

VALIDACIÓN DEL GENERADOR CLIMÁTICO CLIGEN PARA PREDECIR LA EROSIÓN HÍDRICA EN EL NORTE DE LA REGIÓN PAMPEANA, ARGENTINA

JORGE JESUS GVOZDENOVICH^{*1-2}; MARIO PÉREZ BIDEGAIN³; PEDRO BARBAGELATA¹⁻² & LEONARDO NOVELLI²

Recibido: 23-09-16

Recibido con revisiones: 13-12-16

Aceptado: 20-12-16

RESUMEN

Las actividades agropecuarias están generalmente orientadas al aumento de los rendimientos de los cultivos, maximizando el uso del recurso suelo. En este escenario, el clima juega un rol muy importante. Por esto es necesario contar con modelos que simulen adecuadamente los patrones climáticos, tanto para el crecimiento de los cultivos como para el estudio de los procesos erosivos. El generador climático CLIGEN genera patrones de tormenta, insumo necesario para muchos modelos físicos hidrológicos como el Water Erosion Prediction Project (WEPP). Este modelo puede ser aplicado a una amplia gama de topografías, escenarios de vegetación, condiciones del suelo y climas, para estimar producción de sedimentos y escurrimiento. La validación del modelo CLIGEN es una condición primordial para su posterior inclusión y correcto funcionamiento del modelo WEPP. El objetivo de este estudio fue validar el generador climático CLIGEN para la estación meteorológica de Paraná, Entre Ríos con datos de precipitación y temperatura. Los resultados indican que la precipitación promedio anual, mensual y diaria son satisfactoriamente simuladas por CLIGEN. Para las temperaturas máxima anual, máxima mensual y mínima mensual, no se observó diferencia significativa entre los datos medidos y los generados por el modelo. El modelo climático CLIGEN reprodujo en forma satisfactoria los parámetros promedios de todas las variables de precipitación y temperatura. Esto nos permite establecer que CLIGEN podría utilizarse con un elevado nivel de confianza para simular en forma diaria, mensual o anual distintos escenarios climáticos futuros que alimenten modelos que estiman la pérdida de suelos como USLE, RUSLE o WEPP en nuestra región. El uso de CLIGEN en el modelo WEPP podría contribuir a generar distintos escenarios climáticos para poder predecir situaciones de riesgo de erosión hídrica.

Palabras clave. Clima, precipitación, temperatura, erosión hídrica.

VALIDATION OF CLIGEN CLIMATE GENERATOR TO PREDICT WATER EROSION IN THE NORTHERN ARGENTINEAN PAMPAS REGION

ABSTRACT

The current agricultural production is mainly focused in increase crops yield by optimizing soil resource use, in which climate has an important role. Therefore, it is necessary to consider models that simulate adequately climate patterns that affect not only crops growing but also soil erosive process. The climate generator CLIGEN generates storm patterns which are required by many hydrological physical models. For example, the Water Erosion Prediction Project (WEPP) applies the model to a wide range of topographies, vegetation, soil conditions, and weather to estimate sediment production and runoff. CLIGEN model validation is a primary condition for a subsequent inclusion and proper operation of the WEPP model. The objective of this work was to validate CLIGEN climate generator for precipitation and temperature for the weather station of Parana, Entre Rios. The results indicate that the annual, monthly and daily average precipitation was successfully simulated by CLIGEN. The annual maximum, monthly maximum, and monthly minimum temperature showed not significant differences between the observed and estimated data. The CLIGEN model simulated adequately the averaged parameters of all variables of precipitation and temperature. This result indicate that CLIGEN could be used with a high level of confidence to simulate, on a daily, monthly or yearly basis, different climate scenarios to feed models that estimate soil loss, like USLE, RUSLE, and WEPP in our region. The use of CLIGEN in WEPP model could provide reliable data useful to generate climate risk situations of soil water erosion.

Key words. Weather, precipitation, temperature, water erosion.

1. INTA EEA Paraná.

2. FCA UNER (Facultad de Ciencias Agropecuarias-Universidad Nacional de Entre Ríos).

3. Facultad de Agronomía-Universidad de la República-Uruguay

* Autor de contacto: gvozdzenovich.jorge@inta.gob.ar>

INTRODUCCIÓN

El factor climático juega un rol sustancial como desencadenante del proceso erosivo, por lo que disponer de modelos que permitan reproducir algunos parámetros climáticos con un adecuado ajuste regional es de suma importancia ya que permitirá obtener predicciones más precisas de las tasas de erosión.

El uso de modelos que generen diferentes climas ha aumentado en la actualidad por sus amplias prestaciones y facilidad de crear escenarios climáticos variados. Estos modelos son usados para generar series de datos donde las mediciones existentes son de corto tiempo o donde faltan datos. Los generadores de clima sintéticos pueden ser usados para originar series diarias, mensuales y anuales, componiendo un variado espectro de climas que capturan las características esenciales de los datos meteorológicos observados, necesarios para el funcionamiento de los modelos (Richardson, 1981; Nicks & Gander, 1994). Dentro de este tipo de modelos estocásticos, los más usados son el GEM (Johnson, 2001), CLIGEN (Nicks *et al.*, 1995), WXGEN (Wallis & Griffiths, 1995), USCLIMATE (Hanson *et al.*, 1994), y los que incorporan generadores de climas como los modelos WEPP (Flanagan & Nearing, 1995), SWAT (Arnold *et al.*, 1995), SWRRB (Arnold & Williams, 1994, 1989), GLEAMS (Knisel, 1993) y EPIC (Sharpley & Williams, 1990).

Dentro de los generadores climáticos diarios comúnmente utilizados, CLIGEN es el único que genera los patrones de tormenta (duración de tormenta, tiempo hasta alcanzar el pico máximo de la tormenta y su máxima intensidad), requeridos por muchos modelos físicos hidrológicos y de recursos naturales (Yu, 2000). CLIGEN es un generador que estima de forma diaria la precipitación, temperatura, temperatura del punto de rocío, viento y radiación solar, usando parámetros mensuales, derivado de mediciones históricas. En las simulaciones, se generan estimaciones para cada parámetro de forma independiente, excepto para temperatura máxima, mínima y punto de rocío. Las simulaciones realizadas con CLIGEN para reproducir las distribuciones históricas mensuales son buenas (Meyer *et al.*, 2002).

El modelo CLIGEN fue desarrollado inicialmente como parte del modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP) (Flanagan & Nearing, 1995). El modelo WEPP es de base física, desarrollado para ser aplicado a una amplia gama de topografías, escenarios de vegetación, condiciones del suelo y climas, donde se requiera estimar la producción de

sedimentos y escurrimiento. El generador climático independiente, CLIGEN, fue adoptado para generar la información climática diaria, incluyendo la cantidad de lluvia y la duración, requerida por el modelo WEPP (Nicks & Lane, 1989 y Baffaut *et al.*, 1996).

Algunos estudios de validación para evaluar la escorren-tía y pérdida de suelo con el modelo WEPP han utilizado la cantidad de precipitación medida, duración y tiempo hasta que se alcanza el pico máximo de la tormenta (como una fracción de la duración de la misma), y la intensidad media de precipitación, y temperatura máxima y mínima como archivos de entrada en CLIGEN (Zhang *et al.*, 1996).

También se ha reportado comparaciones de escorren-tía y pérdida de suelo obtenidos con el modelo WEPP, usando el generador CLIGEN comparado con los patrones de tormenta medidos para cuantificar la predicción del error asociado con los patrones de tormenta generados (Zhang, 2003 y Williams *et al.*, 1984). El modelo CLIGEN ha demostrado ser lo suficientemente robusto para generar distintas características del clima en diferentes partes del mundo, e.g. EEUU (Johnson *et al.*, 1996; Headrick & Wilson, 1997; Zhang & Garbrecht, 2003), Uganda (Elliot & Arnold, 2000), Australia (Yu, 2005), China (Kou *et al.*, 2007), Corea (Min *et al.*, 2011), Uruguay (Jorge, 2012).

A pesar de las múltiples ventajas del uso de CLIGEN en distintas partes del mundo, este modelo tiene aún escasa aplicación y no hay registro de su utilización para el clima templado húmedo de la Argentina (Kottek *et al.*, 2006). La validación del modelo CLIGEN con datos de precipitación y temperatura para una zona de la pampa húmeda es una condición necesaria para su posterior inclusión y correcto funcionamiento del modelo de erosión WEPP. En esta región se desarrolla gran parte de la actividad agrícola del país, la cual ha generado importantes problemas de erosión hídrica.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la precisión del generador climático CLIGEN para estimar datos de precipitación y temperatura en un clima templado húmedo de llanura sin estación seca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

Para realizar la validación de CLIGEN, se utilizaron los datos climáticos (precipitación diaria, temperatura máxima y mínima diarias, humedad relativa, radiación, viento y temperatu-

ra del punto de rocío), del observatorio meteorológico de la Estación Experimental Agropecuaria Paraná del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA EEA Paraná - 31° 50' S - 60° 32' O). Se utilizó esta estación por ser la que cuenta con la mayor cantidad de registros continuos diarios termo-pluviométricos (Saluso, 1999). La precipitación media anual es de 1030 mm con un rango que varía entre 494 y 1818 mm para el período 1934-2010 (76 años de datos, Fig. 1). La temperatura mínima promedio es 13,3 °C y la temperatura máxima promedio es de 23,6 °C.

Para este estudio se utilizó el período comprendido entre 1970 y 2010, ya que se contó con todas las variables de entrada necesarias para CLIGEN. La precipitación horaria y máxima se registró con un pluviógrafo y mediante lectura de fajas se obtuvo la intensidad máxima de la tormenta. Las temperaturas máximas y mínimas se registraron con termómetro de máxima y mínima, respectivamente. La humedad relativa media máxima y mínima se midió con un psicrómetro higrógrafo. La radiación solar media diaria se registró con un solarímetro digital. El punto de rocío se midió con psicrómetro sin ventilación artificial y la velocidad media diaria del viento con un anemómetro.

Para alimentar al generador climático se utilizaron los datos citados anteriormente y se calcularon los siguientes estadísticos: media, desviación estándar, asimetría de precipitación mensual (obtenido a partir de datos diarios de lluvia), la pro-

babilidad de un día húmedo después de un día húmedo (W/W), y la probabilidad de un día húmedo después de un día seco (W/D). Se determinó la temperatura máximas y mínimas promedios mensuales (°C) y sus desvíos estándar. Se midió la radiación solar, velocidad y dirección del viento, máxima precipitación en 30 minutos, intensidad de la tormenta (mm hr^{-1}). Cada parámetro se calculó en forma mensual (12 valores). Se usó CLIGEN versión 4.3.

Validación CLIGEN

Las variables climáticas utilizadas en este trabajo para la validación del CLIGEN fueron precipitación y temperatura. El estudio de estas variables (a diferencia de las otras variables climáticas consideradas por CLIGEN) es de particular importancia, ya que la predicción de producción de sedimentos y escurrimiento es muy sensible a la precipitación y la temperatura (Zhang, 2003, Yu, 2002; Nearing *et al.*, 1990).

Para la validación, se ingresaron al CLIGEN los datos de precipitación y temperatura de 40 años (1970-2010), y se generó una secuencia de 400 años de precipitación y temperatura diaria para el sitio en estudio, esta secuencia luego se subdividió en 10 secuencias de 40 años cada una. La razón para subdividir una secuencia larga en subsecuencias, en lugar de ejecutar el generador varias veces para producir secuencias de 40 años, es debido a que CLIGEN utiliza un generador de números pseudo-

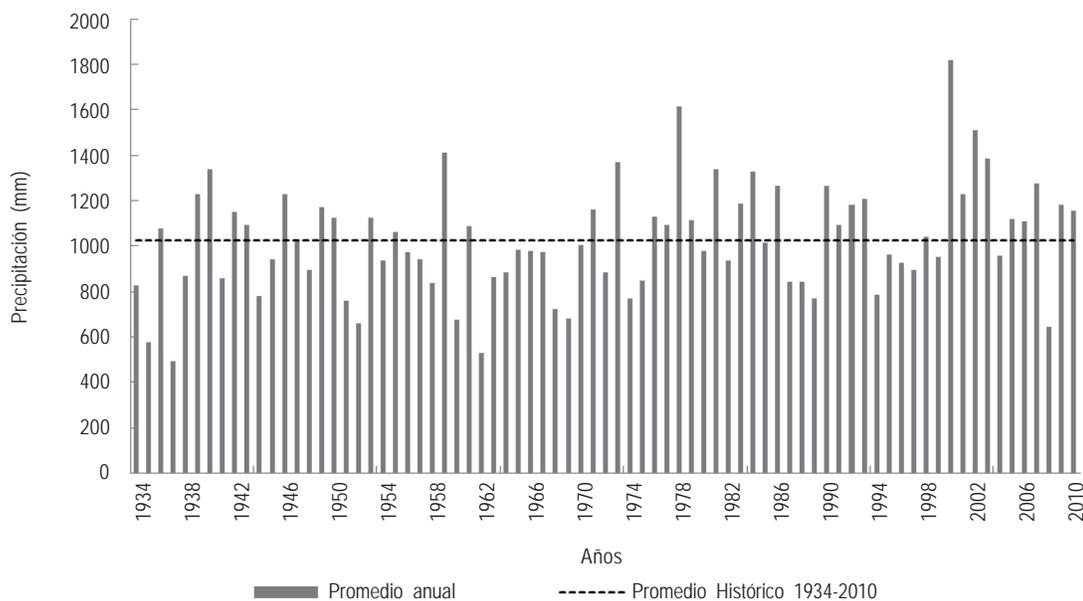


Figura 1. Precipitaciones anuales correspondientes al período 1934-2010 (barras) y al promedio histórico (línea). Datos obtenidos del observatorio agrometeorológico del INTA EEA Paraná.

Figure 1. Annual precipitation from 1934 to 2010 yr (bars), and historical annual precipitation average (line). Data obtained from agro-meteorological observatory, INTA EEA Parana.

aleatorios. Si el origen de la aleatorización no se cambia cada vez que se ejecuta CLIGEN, se producen secuencias idénticas. Las estadísticas de los 10 conjuntos de secuencias generadas para el sitio en estudio, se compararon con los de los registros de precipitación observados (Kou *et al.*, 2007).

A partir de los 40 años de registros observados de los parámetros climáticos para el sitio de estudio, CLIGEN genera secuencias de precipitación diaria, mensual y anual y temperatura anual y mensual máxima y mínima. Los registros de precipitación y temperaturas diarios observados se compararon con cada uno de los 10 conjuntos de secuencias de precipitación y temperatura diaria generados.

Otra forma de validar el modelo CLIGEN fue mediante el uso del modelo WEPP (WEPP versión v2012.8). Se comparó la precipitación y temperatura observada (40 años) vs las estimadas por CLIGEN (400 años), como archivo de entrada climático para el modelo WEPP, además de ingresar las características representativas de la zona pampeana (suelo, manejo y topografía), y a partir de estos datos se estimó la producción de sedimento y escurrimiento.

Para archivos de entrada al modelo, se incorporó al modelo un suelo del sub grupo Argiudol ácuico, (Puentes, 2014). Para el archivo de entrada del manejo, se seleccionó la rotación predominante de la pampa húmeda, obtenida a través del Sistema Integrado de Información Agropecuaria (SIIA, 2014), en donde la rotación agrícola está claramente dominada por el cultivo de soja en un 63% y el resto lo ocupan el maíz, trigo y girasol. La rotación utilizada fue Soja - Trigo/Soja - Soja - Maíz, cinco cultivos en cuatro años. Todos los cultivos se realizaron en siembra directa y fecha de siembra óptima (noviembre/diciembre para soja y maíz, y junio para trigo). Con respecto a los archivos de entrada de topografía, al ser el factor más variable, se utilizó una longitud estándar de 100 m uniforme y un gradiente desde 0,5% (representativo de la zona de sur de Santa Fe), hasta 4% (representativo de las zonas más onduladas de Entre Ríos), con el fin de abarcar las condiciones existentes en el norte de la región pampeana argentina.

Análisis estadístico

Las estadísticas descriptivas calculadas de precipitación y temperatura para CLIGEN con 40 años de datos observados fueron: precipitación promedio mensual, precipitación diaria promedio, probabilidad de un día húmedo después de un día húmedo, probabilidad de un día húmedo después de un día seco, desvío estándar de precipitación, número de días con lluvia, temperatura máxima mensual y su desvío estándar, temperatura mínima mensual y su desvío estándar.

Los registros de precipitación y temperaturas diarias, mensuales y anuales observadas, al igual que cada uno de los 10 conjuntos de secuencias de precipitación y temperaturas diarias, mensuales y anuales obtenidos mediante el modelo CLI-

GEN se compararon entre sí, utilizando la media, desvío estándar, coeficiente de variación, máximo y mínimo valor de precipitación, Kurtosis, asimetría, y un t-test para evaluar la diferencia entre las medias ($P > 0,01$). Principalmente, la prueba t se basa en la hipótesis de normalidad y la igualdad de la varianza.

Para evaluar los datos de sedimento y escurrimiento estimados mediante WEPP, a partir de los datos precipitación y temperatura observados y generados por CLIGEN, se utilizó la media, el coeficiente de determinación (R^2) y el error relativo (ER, que es el cociente de la división entre el error absoluto y el valor exacto, si se multiplica por 100 se obtiene el % de error). Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2011).

RESULTADOS

La Tabla 1 presenta los estadísticos generados a partir de las variables medidas en período 1970-2010. Los once parámetros necesarios para generar secuencias utilizando CLIGEN, se calcularon a partir de los 40 años de registros de precipitación y temperatura diaria para el sitio de estudio. Cada parámetro tiene 12 valores correspondientes a los meses del año. Donde se observa un pico de precipitación en marzo y diciembre (153,3 y 132 mm, respectivamente) y disminuyendo a más de la mitad para los meses invernales (junio, julio y agosto). Algo similar ocurre con la temperatura máxima, donde se registran los mayores valores promedios para los meses estivales.

Precipitación

El valor medio de la precipitación promedio anual, muestra que la media anual de precipitación fue satisfactoriamente simulada por CLIGEN. La prueba estadística t, no detectó diferencias significativas entre el valor observado y el estimado ($P > 0,01$). El modelo CLIGEN reprodujo el sesgo con precisión, con valores de la variable asimetría menores a 0,5 (Tabla 2), lo que indica que la reproducción es simétrica. La Kurtosis y la asimetría fueron cercanos a cero, lo cual indica una aproximación a una distribución normal.

Al comparar la precipitación mensual observada para cada uno de los meses en un período de 40 años y los 10 sets de 40 años cada uno estimada por CLIGEN, en todos los meses los datos observados se encontraron dentro del rango de los 10 sets de los datos estimados (Fig. 2a). La precipitación promedio mensual (Tabla 2), mostró que la media mensual de precipitación fue satisfactoriamente simulada por CLIGEN. La prueba t no mostró diferencias

Tabla 1. Parámetros calculados para CLIGEN con 40 años de datos observados (1970-2010).

Table 1. Calculated parameters with CLIGEN for 40 years of observed data (1970-2010).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Pp	114,2	122,2	153,8	109,3	50,5	35,4	27,8	29,4	60,0	110,3	117,1	132,0
Pp D	14,7	15,8	20,1	14,2	9,4	7,4	6,4	7,1	10,9	13,5	14,5	15,5
W/W	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
W/D	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3
DS Pp	81,1	90,5	102,3	95,1	51,3	36,8	23,6	28,4	57,6	75,9	66,1	83,4
Skew Pp	2,1	2,3	3,3	3,5	2,5	2,9	2,9	2,7	4,4	4,6	2,5	2,0
NDLL	7,8	7,8	7,7	7,7	5,4	4,8	4,4	4,1	5,5	8,2	8,1	8,5
Tmax	30,7	29,3	27,5	23,5	20,2	16,9	16,7	18,9	20,9	24,1	26,8	29,4
DS Tmax	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Tmin	19,3	18,5	17,2	13,4	10,7	8,0	7,2	8,1	9,7	13,0	15,2	17,8
DS Tmin	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1

Pp: precipitación promedio mensual en mm. Pp D: precipitación diaria promedio en mm. W/W: probabilidad de un día húmedo después de un día húmedo. W/D: probabilidad de un día húmedo después de un día seco. DS Pp: desvío estándar de Precipitación. NDLL: número de días con lluvia. Tmax: temperatura máxima mensual en °C. DS Tmax: desvío estándar de la Tmax. Tmin: temperatura mínima mensual en °C. DS Tmin: desvío estándar de la Tmin.

Pp: mean monthly precipitation (mm). Pp D: mean daily precipitation (mm). W/W is the probability of wet day after wet day of the same period. W/D is the probability of wet day after dry day of the same period. DS Pp: standard deviation of precipitation. NDLL: number of days with rain. Tmax: monthly maximum temperature (°C). DS Tmax: Tmax standard deviation. Tmin: monthly minimum temperature (°C). DS Tmin: Tmin standard deviation.

Tabla 2. Descripción estadística de la precipitación promedio anual, promedio mensual y diaria; medida y simulada con CLIGEN.

Table 2. Statistical description of annual, monthly, and daily average precipitation measured and estimated with CLIGEN.

Variables	Precipitación promedio (mm)					
	Anual		Mensual		Diaria	
	M	C	M	C	M	C
Media	1030	1097	92,1	89,1	3,1	2,9
Desvío estándar	243	244	44,8	45,1	1,6	1,5
Coefficiente de variación	24	22	48,7	50,61	51,6	50,9
Mínima	494	545	29,6	28,6	1,0	0,9
Máxima	1818	1856	158,6	153	5,3	4,9
Asimetría	0,4	0,4	0,2	-0,2	-0,2	-0,2
Kurtosis	0,6	0,3	-1,4	-1,5	-1,6	-1,6
Prueba t	0,118		0,071		0,099	

M = datos medidos históricos. C = datos estimados con CLIGEN.

M = measured historical data. C = estimated data with CLIGEN.

significativas entre el valor observado y el estimado ($P > 0,01$). Al igual que para la precipitación anual, CLIGEN fue capaz de reproducir el sesgo adecuadamente, con valores menores a 0,5, indicando una reproducción simétrica del mismo. La Kurtosis y la asimetría cercanos a cero, indicaron una aproximación a una distribución normal. En la Figura 2b, se observa la relación de la precipitación men-

sual medida y estimada, con una relación muy cercana a la ideal de 1:1, reflejado en el coeficiente con un $R^2 = 0,99$.

Al analizar la precipitación diaria, considerando los datos observados para el promedio diario en un período de 40 años, comparados con los 10 sets de 40 años cada uno estimada por CLIGEN, se puede apreciar que los valores observados se encontraron dentro del rango de los 10 sets

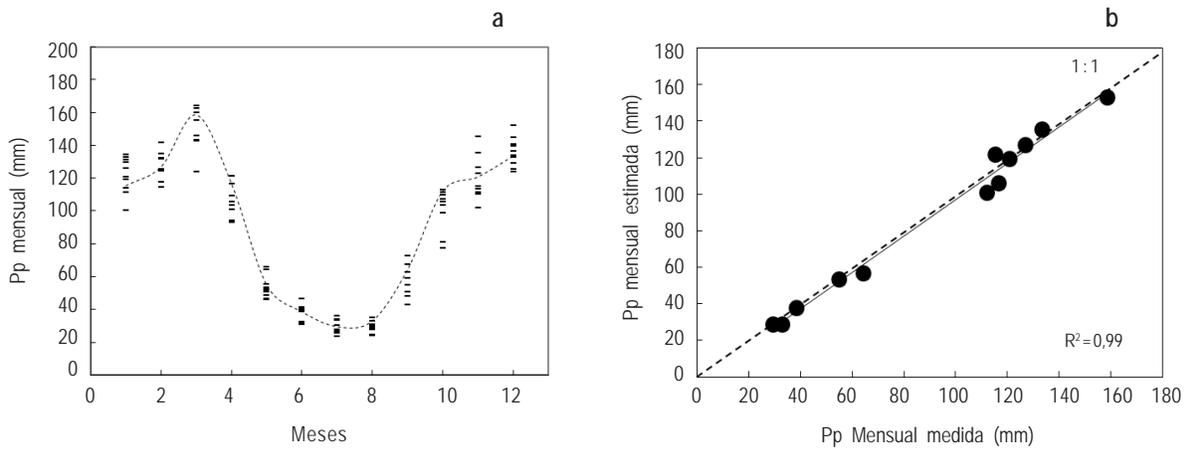


Figura 2. (a) Precipitación mensual promedio medida (línea de puntos) vs precipitación mensual estimada con CLIGEN (puntos), para 400 años divididos en 10 secuencias de 40 años. (b) Precipitación promedio mensual medida vs precipitación promedio mensual estimada.

Figure 2. (a) Observed monthly precipitation (dash line) vs monthly precipitation estimated with CLIGEN (points), for 400 years divided in 10 sequences of 40 years; (b) measured monthly average precipitation vs monthly average precipitation estimated with CLIGEN.

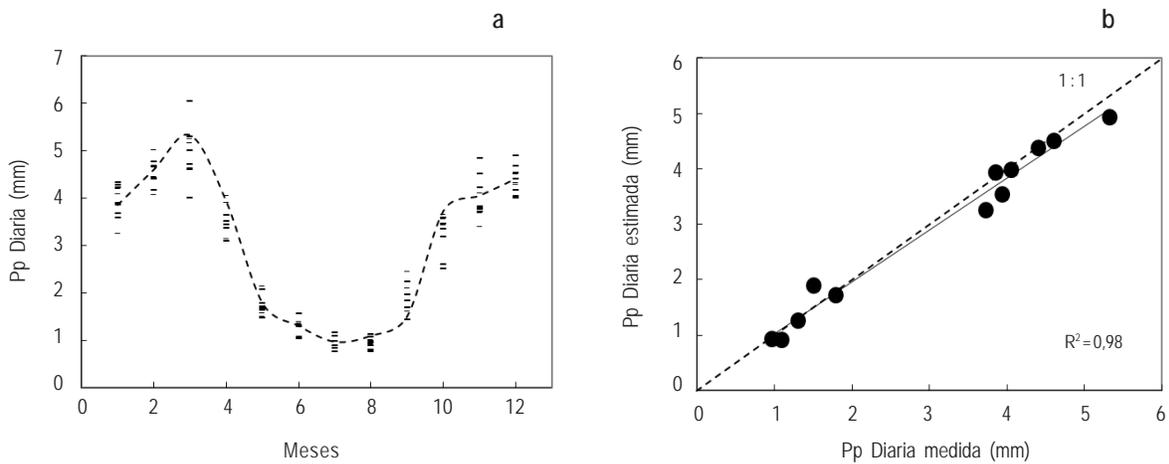


Figura 3. (a) Precipitación diaria medida (línea de puntos) vs precipitación diaria estimada con CLIGEN (puntos), para 400 años dividido en 10 secuencias de 40 años. (b) Precipitación promedio diaria medida vs precipitación promedio diaria medida estimada para cada mes.

Figure 3. (a) Observed daily precipitation (dash line) vs daily precipitation estimated with CLIGEN (points), for 400 years divided into 10 sequences of 40 years; (b) measured daily average precipitation vs estimated daily average precipitation with CLIGEN.

de los valores estimados, similar a lo ocurrido con la precipitación mensual (Fig. 3a). La precipitación promedio diaria (Tabla 2), mostró que la media diaria de precipitación fue satisfactoriamente simulada por CLIGEN. La prueba t , no mostró diferencia significativa entre los valores observados y los estimados ($P > 0,01$). El sesgo fue bien reproducido por CLIGEN, con valores menores a 0,5, lo que indica que la reproducción fue simétrica.

Al comparar la precipitación diaria observada con el promedio de los 10 sets de datos estimados, observamos que CLIGEN reprodujo en forma satisfactoria los datos medidos (Fig. 3b). Comparando el promedio de los 10 sets de datos con el promedio observado, se observó una sobre-estimación, la cual fue máxima para el mes de septiembre. En dicho mes la precipitación promedio diaria observada fue de 1,5 mm y la estimada de 1,9 mm, lo que

constituyó una sobre estimación máxima del 26%. Los valores más bajos estimados por CLIGEN fueron para los meses de abril (3,9 mm vs 3,5 mm) y octubre (3,7 mm vs 3,3 mm), lo que representó una subestimación del 10 y 13%, respectivamente.

Temperatura

En el análisis estadístico de temperatura máxima (Tabla 3), no se observó diferencia significativa entre los datos medidos y los generados por el modelo ($P > 0,01$). El coeficiente de asimetría presentó valores dentro de los ya mencionados, indicando una reproducción satisfactoria el sesgo por parte de CLIGEN. Los valores de Kurtosis fueron cercanos a cero, lo que demostró una aproximación a una

distribución normal de los valores estimados. El modelo CLIGEN reprodujo correctamente el valor máximo de temperatura. El t -test reveló diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,01$) entre las temperaturas mínimas anuales medidas y las simuladas (Tabla 3). El sesgo y la Kurtosis, tuvieron una distribución normal, con valores cercanos a cero.

En la Figura 4 se presentan los datos de temperatura máxima mensual observados, comparado con los 10 sets de 40 años cada uno estimados por CLIGEN. No hubo diferencias significativas entre los valores observados y estimados para ningún mes (Tabla 3), es decir que los datos mensuales observados estuvieron comprendidos dentro

Tabla 3. Descripción estadística del promedio de temperatura máxima anual, mínima anual, máxima mensual, y mínima mensual.

Table 3. Statistical description of annual maximum and minimum, and monthly maximum and minimum average temperature.

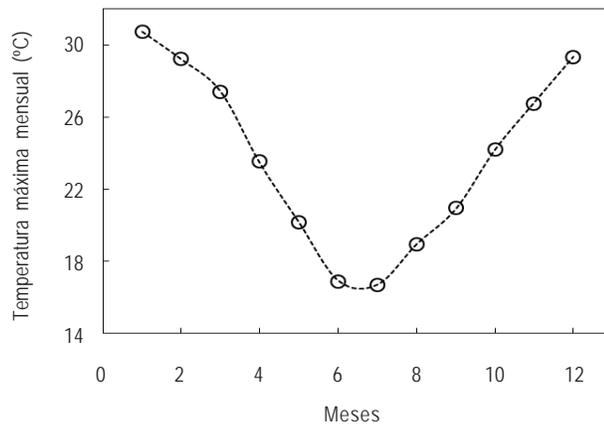
Variables	Temperatura promedio (°C)							
	Anual				Mensual			
	Máxima		Mínima		Máxima		Mínima	
	M	C	M	C	M	C	M	C
Media	23,8	23,7	12,6	13,1	23,7	23,7	13,2	13,2
Desvío estándar	0,69	0,09	0,69	0,08	4,99	5,00	4,42	4,40
Coefficiente de variación	2,9	0,4	5,4	0,6	21,0	21,1	33,6	33,4
Mínima	21,9	23,5	11,3	12,9	16,7	16,7	7,1	7,2
Máxima	25,4	23,9	14,9	13,3	30,8	30,7	19,3	19,3
Asimetría	23,8	23,7	12,9	13,1	-0,07	-0,07	0,01	0,01
Kurtosis	-0,16	-0,05	0,03	0,01	-1,41	-1,40	-1,48	-1,48
Prueba t	0,216		0,001		0,824		0,586	

M = datos medidos históricos. C = datos estimados con CLIGEN.

M = measured historical data. C = estimated data with CLIGEN.

Figura 4.
Temperatura máxima mensual observada (línea de puntos) vs temperatura máxima mensual estimada con CLIGEN, para 400 años dividido en 10 secuencias de 40 años (círculos).

Figure 4.
Monthly maximum temperature observed (dash line) vs monthly maximum temperature estimated with CLIGEN for 400 years divided into 10 sequences of 40 years (circles).



del rango de los 10 sets de los datos estimados ($P > 0,01$). En la misma Figura 4, se observan círculos negros vacíos, cada círculo son los 10 sets de datos. Al ser tan pequeña la variación, de 0,1 a 0,001 °C, la escala no alcanza a captar la diferenciación. Las variaciones entre lo observado y lo medido no superaron en ningún caso el 0,2%, lo cual indica que las estimaciones de temperaturas máximas mensuales realizadas con el modelo CLIGEN fueron muy precisas.

En la Figura 5, se presentan los valores de temperatura mínima promedio mensual observada y la de los 400 años generada con CLIGEN, dividida en 10 secuencias de 40 años cada una. La temperatura mínima mensual presentó un comportamiento similar a la temperatura máxima mensual, no habiendo diferencia significativa (Tabla 3) para ningún mes entre los valores observados y los estimados ($P > 0,01$).

Es decir, que los datos mensuales mínimos observados se encuentran dentro del rango de los 10 sets de los datos estimados. La magnitud de la variación de la temperatura fue tan pequeña (de 0,1 a 0,001 °C), que no se alcanza a apreciar debido a la escala del gráfico. Los círculos negros vacíos incluyen los 10 sets de datos.

El modelo CLIGEN y los resultados obtenidos con el modelo WEPP

Los resultados de las simulaciones para estimar el escurrimiento superficial y la producción de sedimentos con el modelo WEPP, a partir de los 40 años de datos observados vs 400 años de datos simulados (Tabla 4), fueron satisfactorios para los parámetros estadísticos analizados ($R^2 > 0,95$ y $ER < 9\%$).

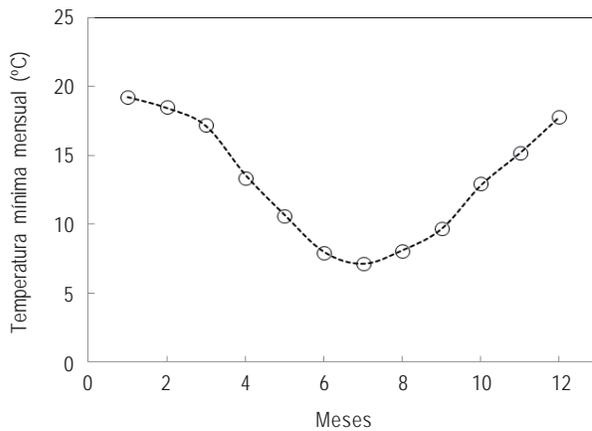


Figura 5.

Temperatura mínima mensual observada (línea de puntos) vs temperatura mínima mensual estimada con CLIGEN, para 400 años dividido en 10 secuencias de 40 años (círculos).

Figure 5.

Monthly minimum temperature observed (dash line) vs monthly minimum temperature estimated with CLIGEN for 400 years divided into 10 sequences of 40 years (circles).

Tabla 4. Producción de sedimentos y escurrimiento estimados con el modelo WEPP para diferentes pendientes en base a datos de clima observados y a datos generados por el modelo CLIGEN.
Table 4. Estimated sediment and runoff yield for different land slopes using WEPP based on CLIGEN and observed meteorological data.

Pendiente %	Sedimento		Escurrimiento	
	Basado en datos observados	Basado en CLIGEN	Basado en datos observados	Basado en CLIGEN
	Mg ha ⁻¹ año ⁻¹		mm	
0,5	10,9	10,5	247,7	234,0
1	12,6	12,1	258,2	235,9
1,5	15,5	14,8	264,1	241,6
2	20,7	19,5	268,6	245,5
2,5	27,1	25,5	271,5	248,7
3	34,1	32,3	274,5	251,4
3,5	41,8	39,5	277,1	254,0
4	49,7	47,0	279,4	256,2

Al evaluar la relación entre producción de sedimentos estimada por el modelo WEPP a partir de datos climáticos medidos vs estimados, se detectó un muy buen ajuste ($R^2 = 0,99$ y $ER = 5,3\%$) con los datos alineados sobre la relación 1:1, lo que indica que el modelo simuló satisfactoriamente la producción de sedimentos (Fig. 6a). La prueba de t confirma este resultado, no detectándose diferencias estadísticas significativas entre las medias ($P = 0,84$).

Al analizar la relación entre la escurrentía estimada por el modelo WEPP a partir de datos observados para 40 años vs. la generada para 400 años con CLIGEN, de manera similar a lo presentado anteriormente, se detectó un buen ajuste del modelo ($R^2 = 0,95$ y $ER = 8,1\%$) (Fig. 6b), aunque fue evidente una subestimación significativa para el promedio de las pendientes estudiadas, confirmada mediante la prueba t ($P < 0,001$). Esta sub estimación varió de 13,7 mm con 0,5% de pendiente a 23,2 mm con 4% de pendiente, con un promedio anual de 22 mm escurridos. Esto representa una disminución en la escurrentía simulada del 8,1%, respecto a la observada, y del 2% respecto a la precipitación promedio anual (1080 mm).

DISCUSIÓN

La precipitación media anual observada no difirió significativamente de la estimada (Tabla 2), coincidiendo con lo reportado por Kou *et al.*, (2007).

En el análisis de la precipitación mensual (Fig. 2), la máxima sobre-estimación promedio se observó en marzo, con un valor de 187,3 mm (este valor es uno de los 10 valores estimados). La media de precipitación de los datos mensuales observados para este mes es de 158,6 mm, lo cual constituye una sobre estimación del 18% y un coeficiente de variación del 3%. Esta sobre estimación se produce en el mes más lluvioso del año, donde se da el pico de otoño con la máxima pendiente, y CLIGEN fue capaz de captar este incremento adecuadamente. Por el contrario, el generador sub-estimó la precipitación mensual para el mes de abril y octubre en el orden de 11 mm en promedio para cada mes, lo que significa una variación del 7% con respecto a los datos observados. En el mes de abril, se produjo un cambio de pendiente, pasando de positiva (marzo) a negativa (abril) y en octubre sucedió lo contrario. En ambos casos CLIGEN fue capaz de reproducir satisfactoriamente estas variaciones.

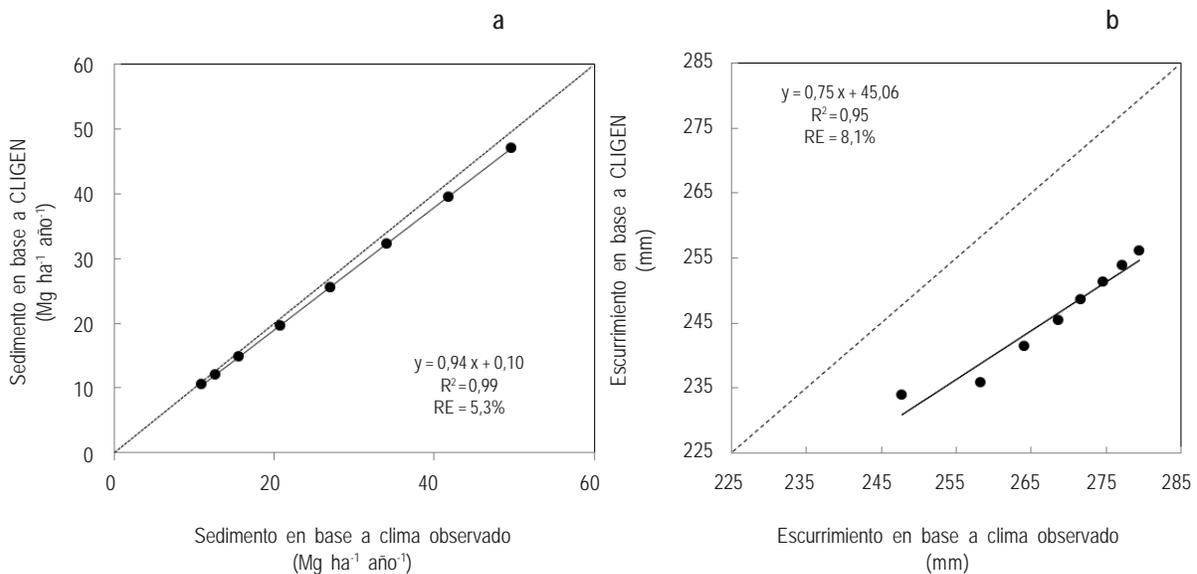


Figura 6. (a) Sedimento estimado con WEPP en base a 40 años de datos climáticos observados vs estimado en base a 400 años de datos climáticos generados con CLIGEN y (b) Escurrimiento estimado con WEPP en base a 40 años de datos climáticos observados vs estimado en base a 400 años de datos climáticos generados con CLIGEN. Ambos (a y b) para diferentes intensidades de pendientes del terreno (de 0,5% a 4%).

Figure 6. (a) WEPP estimated sediment delivery based on 40 years of observed climatic data vs 400 years of CLIGEN estimated climatic data and (b) WEPP estimated runoff based on 40 years of observed weather data vs 400 years of CLIGEN generated climatic data. In both cases (a and b) for different land slope intensities (from 0,5% to 4%).

Las fluctuaciones de los datos simulados con respecto a los medidos, no fueron significativas (Tabla 2), por lo que el ajuste de la misma fue satisfactorio. Coincidente a lo encontrado en este trabajo, Kou *et al.* (2007), informaron que el 98% de los casos analizados no difirió significativamente, concluyendo que la variabilidad de la precipitación mensual observada y la estimada coincidió moderadamente bien.

Las simulaciones diarias realizadas con CLIGEN, mostraron que en septiembre todos los valores fueron sobreestimados, en el orden del 16% (0,39 mm). En tanto para los meses de abril y octubre se sub-estimó la precipitación diaria promedio (0,40 y 0,47 mm, respectivamente), lo que significó una variación del 8 y 10%, respectivamente (similar a lo ocurrido para las simulaciones mensuales). Esto indica que la estimación mensual de las precipitaciones fue mejor simulada por CLIGEN que la diaria (Tabla 2). Los datos de precipitación media diaria se representaron en forma satisfactoria en el análisis total, lo cual coincide a lo encontrado por Zhang & Garbrecht (2003), quienes analizaron datos diarios de precipitación y concluyeron que estos fueron generados adecuadamente por CLIGEN. Las precipitaciones medias mensuales se estimaron mejor que las medias diarias. Esto se debe a que CLIGEN sobreestimó consistentemente las precipitaciones medias diarias, pero subestimó el número de días con lluvia. Los errores de sobreestimación de las precipitaciones medias diarias, tendieron a compensar los errores de subestimación de los días con lluvia. La variabilidad día por día, se predijo adecuadamente, el modelo capturó más del 95% de la variabilidad de los datos de precipitación diaria medidos.

Si bien se observan desviaciones no significativas en los datos de precipitación, estas mismas no influyen en la estimación de escurrimiento y en la producción de sedimentos.

La temperatura máxima anual para los 40 años de datos fue apropiadamente simulada por CLIGEN, ya que no existieron diferencias significativas con los valores estimados por el modelo. La máxima sobre-estimación estuvo en el orden del 5,5% (22,5 vs 23,7 °C, observado vs CLIGEN) y una mínima del 6,5% (25,4 vs 23,7 °C, observado vs CLIGEN). Johnson *et al.*, (1996), quienes compararon dos modelos climáticos, encontraron que las temperaturas medias anuales fueron bien estimadas por los modelos y la mayor diferencia entre la temperatura media anual más alta y la más baja para una simulación con CLIGEN fue de menos de 1 °C.

El modelo simuló correctamente la temperatura media mínima anual, el sesgo y la kurtosis mostraron una distribución normal. Sin embargo, según la prueba *t* el modelo no ajustó adecuadamente, similar a lo encontrado por Zhang (2003). La temperatura máxima y mínima mensual presentó una variación entre lo observado y lo medido menor al 1%, lo cual indica que las estimaciones de temperatura máxima y mínima mensual realizadas con CLIGEN en fueron muy precisas. Zhang (2003), evaluó la capacidad de CLIGEN para estimar temperatura y observó que la media, el desvío estándar, el coeficiente de asimetría y la Kurtosis, fueron correctamente reproducidos por CLIGEN (similar a lo encontrado en este trabajo) y concluyó que la temperatura media máxima diaria fue simulada en forma satisfactoria.

Cuando se evaluó la producción de sedimento en WEPP, utilizando datos climáticos observados y datos estimados con el modelo CLIGEN, se detectó una leve tendencia a sub-estimar la producción de sedimentos cuando se utilizaron los datos generados por CLIGEN, no encontrándose diferencia estadísticamente significativa entre lo observado y simulado, similar a lo sugerido por Ghidry & Alberts (1996) para años secos.

A evaluar la escorrentía, se observó una sub-estimación con el uso de los datos generados por CLIGEN, similar a lo encontrado por Zhang *et al.* (1996). Esto podría deberse a que las precipitaciones generadas por CLIGEN, si bien no difirieron estadísticamente de las observadas, tuvieron una leve tendencia a la sub-estimación, las cuales se magnificaron en la escorrentía estimada con el modelo WEPP.

CONCLUSIÓN

La precipitación media anual, mensual y diaria estimada por CLIGEN para los 10 sets de 40 años cada uno, comparada con los datos observados, mostró que CLIGEN, reprodujo en forma satisfactoria los datos observados.

La temperatura máxima anual y mensual, teniendo en cuenta los datos observados para el promedio diario en un periodo de 40 años, comparado con los 10 sets de 40 años cada uno estimados por CLIGEN no presentaron diferencias para ningún año o mes, es decir que los datos anuales y mensuales observados se ubicaron dentro del rango de los 10 sets de los datos estimados. Las temperaturas mínimas anuales y mínima mensual fueron correctamente simuladas por el modelo CLIGEN.

El modelo climático CLIGEN reprodujo en forma satisfactoria los parámetros promedios de todas las variables de precipitación y temperatura. Esto nos garantiza el uso de este modelo para simular en forma diaria, mensual o anual distintos escenarios climáticos para ser empleados en modelos alternativos para estimar las pérdidas de suelos en nuestra región.

Asimismo, los resultados de este estudio indican que los datos climáticos generados con CLIGEN pueden ser utilizados en el modelo WEPP para estimar datos confiables de producción de sedimentos. Sin embargo, el escurrimiento estimado a partir de los datos generados con CLIGEN, fue un 8% menor al estimado a partir de datos observados.

El uso del modelo CLIGEN, podría contribuir a generar distintos escenarios climáticos para poder predecir situaciones de riesgo de erosión hídrica en la región pampeana norte de la Argentina.

BIBLIOGRAFÍA

- Arnold, JG & JR Williams. 1994. SWRRB; a watershed scale model for soil and water resource management, Grassland Soil and Water research Laboratory, U. S. Department of Agriculture-Agricultural Research Service, Temple, TX.
- Arnold, JG & JR Williams. 1989. Stochastic generation of internal storm structure. *Transactions of the ASAE* 32(1): 161-166.
- Arnold, JG; JR Williams; R Srinivasan & KW King. 1995. SWAT: soil and water assessment tool, U. S. Department of Agriculture-Agricultural Research Service Grassland Soil and Water research Laboratory, Temple, TX.
- Baffaut, C; MA Nearing & AD Nicks. 1996. Impact of CLIGEN parameters on WEPP-predicted average annual soil loss. *Transactions of the ASAE* 39(2), 447-457.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2011. InfoStat Versión 2011 Grupo InfoStat. FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- Elliot, WJ & CD Arnold. 2000. Validation of the weather generator CLIGEN with precipitation data from Uganda. *Transactions of the ASAE* 44(1): 53-58. Keywords: Africa, Stochastic, Climate, CLIGEN, validation 2000m.
- Flanagan, DC & MA Nearing. 1995. USDA-Water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Lab.
- Ghidey, F & EE Alberts. 1996. Comparison of measured and WEPP predicted runoff and soil loss for midwest claypan soil. *Transactions of the ASAE* 39(4), 1395-1402.
- Hanson, CL; KA Cumming; DA Woolhiser & CW Richardson. 1994. Microcomputer program for daily weather simulations in the contiguous United States. USDA-ARS Publ. ARS-114, Washington, D.C.: USDA-ARS.
- Headrick, MG & BN Wilson. 1997. An evaluation of stochastic weather parameters for Minnesota and their impact on WEPP. ASAE Paper No. 972230. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Johnson, GL. 2001. GEM webpage. URL: <http://www.wcc.nrcs.usda.gov/water/climate/gem/gem.html>
- Johnson, GL; CL Hanson; SP Hardegree & EB Ballard. 1996. Stochastic weather simulation: overview and analysis of two commonly used models. *J. Applied Meteorology* 35(10): 1878-1896.
- Jorge, G. 2012. Evaluación del impacto de la intensificación del uso del suelo sobre la erosión hídrica en sistemas agrícolas del Uruguay: Aplicación del modelo WEPP. Tesis para optar al título de Magister en Ciencias Ambientales. Montevideo-Uruguay.
- Knisel, WG. 1993. GLEAMS: groundwater loading effects of agricultural management systems, U. S. Department of Agriculture-Agricultural Research Service Southeast Watershed Research Laboratory, Tifton, GA.
- Kottek, M; J Grieser; C Beck; B Rudolf & F Rubel. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, pp. 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130. <http://www.editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/DIGITESIS/marta%20vigo/pdf/2.6clima.pdf>
- Kou, X; G Jianping; Y Wang & C Zhang. 2007. Validation of the weather generator CLIGEN with daily precipitation data from the Loess Plateau. *J. Hydrol.* 347(3-4), 347-357.
- Meyer C; C Renschler & RC Vining. 2002. «5.7 Implementing quality control, techniques for random number generators to improve stochastic weather generators: the CLIGEN experience». Soil, Purdue Univ., West Lafayette, 1196 Bldg. IN 47907; http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/ad_hoc/36021500WEPP/AppliedClimato_logy_0205.pdf
- Min, YM; VN Kryjov; KH An; SN Hameed; SJ Sohn; WJ Lee & JH Oh. 2011. Evaluation of the weather generator CLIGEN with daily precipitation characteristics in Korea. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.* 47(3): 255-263.
- Nearing, MA; L Deer-Ascough & JM Laflen. 1990. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. *Transactions of the ASAE* 33(3): 839-849.
- Nicks, AD & LJ Lane. 1989. Weather generator. Chapter 2 in USDA-Water erosion prediction project: hillslope profile version, eds. L. J. Lane, and M. A. Nearing. NSERL Report No. 2. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Nicks, AD & GA Gander. 1994. CLIGEN: a weather generator for climate inputs to water resources and other models. In: Watson, D.G., Zazueta, F.S., Harrison, T.V. (eds), *Proceedings of 5th International Conference on Computer in Agriculture*. ASAE, St. Joseph, MI, pp. 903-909.
- Nicks, AD; LJ Lane & GA Gander. 1995. Weather generator. Chapter 2 in USDA-Water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation. D. C. Flanagan and M. A. Nearing, eds. NSERL Report No. 10. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Puentes, M. 2014. Ordenes dominantes en los suelos de la República Argentina. Atlas de Suelos de la República Argentina. Instituto de Suelos-INTA-Castelar. <http://www.suelos.org.ar/sitio/mapa-de-ordenes-de-suelos-de-la-argentina-segun-soil-taxonomy-68-kb/>
- Richardson, CW. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resour. Res.* 17 (1), 182-190.

- Saluso, J. 1999. El observatorio agrometeorológico de la EEA Paraná del INTA. Macrorregión pampeana norte. Centro Regional Entre Ríos. http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_observatorio_eea_paran-65_aos.pdf
- Sharpley, AN & JR Williams. eds. 1990. EPIC Erosion/Productivity Impact Calculator, USDA-ARS Technical Bulletin 1768, USDA-ARS Grassland, Soil, and Water Research Lab, Temple, TX. 5/09/2001. URL: <http://www.brc.tamus.edu/epic/index.html>
- SIIA, 2014. Datos provistos por la Dirección de información agropecuaria y forestal, Subsecretaría de Agricultura. Coordinación de servicios de información, Ministerio de Agroindustria. http://www.siiia.gob.ar/_apps/siiia/estimaciones/estima2.php. Verificado 07/09/2016.
- Wallis, TR & JF Griffiths. 1995. An assessment of the weather generator (WXGEN) used in the erosion/productivity impact calculator (EPIC). *Agric. and Forest Meteorology* 73(1-2): 115-133.
- Williams, JR; CA Jones & PT Dyke. 1984. A Modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASAE* 27(1) 129-144.
- Zhang, XC. 2003. Assessing seasonal climatic impact on water resources and crop production using CLIGEN and WEPP models. *Transactions of the ASAE* 46(3), 685-693.
- Zhang, XC & JD Garbrecht. 2003. Evaluation of CLIGEN precipitation parameters and their implication on WEPP runoff and erosion prediction. *Trans. ASAE* 46(2): 311-320.
- Zhang, XC; MA Nearing; LM Risse & KC McGregor. 1996. Evaluation of WEPP runoff and soil loss predictions using natural runoff plot data. *Trans. ASAE* 39(3): 855-863.
- Yu, B. 2000. Improvement and evaluation of CLIGEN for storm generation. *Trans. ASAE* 43(2): 301-307.
- Yu, B. 2002. Using CLIGEN to generate RUSLE climate inputs. *Transactions of the ASAE* 45(4), 993.
- Yu, B. 2005. Adjustment of CLIGEN parameters to generate precipitation change scenarios in southeastern Australia. *Catena*, 61: 196-209.