. 167pp.

Soto B, Díaz-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(4): 257-270.

Stolpe NB. 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 Science* 55(1): 2-8.

Tedeschi LO. 2006. Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems* 89(2): 225-247.

Thorntwaite CW, Mather Jr. 1955. *The Water Balance*. Drexel Institute of Technology. Laboratory of Climatology, Centerton, NJ, USA.

- Tiscareno-López M, Lopes VL, Stone JJ, Lane LJ. 1993. Sensitivity analysis of the WEPP watershed model for rangeland applications I: Hillslope processes. American Society of Agricultural Engineers 0001-2351/93/3606-1659.
- Tiwari AK, Risse LM, Nearing MA. 2000. Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. American Society of Agricultural Engineers. 43(5):1129-1135.
- Uruguay. Poder Legislativo. 1987. Ley N° 15939. Ley Forestal, aprobación y declaración de interés nacional [En línea]. Consultado 10 de junio 2015. Disponible en: https://www.mef.gub.uy/innovaportal/file/1707/1/ley_15939.pdf
- Verma AK, Jha MK, Mahana RK. 2010. Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing and geographical information system. Paddy and Water Environment. 8(2): 131–144.
- Williams JD, Dun S, Robertson DS, Wu JQ, Brooks ES, Flanagan DC, McCool DK. 2010. WEPP simulations of dry land cropping systems in small drainages of northeastern Oregon. Journal of soil and water conservation 65(1): 22-33.
- Wischmeier WH, Smith DD. 1978. Predicting Rainfall-Erosion Losses: A Guide to Conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Handbook No. 537.
- Yu B. 2003. An assessment of uncalibrated CLIGEN in Australia. Agricultural and Forest Meteorology. 119(3): 131-148.

Yu-Jun Cui, Zornberg JG. 2008. Water balance and evapotranspiration monitoring in geotechnical and geoenvironmental. *Geotechnical and Geological Engineering*. 26(6): 783-798.

Zelege G. 2001. Application and adaptation of WEPP to the traditional farming systems of the Ethiopian Highlands (with special emphasis on the new Breakpoint climate data generator, BPCDG). [En línea]. Consultado el 5 de mayo de 2015. Disponible en: <http://www.tucson.ars.ag.gov/isco/isco10/SustainingTheGlobalFarm/P228-Zeleke.pdf>.

Zelege GT, Flanagan DC. 1999. BPCDG: Breakpoint Climate Data Generator for WEPP using observed climate standard weather data sets. [En línea]. Consultado el 10 de setiembre de 2014. Disponible en: <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/BPCDG.html>.