

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA EROSIVIDAD DE LA
LLUVIA EN TACUAREMBÓ Y RIVERA**

por

Juan Manuel PIAGGIO PLADA

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.**

MONTEVIDEO

URUGUAY

2023

Página de aprobación

Trabajo final de grado aprobado por:

Director: -----

Ing. Agr. PhD Mario Pérez Bidegain

Tribunal: -----

Ing. Agr. PhD Fernando García Préchac

Ing. Agr. MSc Carlos Clérici

Fecha: 29 de marzo de 2023

Autor: -----

Juan Manuel Piaggio Plada

Agradecimientos

A los compañeros del Grupo Disciplinario Suelos del Departamento de Suelos y Aguas de Facultad de Agronomía, por compartir su tiempo, ideas y por su continua motivación.

A Mario Pérez, por su dirección en cada paso de este trabajo.

Al tribunal y a todas las personas que de una forma u otra han participado en todo este proceso.

A Beatriz por su apoyo incondicional.

Tabla de Contenido

Página de aprobación	2
Agradecimientos	3
Tabla de figuras e imágenes	6
Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
Revisión Bibliográfica	11
Erosión	11
Proceso de Erosión Hídrica	11
Ecuación Universal de Pérdida de Suelo y Revisiones Posteriores	12
Estructura del Modelo	14
Factor Erosividad de la Lluvia y Escurrimiento Superficial Asociado (R)	15
Ecuaciones de Energía Cinética	15
USLE	15
RUSLE	18
RUSLE 2.	19
Energía Total de una Tormenta	22
Intensidad Máxima en 30 Minutos, EI ₃₀ y Factor R	23
Erosividad de la Lluvia en Uruguay	24
Limitantes Metodológicas en la Determinación del Índice EI ₃₀	26
Objetivos del Trabajo	28
Materiales y Métodos	29

	5
Base de Datos	29
Cálculo del Índice EI ₃₀ con Información Pluviográfica	30
Estimación del Factor R a Partir de Información Pluviométrica.....	31
Ecuaciones Estacionales.....	31
Determinación Factor R en Tacuarembó y Rivera.....	32
Probabilidad de Ocurrencia y Periodo de Retorno.....	34
Resultados y Discusión	35
Cantidad de Tormentas, Precipitaciones y Factor R con Base en Registros Pluviográficos de La Corona.....	35
Tormentas Totales y Erosivas	35
Precipitaciones Totales y Erosivas.....	37
Factor R Promedio Anual	38
Relación entre Índice EI ₃₀ y Precipitación	39
Distribución Estacional y Mensual de las Precipitaciones Totales y Erosivas en Tacuarembó y Rivera	40
Factor R con Registros Pluviométricos.....	41
Factor R Tacuarembó y Rivera	41
Precipitaciones, Índice EI ₃₀ y El Niño Oscilación Sur (ENOS) ...	42
Distribución Estacional y Mensual del Factor R	46
Probabilidad de Ocurrencia y Período de Retorno.....	47
Conclusiones	49
Bibliografía	50
Anexos	56

Tabla de figuras e imágenes

Tabla nro.	Pág.
Tabla 1 Cantidad Media Anual de Tormentas Totales y Distribución Estacional Promedio en el Período 2000-2014 en la Estación Pluviográfica La Corona.....	35
Tabla 2 Cantidad Media Anual de Tormentas Erosivas y Distribución Estacional Promedio en el Período 2000-2014 en la Estación Pluviográfica La Corona.....	36
Tabla 3 Proporción de Tormentas Erosivas sobre el Total de Tormentas para la Media Anual y Variación de la Proporción de Tormentas Erosivas por Estación del Año. Período 2000-2014 en la Estación Pluviográfica La Corona	37
Tabla 4 Factor R ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y Distribución Estacional para el Período 2000-2014 en la Estación Pluviográfica La Corona	38
Tabla 5 Parámetros de Regresión Describiendo la Relación entre $\ln EI_{30}$ ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) y \ln de la Precipitación Asociada (mm).....	40
Tabla 6 Clasificación del Factor R Anual	41
Tabla 7 Comparación con Factores R Estimados en Otros Estudios de la Misma Zona.....	42
Tabla 8 Valores del Índice de Erosividad EI_{30} Mensual y Anual para Registros Pluviométricos Diarios de Tacuarembó, Período 1979-2009	43
Tabla 9 Período de Retorno y Probabilidad de Ocurrencia de los Índices de Erosividad Anuales y Máximo Diario Anual en Rivera (1979-2009)	48

Figura nro.	Pág.
Figura 1 Velocidad Terminal en Función del Diámetro Equivalente de Gota de Lluvia	16
Figura 2 Distribución del Tamaño de Gotas en Función de la Intensidad de la Lluvia	17
Figura 3 Energía Cinética Unitaria en Función de la Intensidad de la Tormenta..	21
Figura 4 Distribución Geográfica del Factor R Promedio de 30 años en el Uruguay	26
Figura 5 Ubicación de las Estaciones Pluviográficas y Pluviométricas Utilizadas	30
Figura 6 Flujo de Trabajo Describiendo el Desarrollo de las Ecuaciones Estacionales de Erosividad y Estimación del Factor R en Tacuarembó y Rivera a partir de Información Pluviográfica y Pluviométrica.....	33
Figura 7 Precipitación Media Anual (mm) para el Período 1980 -2009.....	38
Figura 8 Distribución Estacional del Factor R, Precipitación Promedio Total y Erosiva Anual de 30 años en Tacuarembó.....	46

Resumen

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Wischmeier & Smith, 1965, 1978), así como su versión revisada RUSLE (Renard et al., 1997) son los modelos utilizados en la aplicación de las políticas públicas de conservación de suelos vigente en el país. Su factor erosividad de la lluvia y escurrimiento asociado (R) es el valor promedio anual del índice EI_{30} de todas las lluvias erosivas ocurridas en un año para una larga serie de años. El cálculo para una determinada localidad requiere que se cuente con información pluviográfica de al menos 20 años, lo más actualizada posible y de alta resolución temporal (< 30 minutos) (Panagos et al., 2017). Este tipo de información habitualmente no está disponible o es de acotado alcance temporal (Klik et al., 2015). Para levantar esta limitante, se analizaron 14 años de registros pluviográficos (2000-2014) de una estación meteorológica ubicada en el establecimiento “La Corona”, departamento de Tacuarembó. Se desarrollaron regresiones que permitieron relacionar el índice EI_{30} allí derivado con la información pluviométrica diaria de largo plazo (1979-2009) disponible en las localidades de Tacuarembó y Rivera, distantes 29 y 80 km de La Corona, respectivamente. Estas regresiones presentaron coeficientes de determinación (R^2 ajustado) entre 0.66 y 0.82. En las estimaciones del índice EI_{30} se incorporaron las actuales recomendaciones de RUSLE 2 en lo que respecta al cálculo de la energía cinética de las tormentas erosivas. Los factores R estimados para el período 1979-2009 en Tacuarembó y Rivera son de 7949 y 8632 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Ambos valores indican un alto potencial erosivo de las lluvias. Sus períodos de retorno son de 2.6 y 1.95 años, con probabilidades de ocurrencia de 38.6 y 51.3%, respectivamente. Verano y otoño concentran aproximadamente el 65% de la erosividad promedio anual. Los valores de factor R estimados concuerdan con los reportados en la bibliografía para la zona. La metodología utilizada en este trabajo puede ofrecer una alternativa útil en la estimación del factor R, así como de su distribución estacional y mensual, en localidades cercanas donde la información pluviográfica no es accesible, pero se dispone de registros pluviométricos de largo plazo.

Palabras clave: erosividad de la lluvia, RUSLE 2, precipitación

Abstract

The Universal Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier & Smith, 1965, 1978) and its revised version RUSLE (Renard et al., 1997) are the models used in the implementation of the current public soil conservation policies in Uruguay. Its rainfall and associated runoff erosivity factor (R) is the average annual value of the EI₃₀ index of all erosive rainfall events that occur in a year for a long series of years. The calculation for a specific location requires pluviographic information of at least 20 years, as updated as possible and with high temporal resolution (<30 minutes) (Panagos et al., 2017). This type of information is usually not available or has limited temporal scope (Klik et al., 2015). To overcome this limitation, 14 years of rainfall records (2000-2014) from a weather station located at "La Corona" Farm, Tacuarembó department were analyzed. Regressions were developed which allowed relating the EI₃₀ index derived in this site with the long-term daily rainfall information (1979-2009) available in the locations of Tacuarembó and Rivera, distant 29 and 80 km from La Corona Farm, respectively. These regressions presented adjusted R² determination coefficients between 0.66 and 0.82. The current recommendations of RUSLE 2 were incorporated into the EI₃₀ index estimates regarding the calculation of the kinetic energy of erosive storms. The estimated R factors for the period 1979-2009 in Tacuarembó and Rivera are 7949 and 8632 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ year⁻¹, respectively. Both values indicate a high erosive potential of the rainfall events. Their return periods are 2.6 and 1.95 years, with probabilities of occurrence of 38.6 and 51.3%, respectively. Summer and autumn concentrate approximately 65% of the average annual erosivity. The estimated R factor values agree with those reported in the bibliography for the area. The methodology used in this work can offer a useful alternative in the estimation of the R factor, as well as its seasonal and monthly distribution, in nearby locations where pluviographic information is not accessible, but long-term rainfall records are available.

Keywords: rainfall erosivity, RUSLE 2, rainfall

Introducción

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE por sus siglas en inglés) (Wischmeier & Smith, 1965, 1978) así como sus versiones revisadas RUSLE (Renard et al., 1997) y RUSLE 2 (Agricultural Research Service [ARS], 2013) representan los modelos de estimación de pérdida de suelo más empleados a nivel mundial (Kinnell, 2010). En Uruguay, USLE y RUSLE son los modelos utilizados en la aplicación de las políticas públicas de conservación de suelos vigente en el país, que desde 2013, establece la obligatoriedad de presentar Planes de Uso y Manejo Responsable del Suelo (Pérez Bidegain et al., 2018; Zurbriggen et al., 2020).

El factor erosividad de la lluvia y escurrimiento asociado (R) de USLE y sus versiones revisadas representa el valor promedio anual del índice EI_{30} de todas las lluvias erosivas ocurridas en un año para una larga serie de años. Las estimaciones de este índice expresan de forma numérica el riesgo de erosión asociado al clima en una determinada localidad o región (Yang & Yu, 2015; Yu & Rosewell, 1996).

La determinación del factor R requiere que se cuente con información pluviográfica de al menos 20 años, lo más actualizada posible y de alta resolución temporal (< 30 minutos) (Panagos et al., 2017). Este tipo de información habitualmente no está disponible o es de acotado alcance temporal (Klik et al., 2015).

El objetivo de este trabajo es desarrollar ecuaciones que permitan relacionar el índice EI_{30} derivado de registros pluviográficos con la información pluviométrica diaria de largo plazo disponible de estaciones meteorológicas cercanas, permitiendo ampliar la serie de años desde la cual realizar estimaciones de erosividad de la lluvia. Como objetivos específicos se procura incorporar las actuales recomendaciones de RUSLE 2 en lo que respecta al cálculo de la energía cinética de las tormentas erosivas, así como contribuir al estudio del potencial erosivo de las lluvias en las localidades de Tacuarembó y Rivera, su distribución estacional y mensual, probabilidad de ocurrencia y períodos de retorno.

Revisión Bibliográfica

Erosión

La erosión es el proceso por el cual se produce desagregación y transporte de las partículas del suelo consecuencia de la acción del agua (erosión hídrica) y/o del viento (erosión eólica) (Bertoni & Lombardi Neto, 1993; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2015). Estos mecanismos conducen a que el suelo que se erosiona en una zona del paisaje se deposite en forma de sedimentos en otras, siendo el agua a través de la lluvia y el escurrimiento superficial asociado el agente erosivo y de transporte más importante en Uruguay (Durán & García Préchac, 2007).

Si bien es un proceso progresivo que ocurre naturalmente, la erosión antrópica o acelerada es resultado directo de la acción humana (Brady & Weil, 2002). Prácticas agrícolas no sostenibles, deforestación, sobrepastoreo y rápida urbanización incrementan notoriamente el ritmo de pérdida de suelo en relación con la erosión natural o geológica, no pudiendo ser compensadas en el corto plazo por la tasa de formación de suelos (Brady & Weil, 2002; Porta et al., 1999).

Proceso de Erosión Hídrica

El impacto directo y la alta velocidad de las gotas de lluvia sobre el suelo descubierto es la primera y más importante etapa del proceso erosivo, el cual es seguido por el desprendimiento, transporte y deposición de las partículas (Bertoni & Lombardi Neto, 1993). Una gran proporción de la energía cinética de las gotas es transferida hacia los agregados del suelo provocando su desagregación y ruptura en partículas más pequeñas (Bertoni & Lombardi Neto, 1993; Durán & García Préchac, 2007).

Otra fracción de la energía cinética es responsable del salpicado, que consiste en la compactación localizada del sitio de impacto de la gota de lluvia y la proyección hacia afuera de partículas sueltas de suelo (Bertoni & Lombardi Neto,

1993). Estas partículas de menor tamaño obstruyen la porosidad superficial, que junto a la compactación originada por el impacto de las gotas de lluvia contribuyen al encostramiento y reducción de la capacidad de infiltración, favoreciendo y potenciando los efectos negativos del escurrimiento (Bertoni & Lombardi Neto, 1993; Brady & Weil, 2002; Durán & García Préchac, 2007).

Como se menciona, otro factor importante en el desprendimiento de las partículas de suelo es el escurrimiento superficial asociado, el cual comienza a manifestarse una vez la tasa de infiltración es superada por la intensidad de las precipitaciones (Bertoni & Lombardi Neto, 1993). La energía cinética del escurrimiento se disipa en un componente abrasivo, producto tanto de fuerzas horizontales que actúan en la misma dirección del movimiento desprendiendo e incorporando material a la carga de sedimentos movilizadas, como de fuerzas verticales, explicadas por un flujo de agua turbulento que se mueve entre las depresiones e irregularidades del terreno arrastrando y desprendiendo materiales (Bertoni & Lombardi Neto, 1993; Brady & Weil, 2002; Durán & García Préchac, 2007).

A su vez, parte de la energía es utilizada en el trabajo requerido para el transporte de los sedimentos, cuya masa depende del material aportado por los procesos de salpicado y escurrimiento (Bertoni & Lombardi Neto, 1993). Por último, cuando la energía del escurrimiento es insuficiente para continuar con el movimiento de los sedimentos transportados ocurre su deposición en las zonas deprimidas del paisaje (Bertoni & Lombardi Neto, 1993; Durán & García Préchac, 2007).

Ecuación Universal de Pérdida de Suelo y Revisiones Posteriores

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE por sus siglas en inglés) (Wischmeier & Smith, 1965, 1978) así como sus versiones revisadas RUSLE (Renard et al., 1997) y RUSLE 2 (ARS, 2013) representan los modelos de estimación de pérdida de suelo más empleados a nivel mundial (Kinnell, 2010). De ellos se deriva gran parte del entendimiento actual sobre la distribución espacial y

temporal de la erosión del suelo, permitiendo la planificación adecuada con fines conservacionistas (Borrelli et al., 2021; Oliveira et al., 2013).

La ecuación estima la erosión promedio anual a largo plazo en una ladera determinada, utilizando para ello factores que representan las características climáticas de esa localidad, susceptibilidad del suelo a ser erosionado, topografía, cobertura, manejo y prácticas de conservación empleadas (Wischmeier & Smith, 1978). Sin embargo, no se recomienda su uso para realizar estimaciones de pérdida de suelo a escala de eventos individuales de lluvia, estimaciones de erosión a corto plazo o en grandes extensiones como cuencas (Kinnell, 2010; Wischmeier & Smith, 1978).

El modelo fue originalmente desarrollado en Estados Unidos a partir de información experimental de unas 10000 combinaciones de parcelas de escurrimiento-año bajo lluvia natural (Wischmeier & Smith, 1978), complementadas luego con datos provenientes de simuladores de lluvia (García Préchac, 1992; Kinnell, 2010). Posteriormente, su uso se extendió a numerosos países alrededor del mundo (Kinnell, 2010), entre ellos Uruguay, donde se evidenció la necesidad de recopilar información a nivel local para su calibración y validación (Rovira et al., 1982).

Dando respuesta a esa necesidad, pueden citarse los trabajos de García Préchac (1992), García Préchac et al. (1997, 1999) como se cita en Hill (2007), Terra y García Préchac (2001), Clérici y García Préchac (2001), García Préchac et al. (2017). Consecuencia de este proceso de investigación y acumulación de conocimiento se logró avanzar hacia el ajuste y validación del modelo para las condiciones de Uruguay (Durán & García Préchac, 2007; Pérez Bidegain et al., 2018).

Por lo anterior, USLE/RUSLE es el modelo utilizado en la aplicación de las políticas públicas de conservación de suelos vigente en el país, que desde 2013, establece la obligatoriedad de presentar Planes de Uso y Manejo Responsable del Suelo (Pérez Bidegain et al., 2018; Zurbriggen et al., 2020). La fortaleza de su legislación y el compromiso mostrado con la protección del suelo tanto a nivel

nacional como internacional posicionan a Uruguay como un país de avanzada en gobernanza del suelo (Peake y Robb, 2022).

Estructura del Modelo

La ecuación desarrollada presenta la siguiente estructura (Wischmeier & Smith, 1978):

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Donde:

A= Pérdida promedio anual de suelo por unidad de área que ocurre a largo plazo (al menos 20 años), expresados en Mg ha⁻¹ año⁻¹.

R= Factor erosividad de la lluvia y escurrimiento asociado (MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ año⁻¹). Resultado promedio del producto acumulado de la energía cinética y la máxima intensidad en 30 minutos de todas las lluvias erosivas ocurridas en un año, para un período de tiempo recomendado de al menos 20 años. Expresa por tanto la capacidad de la lluvia y el escurrimiento asociado de producir erosión (Renard et al., 1997).

K= Factor erodabilidad del suelo (Mg hr⁻¹ MJ⁻¹ mm). Indica la erosión promedio por unidad de factor R (susceptibilidad a sufrir erosión), para un suelo específico mantenido sin cobertura, con laboreo secundario a favor de una pendiente de 9 % y una longitud de pendiente de 22.1 metros.

Factores estándares adimensionales:

L= Factor longitud de la pendiente. Relación de erosión entre una longitud de pendiente específica y la que se produce en condiciones estándar de 22.1 metros, a igualdad de los otros factores.

S= Factor inclinación de la pendiente. Relación entre las pérdidas de suelo con una inclinación de pendiente dada y la que se produce en condiciones estándar de 9 % , a igualdad de los otros factores.

C= Factor uso y manejo. Relación entre las pérdidas de suelo de un sistema con determinada cobertura y manejo, respecto a la erosión correspondiente al mismo suelo puesto en idénticas condiciones a las estipuladas en el factor K.

P= Factor prácticas mecánicas de apoyo. Relación entre la erosión producida en un sistema con determinada práctica conservacionista (laboreo en contorno, terrazas), y la que se produce en la condición estándar de laboreo secundario a favor de la pendiente.

Factor Erosividad de la Lluvia y Escurrimiento Superficial Asociado (R)

Ecuaciones de Energía Cinética

USLE. Cook (1937) como se cita en Nearing et al. (2017) define tres variables implicadas en el proceso erosivo: la erodabilidad del suelo, protección de la cobertura y erosividad potencial. Identifica a su vez para esta última siete factores que la explican, entre los que cabe destacar la precipitación total, intensidad de lluvia y velocidad de las gotas de lluvia.

El impacto directo de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo aporta la energía cinética necesaria para las etapas de desagregación y transporte (Bertoni & Lombardi Neto, 1993). La energía cinética (E_{kD} en J) para una gota de diámetro equivalente D (mm) es función de la masa (m_D en kg) y del cuadrado de la velocidad terminal alcanzada (v^2_D en $m\ s^{-1}$) (Van Dijk et al., 2002):

$$E_{kD} = 0.5 m_D v^2_D \quad (1)$$

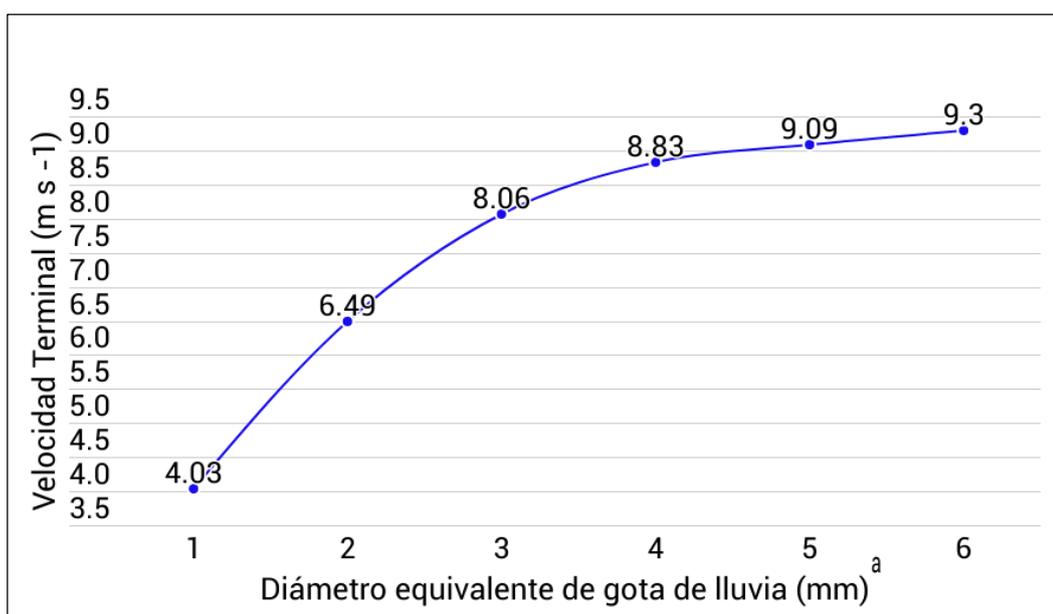
definiéndose diámetro equivalente como el diámetro de una esfera con un volumen equivalente al de una gota determinada. Van Dijk et al. (2002) afirman que para estimar la capacidad que tiene una lluvia de producir erosión es necesario

a su vez comprender la relación existente entre intensidad de lluvia y energía cinética.

Laws (1941) estudiando la relación entre tamaño de gotas y velocidad terminal observa que al aumentar el diámetro equivalente de las gotas de lluvia también lo hace de forma decreciente la velocidad terminal con la que impactan el suelo. Posteriormente, Gunn y Kinzer (1949) reportan valores muy similares a los obtenidos por Laws (Figura 1).

Figura 1

Velocidad Terminal en Función del Diámetro Equivalente de Gota de Lluvia



Nota. Elaborado a partir de Gunn y Kinzer (1949)

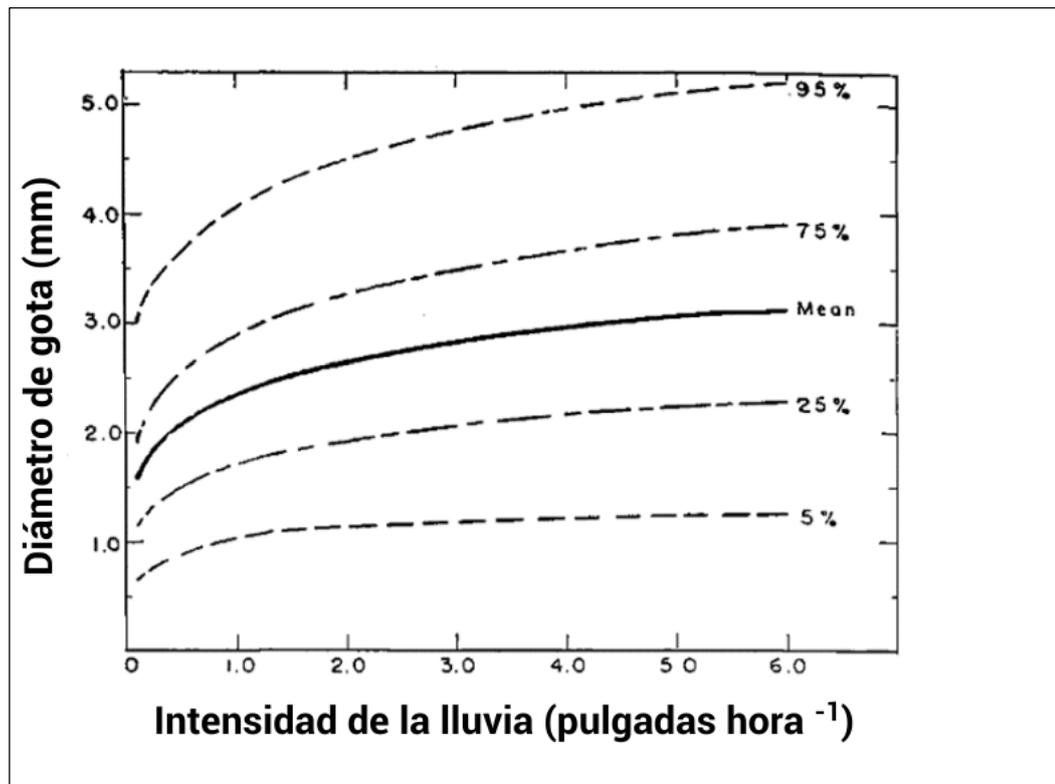
^a Definido como el diámetro de una esfera con volumen equivalente

Laws y Parsons (1943) analizaron la distribución del tamaño de las gotas como porcentaje del volumen total de lluvia en función de la intensidad de esta, para un rango entre 0.25 y 152 mm h⁻¹ (0.01 y 6 pulgadas h⁻¹, respectivamente). Un resumen de sus resultados es presentado por Wischmeier y Smith (1958) (Figura 2).

Se puede observar que el tamaño medio de las gotas aumenta a mayor intensidad. Las líneas discontinuas representan los límites de tamaño de gota para cada percentil, siendo la línea continua el tamaño medio de gota ponderado por el porcentaje del volumen total (Wischmeier & Smith, 1958).

Figura 2

Distribución del Tamaño de Gotas en Función de la Intensidad de la Lluvia



Nota. Elaborado a partir de Wischmeier & Smith (1958)

Aplicando la Ecuación 1 para una determinada intensidad de lluvia, distribución de tamaño de gotas y velocidad terminal asociada se obtiene la siguiente expresión (Porta et al., 1999; Van Dijk et al., 2002):

$$E_k = \sum_{i=1}^n 0.5 \rho m_i v_i^2 \quad (2)$$

donde E_k es la energía cinética contenida en un milímetro de lluvia ($\text{J m}^{-2} \text{mm}^{-1}$), ρ es la densidad de masa asociada a 1 mm de lluvia ($\text{kg m}^{-2} \text{mm}^{-1}$), m_i

corresponde a la fracción de masa de lluvia caída por unidad de tiempo y v_i^2 es la velocidad terminal (m s^{-1}), para cada clase de tamaño de gota i .

Sin embargo, este tipo de expresiones son de limitada aplicabilidad práctica, utilizándose en cambio relaciones directas entre intensidad de lluvia y energía cinética (Porta et al., 1999; Van Dijk et al., 2002).

Tomando los resultados de Gunn y Kinzer (1949) y el análisis de los datos reportados por Laws y Parsons (1943), Wischmeier y Smith (1958) presentan una ecuación de regresión para el cálculo de la energía cinética unitaria (es decir, por mm de lluvia medido), que expresada en unidades métricas (Foster et al., 1981) toma la siguiente forma:

$$e = \begin{cases} 0.119 + 0.0873 \log_{10} i & \text{para } i \leq 76.2 \text{ mm h}^{-1} \\ 0.283 & \text{para } i > 76.2 \text{ mm h}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

donde e ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) es la energía cinética unitaria e i es la intensidad de la lluvia en mm h^{-1} .

Finalmente, esta será la ecuación de energía unitaria utilizada en USLE (Wischmeier & Smith, 1965).

En la segunda versión de USLE (Wischmeier & Smith, 1978) se establece un valor máximo de $0.283 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ en e para intensidades de lluvia superiores a 76.2 mm h^{-1} . Esta adaptación reconoce los avances de diversas investigaciones donde se demuestra que el aumento en el diámetro de las gotas y por ende en la energía cinética por mm de lluvia no es significativo desde este punto (McGregor et al., 1995; Nearing et al., 2017; Van Dijk et al., 2002).

RUSLE. En RUSLE (Renard et al., 1997) cambia la forma de cálculo para la energía cinética unitaria, utilizando para ello una ecuación cuya forma general es propuesta por Kinell (1981) como se cita en Brown y Foster (1987):

$$e_k = e_{max} [1 - a \exp(-b i)] \quad (4)$$

siendo e_k ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) la energía cinética por cada mm de precipitación medido, e_{max} ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) el valor máximo de energía cinética cuando la intensidad de la lluvia se aproxima a infinito, i (mm h^{-1}) la intensidad de la lluvia, a y b coeficientes empíricos que representan un intercepto y la tasa de incremento de e_k al aumentar i , respectivamente (Brown & Foster, 1987; Nearing et al., 2017).

La expresión utilizada en RUSLE es parametrizada por Brown y Foster (1987) utilizando datos de Australia, Mississippi, Miami, Washington y Zimbabwe:

$$e_k = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.05 i)] \quad (5)$$

Sus autores destacan que la Ecuación 5 es una alternativa que presenta ventajas analíticas con respecto a su predecesora de USLE. A intensidades de lluvia altas se aproxima a su valor asintótico como una función continua, en tanto la Ecuación 3 impone un valor asintótico con una discontinuidad a intensidades mayores de 76.2 mm h^{-1} . Por otra parte, posee un valor positivo ($0.0812 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) a intensidad de lluvia cero, mientras la Ecuación 3 tiende a infinito negativo a igual intensidad (Brown & Foster, 1987).

RUSLE 2. McGregor et al. (1995) utilizaron información pluviográfica de una cuenca en Mississippi, Estados Unidos, con el objetivo de comparar los valores de erosividad anual calculados a partir de la Ecuación 3 (Wischmeier y Smith, 1978), ecuación McGregor-Mutchler (McGregor y Mutchler, 1976) como se cita en Brown y Foster (1987) y Ecuación 5 (Brown y Foster, 1987). Observaron que la Ecuación 3 y la ecuación de McGregor-Mutchler llegaron a estimaciones de erosividad anual muy similares, siendo a su vez 8% superiores a los obtenidos con la Ecuación 5. Los autores indicaron además que ajustando el parámetro b de la Ecuación 5 a 0.082 se logran valores de factor R promedio anual muy cercanos a los obtenidos con la ecuación de McGregor-Mutchler y la Ecuación 3.

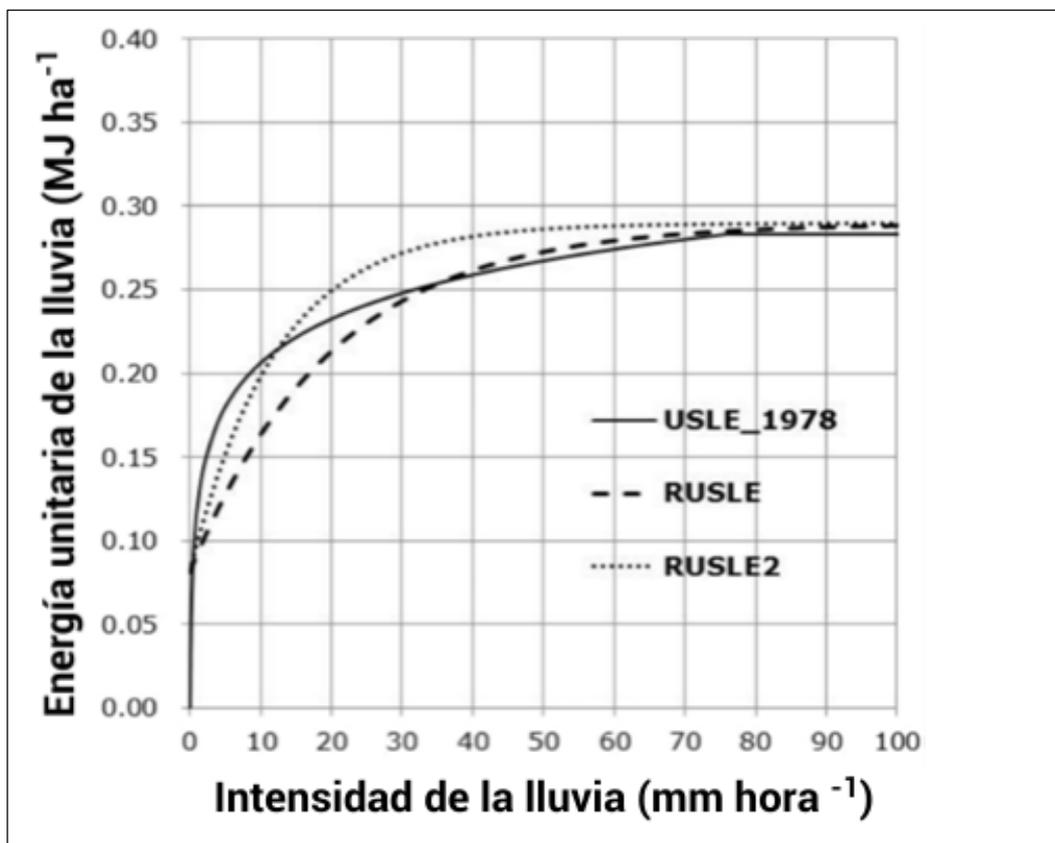
Nearing et al. (2017) utilizando información de 56 estaciones en China, Italia y Estados Unidos que abarcan climas desde húmedo a semi árido obtuvieron valores de erosividad promedio para RUSLE que son un 14 % menores a USLE.

Van Dijk et al. (2002) evaluando el comportamiento de diversas ecuaciones de estimación de energía cinética de la lluvia reportan que las estimaciones realizadas con RUSLE fueron un 13 % inferiores a USLE.

En el gráfico de la Figura 3 se observa que a intensidades de lluvia entre 1 y 35 mm h⁻¹ RUSLE muestra valores de energía cinética unitaria inferiores a las otras ecuaciones analizadas, siendo ligeramente superiores a USLE a partir de ese punto (McGregor et al., 1995).

Figura 3

Energía Cinética Unitaria en Función de la Intensidad de la Tormenta



Nota. Elaborado a partir de Nearing et al. (2017)

Siendo Wischmeier y Smith (1978) “USLE_1978”, Brown y Foster (1987) “RUSLE” y McGregor et al. (1995) “RUSLE 2”.

Considerando estas subestimaciones, la ecuación de energía de RUSLE ya no es recomendada por los equipos de desarrollo de RUSLE y RUSLE 2 (Nearing et al., 2017). En su lugar fue adoptada para RUSLE 2 (ARS, 2013) la Ecuación 6, donde se sustituye el parámetro b (0.05) de Brown y Foster (1987) por el valor 0.082 sugerido en McGregor et al. (1995):

$$e_k = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.082 i)] \quad (6)$$

siendo los parámetros e_k e i idénticos a los presentados en la Ecuación 4.

Energía Total de una Tormenta

La energía total de una tormenta “E” (MJ ha⁻¹) es calculada en forma general como (Wischmeier & Smith, 1978):

$$E = \sum_{k=1}^m e_k \cdot \Delta V_k \quad (7)$$

donde m constituye el número total de k lecturas de pluviógrafo que conforman el evento erosivo o tormenta, cada lectura representa el intervalo de tiempo en el que están divididos los registros pluviográficos, e_k (MJ ha⁻¹ mm⁻¹) es la energía cinética por milímetro de precipitación en el intervalo, y V_k (mm) es la precipitación registrada en el intervalo.

e_k se determina mediante la Ecuación 6, utilizando como valor de intensidad i al resultante de dividir la precipitación registrada en el intervalo V_k sobre el tiempo del intervalo de lectura, expresándose en mm h⁻¹ (Nearing et al., 2017).

Wischmeier (1959) separa dos tormentas consecutivas cuando entre ellas ocurre un período sin lluvias de 6 horas. Wischmeier y Smith (1978) ajustaron esta definición, indicando que la lámina de lluvia debía ser menor a 12.7 mm en ese periodo. A su vez, consideran un evento de lluvia como erosivo cuando acumula una lámina igual o mayor a 12.7 mm, o suma al menos 6 mm en un período igual o menor a 15 minutos (24 mm h⁻¹). Wischmeier y Smith (1978) no indican las razones por las cuales seleccionaron estos umbrales (Todisco et al., 2019). No obstante, señalan que la incorporación de lluvias con láminas inferiores tiene poco efecto en la erosividad mensual o anual.

McGregor et al. (1995) hallaron que omitir tormentas menores a 12.7 mm significó una reducción en el valor de R promedio anual de aproximadamente 3.6%. Adicionalmente, el efecto de incorporarlas cuando suman al menos 6 mm en un período igual o menor a 15 minutos se tradujo en un incremento en el valor de R inferior al 1%.

Intensidad Máxima en 30 Minutos, EI_{30} y Factor R

Los estudios preliminares de Wischmeier y Smith (1958) y su posterior profundización en Wischmeier (1959) evaluando en una mayor variedad de manejos, suelos y climas el efecto de diferentes características de las precipitaciones sobre la erosión encuentran que la variable intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}) es un mejor estimador de la pérdida de suelo que las intensidades máximas en 5, 15 y 60 minutos.

Por otro lado, los mismos autores concluyen que la variable que mejor se correlaciona con el potencial erosivo de una tormenta es el producto de la energía cinética total de la lluvia (E) y la intensidad máxima ocurrida en un período continuo de 30 minutos (I_{30}); a esta expresión se la denomina índice de erosividad EI_{30} ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$).

$$EI_{30} = E \cdot I_{30} \quad (8)$$

En términos de procesos describe la interacción entre la desagregación de suelo por el impacto directo de las gotas de lluvia, el salpicado resultante y el escurrimiento en el transporte de las partículas desagregadas a nivel de laderas (Bertoni & Lombardi Neto, 1993; Wischmeier & Smith, 1958). En el análisis de Wischmeier (1959) el EI_{30} fue capaz de explicar entre el 72 y el 97 % de la variación en pérdidas de suelo causadas por lluvias individuales.

Los valores de erosividad para una determinada localidad y período de tiempo se obtienen de sumar para todas las lluvias individuales erosivas ocurridas en ese periodo su correspondiente valor de EI_{30} (Wischmeier & Smith, 1978).

Finalmente, el factor erosividad de la lluvia y escurrimiento asociado R de una determinada localidad es el valor medio anual de EI_{30} para una larga serie de años (Wischmeier & Smith, 1978):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^j (EI_{30})_i}{N} \quad (9)$$

donde $(EI_{30})_i$ representa el producto de la energía cinética total y su máxima intensidad en 30 minutos estimada para cada tormenta erosiva i , en cuanto j indica el número de tormentas erosivas ocurridas en N años, siendo sus unidades $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Wischmeier (1959) recomienda que para el cálculo del factor R se cuente con al menos 20 años de registros de lluvias. En el mismo sentido, Pérez Bidegain et al. (2017), en una actualización de los factores R para Uruguay, recomienda que las estimaciones se basen en 30 años de información debido a la alta variabilidad interanual de las precipitaciones.

Erosividad de la Lluvia en Uruguay

La primera referencia a estudios de erosividad de la lluvia en Uruguay utilizando las metodologías propuestas por Wischmeier y Smith (1958) y Wischmeier (1959) corresponde al trabajo realizado por Rovira et al. (1981), el cual consistió en analizar información pluviográfica de la estación agroclimática ubicada en “La Estanzuela”, departamento de Colonia, para el período 1970-1979.

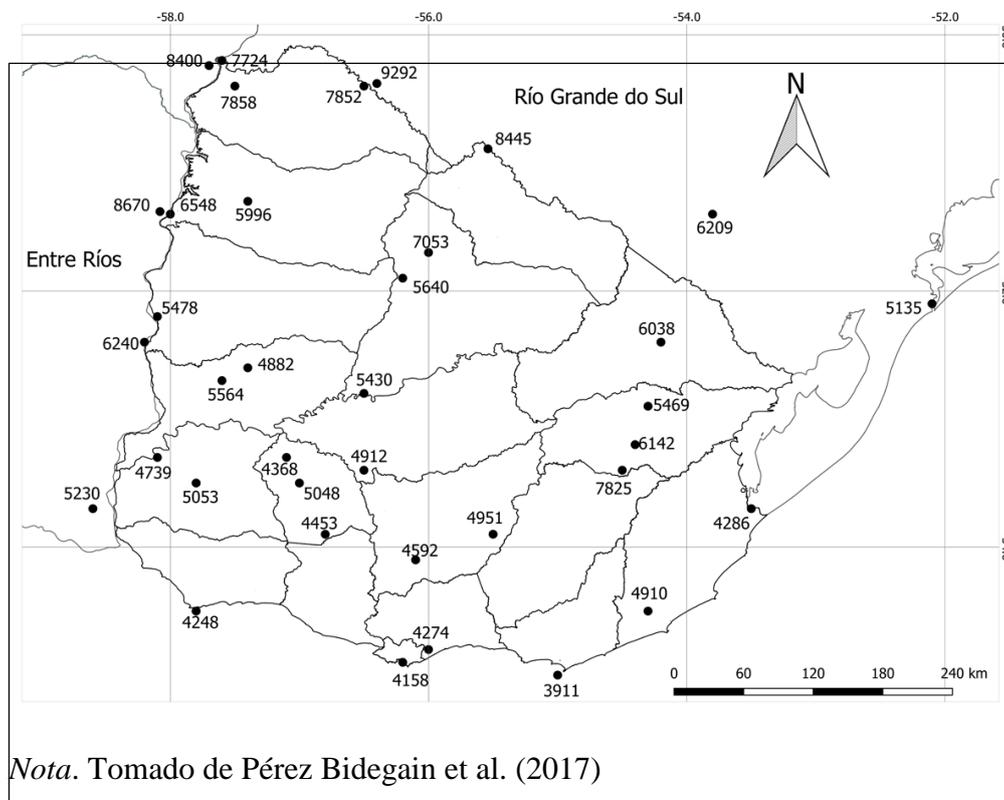
Pannone et al. (1983) y Rovira et al. (1982) extendieron geográficamente el análisis, valiéndose para ello de información pluviográfica de Bella Unión, Montevideo, Paso de los Toros, Paysandú, Rivera y Treinta y Tres. A su vez, en las localidades donde la disponibilidad de registros pluviográficos era limitada estos autores encontraron buenas correlaciones entre los valores de EI_{30} y lámina erosiva mensual, lo que permitió utilizar información pluviométrica para expandir las series de años desde las cuales realizar estimaciones de erosividad.

Sorrondegui (1996) incorpora a la información existente los factores R de Artigas y Tacuarembó, ampliando al mismo tiempo el alcance temporal de las series a 16 años en Tacuarembó y 18 años en Artigas, Paso de los Toros y Rivera.

Los trabajos mencionados se basaron para el cálculo de la energía cinética por unidad de lluvia en el método propuesto por USLE (Wischmeier & Smith, 1965, 1978).

Pannone et al. (1983) presentaron un mapa tentativo de isoerodentas (líneas con igual valor de factor R) que incorporó a los valores nacionales los factores R estimados en algunas localidades argentinas cercanas a Uruguay. Este mapa es ampliado y actualizado posteriormente con información del sur de Brasil y otras localidades de Uruguay por García Préchac et al. (1999) como se cita en Clérico y García Préchac (2001). Estos primeros trabajos muestran una tendencia creciente de suroeste a noreste en los valores de EI_{30} en Uruguay, tendencia que es consistente y confirmada en estudios posteriores (Pérez Bidegain et al., 2017).

Recientemente, Pérez Bidegain et al. (2017) publican una actualización del factor R aplicando la metodología propuesta por Renard y Freimund (1994) para 30 localidades distribuidas en todo el territorio nacional (Figura 4). Las series climáticas empleadas presentan un alcance temporal de 30 años (1980-2009), siendo estos los valores actualmente utilizados en Uruguay.

Figura 4**Distribución Geográfica del Factor R Promedio de 30 años en el Uruguay****Limitantes Metodológicas en la Determinación del Índice EI₃₀**

La aplicación del método propuesto por Wischmeier y Smith (1978) para el cálculo del factor R requiere que se cuente con información pluviográfica de largo plazo (al menos 20 años), lo más actualizada posible y de alta resolución temporal (< 30 minutos) (Panagos et al., 2017). Este tipo de información habitualmente no está disponible o es de acotado alcance temporal (Klik et al., 2015), por lo cual diversos trabajos han abordado enfoques alternativos para levantar esta limitante.

Uno de estos enfoques consiste en estimar la erosividad utilizando ecuaciones que relacionen el índice EI₃₀ (derivado de registros pluviográficos) con datos de precipitación a distintas escalas temporales: diaria (Angulo-Martínez & Beguería, 2009; Hoyos et al., 2005), mensual (Pannone et al., 1983) y anual (Klik et al., 2015). Estas relaciones son específicas de cada sitio o región (Yang & Yu, 2015; Yu & Rosewell, 1996). Por lo cual, las ecuaciones deben ser desarrolladas a

partir de registros pluviográficos de alta resolución temporal disponibles en el área de interés o, en su defecto, de estaciones meteorológicas cercanas (Bonilla & Vidal, 2011; Hoyos et al., 2005; Oliveira et al., 2013).

En Uruguay, metodologías similares a las descritas han permitido completar series pluviográficas que presentan períodos sin registros, o expandir aquellas de acotado alcance temporal con información pluviométrica de largo plazo, utilizándose en todos los casos registros de la misma localidad (García Préchac & Clérico, 1996; Pannone et al., 1983; Sorrondegui, 1996).

Debido a que la magnitud de la erosividad es función de la intensidad de la lluvia, las ecuaciones utilizadas en las estimaciones deben captar las diferencias estacionales en la intensidad de las precipitaciones. De esta forma, eventos de lluvia de igual lámina total acumulada tendrán diferentes valores de EI_{30} de acuerdo con la estación del año en la que ocurre (Bonilla & Vidal, 2011; Pannone et al., 1983; Yang & Yu, 2015).

Desde el punto de vista instrumental las lecturas de las láminas de lluvia se realizaban de forma manual sobre bandas de pluviógrafo, o bien, sobre registros ya digitalizados en planillas electrónicas. Por lo cual, la determinación del índice EI_{30} resultaba en una tarea lenta y laboriosa (C. Clérico, comunicación personal, agosto de 2022).

La posibilidad de contar con información pluviográfica actualizada proveniente de estaciones meteorológicas automáticas de alta resolución temporal en conjunto con las capacidades computacionales actuales permiten la utilización de programas especializados de análisis que reducen significativamente el tiempo de procesamiento.

Objetivos del Trabajo

Objetivo general:

Desarrollar ecuaciones que relacionen el índice EI_{30} derivado de registros pluviográficos con información pluviométrica diaria de largo plazo disponible en estaciones meteorológicas cercanas, permitiendo ampliar la serie de años desde la cual realizar estimaciones de erosividad de la lluvia.

Objetivos específicos:

Incorporar las actuales recomendaciones de RUSLE 2 en lo que respecta al cálculo de la energía cinética total de las tormentas erosivas.

Contribuir al estudio del potencial erosivo de las lluvias en las localidades de Tacuarembó y Rivera, analizando la distribución mensual y estacional promedio del índice de erosividad de las lluvias para el período 1979-2009, su probabilidad de ocurrencia y períodos de retorno.

Materiales y Métodos

Base de Datos

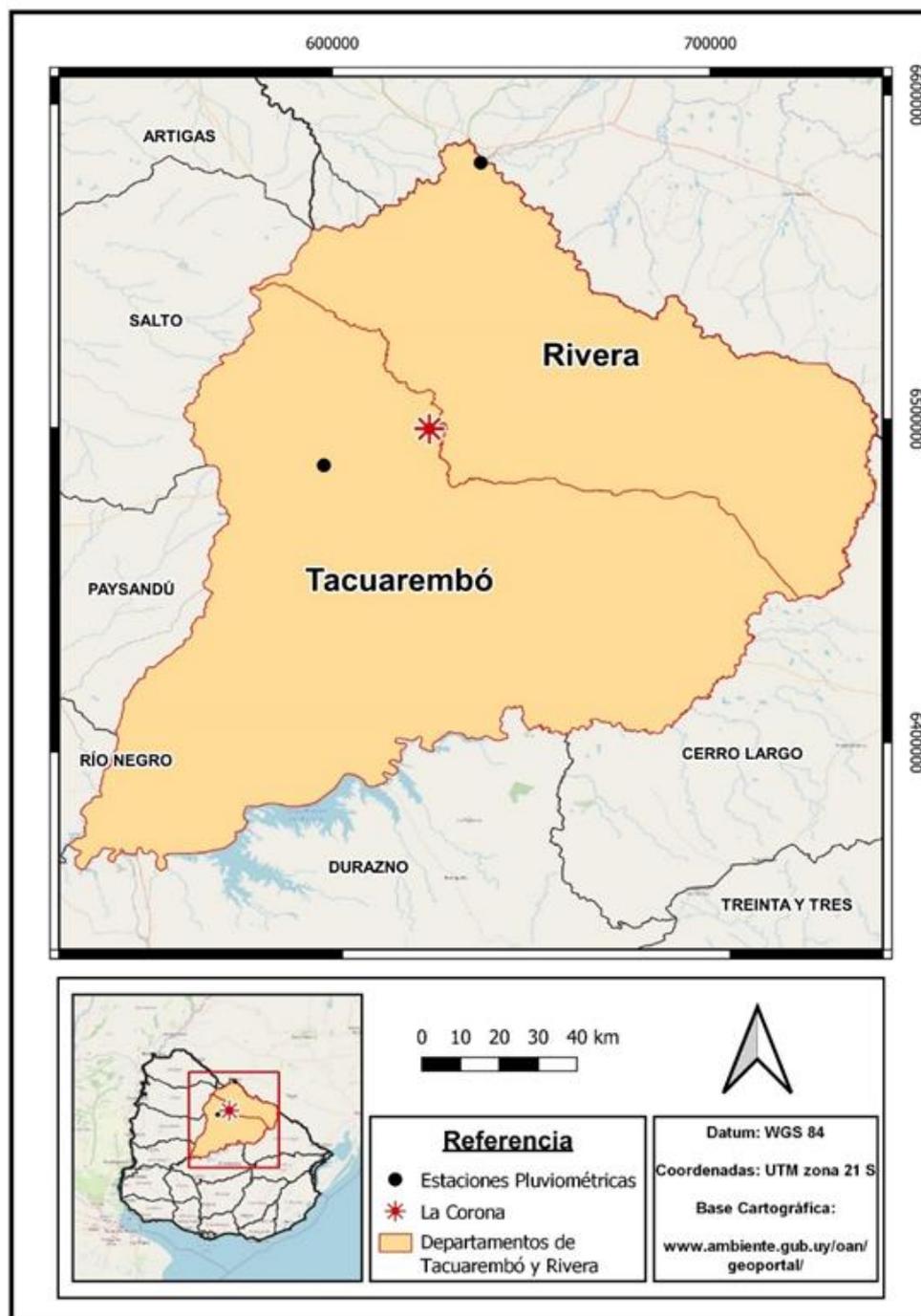
Se utilizaron registros pluviográficos de alta resolución temporal (intervalos de 15 minutos) de una estación meteorológica con sistema de medición automática Campbell Scientific (CR 10X), que cubren el período comprendido entre setiembre de 2000 y diciembre de 2014. La estación se encuentra ubicada en el establecimiento “La Corona” (31°38’09” S, 55°41’48” W; Altitud 170 msnm), al noreste del departamento de Tacuarembó, distante 29 km de la capital departamental y 80 km de la ciudad de Rivera (Figura 5).

La información pluviométrica empleada corresponde a series históricas obtenidas de las estaciones meteorológicas de Tacuarembó (31°42’21” S, 55°59’29” W; Altitud 131 msnm) y Rivera (30°58’13” S, 55°28’25” W; Altitud 217 msnm), las que abarcan un período de 30 años de precipitaciones diarias comprendida entre 1980 y 2009. Las series son las mismas que utilizaron Castaño et al. (2011) y Pérez Bidegain et al. (2017). Los registros de precipitaciones diarias de diciembre de 1979 para Rivera se obtuvieron de Sorrondegui (1996) y los de Tacuarembó del portal de datos agroclimático del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA, s.f.).

El clima de la zona según la clasificación climática de Köppen-Geiger es del tipo “Cfa” caracterizándose como templado-subtropical húmedo, definida por cuatro estaciones, sin estación seca marcada. La temperatura media del mes más cálido es superior a 22°C y la temperatura media del mes más frío entre -3°C y 18°C (Instituto Uruguayo de Meteorología [INUMET], s.f.).

Figura 5

Ubicación de las Estaciones Pluviográficas y Pluviómetricas Utilizadas



Cálculo del Índice EI₃₀ con Información Pluviográfica

Aplicando la metodología propuesta por Wischmeier y Smith (1978) a las series pluviográficas disponibles se determinó el índice EI₃₀ y precipitación

acumulada para cada una de las tormentas erosivas registradas entre setiembre del 2000 y diciembre del 2014.

El procedimiento consistió en:

- i) Identificar tormentas individuales, separando y tomando únicamente los eventos erosivos.
- ii) La energía cinética por milímetro de precipitación en el intervalo de lectura (ek) se determinó aplicando la Ecuación 6 siendo i (mm h^{-1}) la intensidad de lluvia en cada lectura, que es definida por la precipitación acumulada en el intervalo fijo de 15 minutos.
- iii) Calcular la energía cinética total de las tormentas, E (MJ ha^{-1}) mediante la Ecuación 7.
- iv) Determinar la máxima intensidad en un intervalo continuo de 30 minutos de lluvia (I_{30}), para lo cual a lo largo de todas las lecturas que componen una tormenta individual se identificó el período consecutivo de 30 minutos que registró la mayor precipitación. Duplicando ese valor se obtuvo la máxima intensidad de la tormenta expresada en mm.h^{-1} .
- v) Calcular el índice EI_{30} ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$) y precipitación acumulada para cada tormenta mediante la Ecuación 8.

El análisis de la información pluviográfica se realizó con el software Rainfall Intensity Summarization Tool (RIST), versión 3.99.08 (ARS, 2019).

Una vez obtenidos los valores de EI_{30} se procedió a calcular el factor R promedio anual y su distribución estacional para la estación pluviográfica La Corona, empleándose para ello la Ecuación 9.

Estimación del Factor R a Partir de Información Pluviométrica

Ecuaciones Estacionales

Del análisis de la información pluviográfica se seleccionaron únicamente los eventos clasificados como erosivos, es decir, tormentas con láminas acumuladas iguales o mayores a 12.7 mm, o tormentas que registren al menos 6 mm en un período igual o menor a 15 minutos (Intensidad máxima en 15 minutos igual o mayor a 24 mm h⁻¹).

Las lluvias que se extendieron por más de un día fueron asignadas automáticamente por RIST al día en que dio inicio el evento. Si se registraron dos o más tormentas erosivas en un mismo día se unificaron manualmente sumando sus respectivos valores de precipitación y EI₃₀. Este procedimiento es sugerido por Angulo-Martínez y Beguería (2009) para ajustar las series a escala diaria.

A continuación, se extrajeron los valores de precipitación acumulada e índice EI₃₀ correspondiente (variable independiente y dependiente, respectivamente) de cada una de las tormentas erosivas ocurridas en el periodo. Posteriormente se clasificaron los eventos erosivos por estación según Klik et al. (2015), siendo primavera (setiembre-noviembre), verano (diciembre-febrero), otoño (marzo-mayo) e invierno (junio-agosto).

Por último, se transformaron logarítmicamente ambas variables regresoras (Hoyos et al., 2005) y se ajustaron mediante regresión lineal simple las cuatro ecuaciones estacionales que las relacionan.

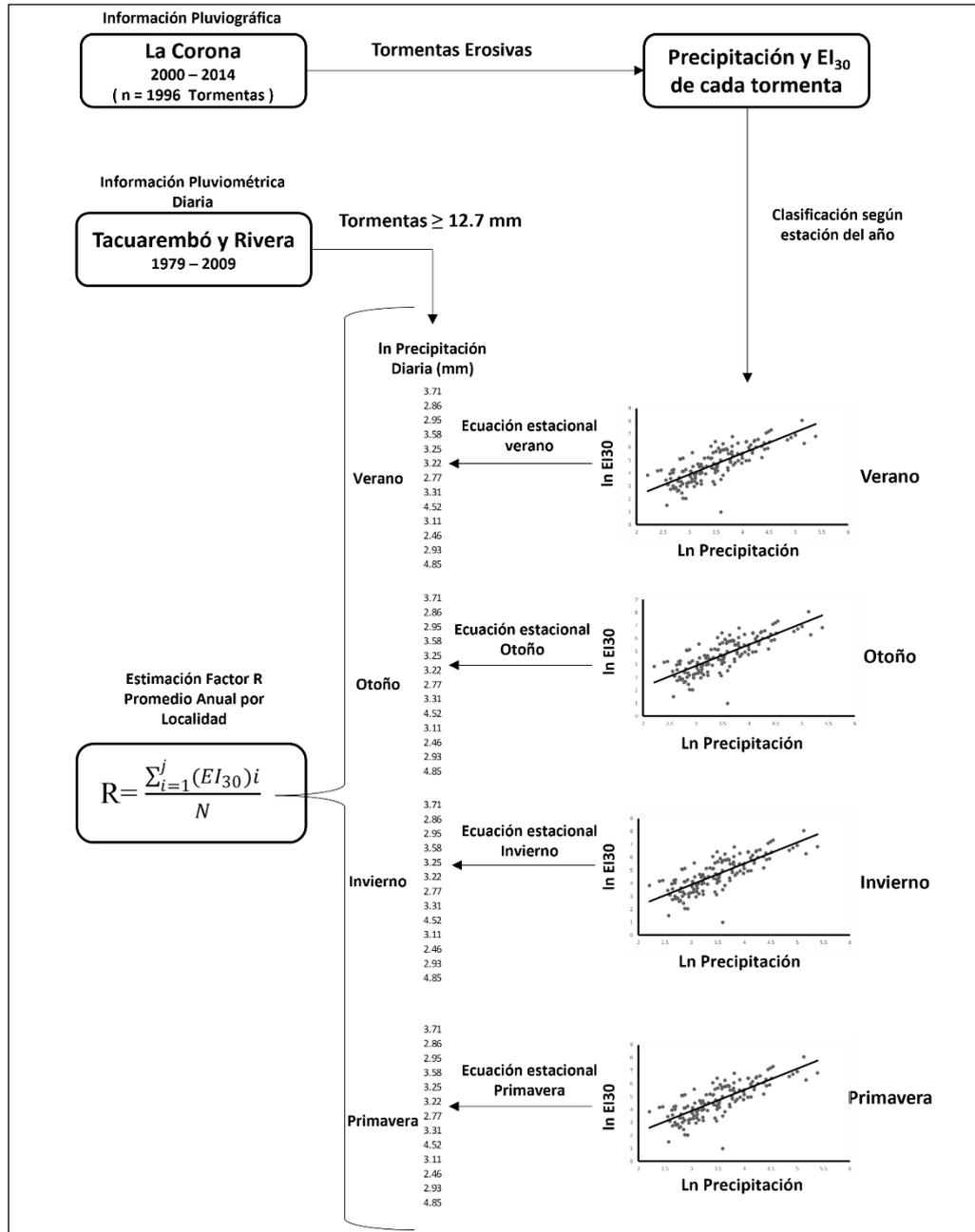
Determinación Factor R en Tacuarembó y Rivera

De las series históricas de precipitación diaria (1979-2009) de Tacuarembó y Rivera se tomaron los días cuya precipitación igualó o superó los 12.7 mm (criterio ya considerado para delimitar un evento erosivo), estimándose los valores de EI₃₀ diario aplicando las ecuaciones específicas a cada estación del año.

Una vez obtenidos los valores de EI₃₀ se empleó la Ecuación 9 para calcular el factor R promedio anual, distribución estacional y mensual en ambas localidades. Un resumen del procedimiento se presenta en la Figura 6.

Figura 6

Flujo de Trabajo Describiendo el Desarrollo de las Ecuaciones Estacionales de Erosividad y Estimación del Factor R en Tacuarembó y Rivera a partir de Información Pluviográfica y Pluviométrica



Probabilidad de Ocurrencia y Periodo de Retorno

El procedimiento para la determinación de la probabilidad de ocurrencia (P) consistió en tomar los valores de EI₃₀ anual y ordenarlos en forma decreciente, asignándoles a su vez un número ordinal. Para el cálculo se empleó la fórmula de Weibull (Weibull, 1939 como se cita en Koolhaas, 1996):

$$P = \frac{m}{(N+1)} \quad (10)$$

donde:

N indica el número de años con datos y *m* es el número ordinal asignado a un índice de erosividad dado.

El mismo procedimiento se aplicó al máximo valor diario anual de EI₃₀, con la particularidad que para cada año se tomó únicamente el máximo valor diario de EI₃₀.

El período de retorno se calculó como la inversa de la probabilidad de ocurrencia (P):

$$T = \left(\frac{1}{P}\right) \quad (11)$$

donde:

T representa el período medio de retorno en años en el que el índice de erosividad puede ser igualado o superado al menos una vez.

Resultados y Discusión

Cantidad de Tormentas, Precipitaciones y Factor R con Base en Registros

Pluviográficos de La Corona

Tormentas Totales y Erosivas

Se registraron en promedio un total de 103.6 tormentas anuales (Tabla 1), observándose una distribución estacional relativamente uniforme en términos porcentuales con un leve pico otoñal.

Tabla 1

Cantidad Media Anual de Tormentas Totales y Distribución Estacional Promedio en el Período 2000-2014 en la Estación Pluviográfica La Corona

Parámetro	Anual		Verano		Otoño		Invierno		Primavera	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Media	103.6		24.3	23.5	28.2	27.2	26.1	25.2	25.0	24.1
Máximo	139.0		37.0	30.2	37.0	33.9	37.0	32.0	42.0	31.5
Mínimo	84.0		17.0	16.8	17.0	20.2	19.0	17.3	14.0	14.2
DE	15.7		5.8		6.2		4.3		7.6	

Nota. Máximo: Valores máximos de la serie; Mínimo: Valores mínimos de la serie; DE: Desvío estándar.

Primavera (Set-Nov), Verano (Dic- Feb), Otoño (Mar-May), Invierno (Jun-Ago)

La media de tormentas erosivas es de 33.9 eventos anuales (Tabla 2). Con respecto al total de las tormentas, tienden a concentrarse en el período primavero – estival (57.4 % contra 47.6 % de las totales), reduciéndose en similar proporción el componente invernal (-7.7 %). La cantidad de tormentas erosivas registradas en La Corona es superior al reportado por Sorrondegui (1996) para Tacuarembó (22), sin

embargo, se condicen con los valores hallados para Rivera por este mismo autor y por Pannone et al. (1983) con 30 y 32.1 eventos erosivos anuales, respectivamente.

Tabla 2

Cantidad Media Anual de Tormentas Erosivas y Distribución Estacional Promedio en el Período 2000-2014 en la Estación Pluviográfica La Corona

Parámetro	Anual		Verano		Otoño		Invierno		Primavera	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Media	33.9		9.7	28.6	8.5	25.1	5.9	17.5	9.8	28.8
Máximo	49.0		17.0	45.9	15.0	39.4	8.0	29.2	16.0	48.5
Mínimo	19.0		4.0	18.2	4.0	14.3	4.0	8.2	5.0	13.5
DE	8.6		3.9		3.8		1.5		4.2	

Nota. Máximo: Valores máximos de la serie; Mínimo: Valores mínimos de la serie; DE: Desvío estándar

Primavera (Set-Nov), Verano (Dic- Feb), Otoño (Mar-May), Invierno (Jun-Ago)

En promedio, el 32.7% de las tormentas ocurridas en un año son erosivas (Tabla 3). Pannone et al. (1983) encontraron para Rivera un valor levemente superior (37.7%) estudiando una serie con 6 años de registros comprendidos entre 1976 y 1981. Sin embargo, la proporción varía a lo largo del año, desde un 22.7% en el invierno hasta casi duplicar ese valor en verano.

Tabla 3

Proporción de Tormentas Erosivas sobre el Total de Tormentas para la Media Anual y Variación de la Proporción de Tormentas Erosivas por Estación del Año. Período 2000-2014 en la Estación Pluviográfica La Corona

Parámetro	NTEA / NTTA (%)	NTEE / NTTE (%)			
		Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Media	32.7	40	30.1	22.7	39.1
Máximo	44.5	57.9	50	36.8	55.6
Mínimo	22.6	19	13.9	14.8	22.2

Nota. Máximo: Valores máximos de la serie; Mínimo: Valores mínimos de la serie; DE: Desvío estándar; NTEA (Número de tormentas erosivas anual); NTTA (Número total de tormentas anual); NTEE (Número de tormentas erosivas estacional); NTTE (Número total de tormentas estacional)

Primavera (Set-Nov), Verano (Dic- Feb), Otoño (Mar-May), Invierno (Jun-Ago)

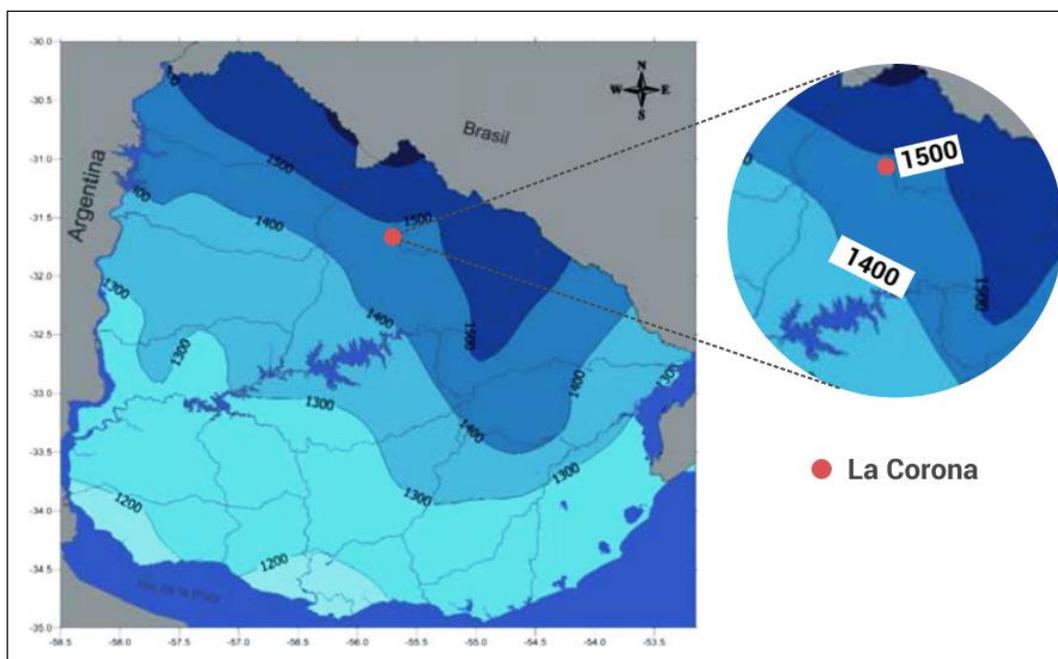
Precipitaciones Totales y Erosivas

La precipitación total media anual para el período 2000-2014 en La Corona es de 1474 mm (Anexo A). Esta cifra es muy similar al valor registrado en Tacuarembó para el período 1980-2009 (1476 mm), la estación pluviométrica más cercana, así como con la isoyeta de 1500 mm (Castaño et al., 2011) (Figura 7) muy próxima a su ubicación, mostrando la representatividad de la serie pluviográfica analizada. Primavera destaca como la estación más lluviosa con algo más del 30% del acumulado promedio anual.

Las precipitaciones erosivas por su parte acumulan una lámina media anual de 1288 mm, con un mínimo de 594 mm y un máximo de 2373 mm (Anexo A). Por lo tanto, las tormentas erosivas a pesar de representar aproximadamente un tercio de los eventos ocurridos son responsables del 87.4% de las precipitaciones medias totales registradas en un año. Primavera y otoño acumulan en promedio el 59% de las precipitaciones erosivas anuales.

Figura 7

Precipitación Media Anual (mm) para el Período 1980 -2009



Nota. Elaborado a partir de Castaño et al. (2011)

Factor R Promedio Anual

El factor R promedio anual de 14 años para La Corona se estimó en 7899 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ (Tabla 4). Considerando el desvío estándar se observa que la variación interanual del índice EI₃₀ es alta, confirmando la necesidad de que las estimaciones se basen en un mayor número de años de registro.

Primavera y otoño concentran en conjunto más del 60% del factor R anual. De enero a abril ocurre el período más crítico, ya que estos cuatro meses agrupan el 38.7 y 45.6% de la precipitación erosiva y erosividad media anual respectivamente (Anexo B).

Tabla 4

Factor R (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹) y Distribución Estacional para el Período 2000-2014 en la Estación Pluviográfica La Corona

Parámetro	Factor R				
	Anual	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
		%	%	%	%
Media	7899	28.8	30.2	10.5	30.5
Máximo	19638	62.7	48.4	35.8	74.3
Mínimo	2393	9.1	4.4	1.0	7.2
DE	4446				

Nota. Máximo: Valores máximos de la serie; Mínimo: Valores mínimos de la serie; DE: Desvío estándar

P: Primavera (Set-Nov), V: Verano (Dic- Feb), O: Otoño (Mar-May), I: Invierno (Jun-Ago)

Relación entre Índice EI₃₀ y Precipitación

Las regresiones estacionales entre precipitación acumulada (ln mm) e índice EI₃₀ asociado (ln MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹) desarrolladas a partir de los registros pluviográficos de La Corona presentan coeficientes de determinación R² ajustado entre 0.66 y 0.82. Los parámetros que las describen se muestran en la Tabla 5.

En regresiones similares para seis estaciones pluviográficas en Colombia donde se analizaron las tormentas sin diferenciar por estación del año, Hoyos et al. (2005) alcanzaron coeficientes de determinación R² ajustado entre 0.61 y 0.70.

Tabla 5

Parámetros de Regresión Describiendo la Relación entre $\ln EI_{30}$ ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$) y \ln de la Precipitación Asociada (mm)

Estación	n	Intercepto	Pendiente	R ² Ajustado
Verano	78	-0.28390	1.64550	0.82
Otoño	85	0.57497	1.30925	0.79
Invierno	55	0.35480	1.28510	0.73
Primavera	90	1.30577	1.12835	0.66

Nota. n = Números de tormentas utilizadas en la regresión; ln = Logaritmo natural

Distribución Estacional y Mensual de las Precipitaciones Totales y Erosivas en Tacuarembó y Rivera

Las series analizadas registraron precipitaciones totales medias anuales de 1476 y 1596 mm para Tacuarembó y Rivera, respectivamente (Anexo C y D). Estos valores son consistentes con el gradiente de crecimiento de las precipitaciones en sentido suroeste-noreste observado en el país por Castaño et al. (2011) (Figura 7). Ambas localidades muestran distribuciones estacionales similares, con otoño como la estación más lluviosa (30% en Tacuarembó), en tanto primavera y verano contribuyen con más del 50% de las precipitaciones totales anuales.

El mes más lluvioso es abril, siendo agosto el de menor lámina total media mensual, tanto en Tacuarembó (164 mm y 81 mm) como en Rivera (183 mm y 87 mm).

Las precipitaciones erosivas medias anuales acompañan en ambas localidades el comportamiento estacional observado para las totales (Anexo C y D). Con relación a estas últimas las precipitaciones erosivas constituyen del 72 al 91% en Tacuarembó y del 71 al 89% en Rivera, con un valor promedio de 84% en ambos sitios.

Al igual que las precipitaciones totales, abril (147 mm en Tacuarembó, 161 mm en Rivera) y agosto (60 mm en Tacuarembó, 65 mm en Rivera) son los meses de mayor y menor lámina erosiva registrada respectivamente.

Factor R con Registros Pluviométricos

Factor R Tacuarembó y Rivera

Los factores R para las series pluviométricas 1979-2009 en Tacuarembó y Rivera se estimaron en 7949 y 8632 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, respectivamente (Tabla 8 y Anexo E). Ambos valores indican un alto potencial erosivo de la lluvia según la clasificación mostrada en la Tabla 6.

Tabla 6

Clasificación del Factor R Anual

Clase de Erosividad	
(MJ.mm ha ⁻¹ h ⁻¹ año ⁻¹)	
0-2452	Baja
2453-4905	Media
4906-7357	Media-Alta
7358-9810	Alta
>9810	Muy alta

Nota. Elaborado a partir de Oliveira et al. (2013)

A continuación, se comparan los resultados de este trabajo con los valores de factor R reportados para Tacuarembó y Rivera por otros autores (Tabla 7).

En el caso de Rivera, el valor hallado es muy similar al obtenido por Pérez Bidegain et al. (2017), observándose una diferencia aproximada del 8% respecto a las estimaciones de Pannone et al. (1983) y Sorrondegui (1996).

En Tacuarembó, el valor de factor R estimado es 13 y 17% mayor a los reportados por Pérez Bidegain et al. (2017) y Sorrondegui (1996), respectivamente. Comparando con el factor R estimado en La Corona, distante 29 km, para el período 2000-2014 (7899 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹), las diferencias son inferiores al 1%.

Tabla 7*Comparación con Factores R Estimados en Otros Estudios de la Misma Zona*

Autor	Factor R (MJ mm (ha h mes) ⁻¹)		Desvío Estándar (MJ mm (ha h mes) ⁻¹)	Años analizados
	Rivera	Tacuarembó		
Pannone et al. (1983)	9300		4560	1976-1981 (6)
Sorrondegui (1996)	9350	6800	3730 ^a 2600 ^b	1977-1994 (18) ^a 1979-1994 (16) ^b
Pérez Bidegain et al. (2017)	8445	7053		1980-2009 (30)

Nota. ^a Rivera; ^b Tacuarembó

Al evaluar los resultados obtenidos en este trabajo es necesario tener en cuenta algunas consideraciones. Por un lado, las conclusiones de Bonilla y Vidal (2011) y Pannone et al. (1983), quienes sostienen que se deben tomar con precaución los valores de factor R promedio anual debido a la gran variación que muestra el índice EI₃₀ entre años, tal como sugieren los desvíos estándar mostrados en las Tablas 4, 7, 8 y Anexo E.

A su vez, se deben considerar los efectos del número de años y el período comprendido en las series climáticas analizadas (pluviográficas y pluviométricas) (Pérez Bidegain et al., 2017), así como las diferencias metodológicas en las estimaciones del factor R. Por último, es necesario evaluar si una única estación pluviográfica resulta suficiente para identificar las variaciones regionales en las precipitaciones, aún en cortas distancias (Yu & Rosewell, 1996).

Teniendo en cuenta lo anterior, los resultados obtenidos para Tacuarembó y Rivera concuerdan con los valores y el comportamiento general de crecimiento sur-noreste de la erosividad de las lluvias reportado en la literatura.

Precipitaciones, Índice EI₃₀ y El Niño Oscilación Sur (ENOS)

Los dos máximos valores de EI₃₀ anuales tanto en Tacuarembó como en Rivera se estimaron en las series 1997/1998 y 2001/2002 (Tabla 8 y Anexo E). Para el caso de Tacuarembó, las precipitaciones totales de estos años superaron en 52 y 78%, respectivamente, la media histórica del período 1979-2009.

Esto último coincide con lo reportado por Bidegain et al. (2017) analizando series pluviométricas diarias que abarcan el período 1971-2015, donde indican que los años 2001/2002 y 1997/1998 son el primero y el tercero de mayor precipitación acumulada, respectivamente, en la cuenca del Río de la Plata. Estos autores lo asocian en el caso de 1997/1998 a uno de los eventos más fuertes de la fase cálida de ENOS (El Niño Oscilación Sur), tratándose la serie 2001/2002 de un evento moderado. Los eventos El Niño se caracterizan por una mayor frecuencia de tormentas extremas, con grandes láminas acumuladas y altas intensidades.

En La Corona, estación situada a 29 km de Tacuarembó, la precipitación total registrada en el año 2002 fue de 2529 mm, estimándose la erosividad anual en 19638 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹. De las 48 tormentas erosivas registradas ese año, sólo 3 de ellas explicaron el 24% de la precipitación total y un 52% del EI₃₀ anual.

Tabla 8

Valores del Índice de Erosividad EI₃₀ Mensual y Anual para Registros Pluviométricos Diarios de Tacuarembó, Período 1979-2009

Índice de erosividad E ₁₃₀													
Año	Mensual												Anual
	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	
1979/1980	629	55	322	1111	1468	220	350	0	326	121	1144	423	6168
1980/1981	2004	608	875	268	392	879	516	259	381	802	0	630	7613
1981/1982	1304	187	2077	62	51	798	504	56	219	993	728	937	7916
1982/1983	49	924	4269	373	418	793	75	506	243	870	370	645	9537
1983/1984	102	971	2361	228	334	1699	630	626	45	969	1152	384	9500
1984/1985	67	552	395	1208	343	1065	359	602	709	641	621	204	6768
1985/1986	254	2004	730	910	1702	1084	122	106	109	512	481	2344	10359
1986/1987	261	1310	143	1280	1258	494	38	243	369	280	423	1317	7418
1987/1988	1438	2674	140	865	323	0	50	417	555	742	274	328	7806
1988/1989	280	203	0	246	467	138	0	125	302	385	502	909	3557
1989/1990	792	52	3030	1500	1401	500	0	0	0	374	896	709	9253
1990/1991	2619	786	0	78	1821	121	513	795	63	492	924	633	8845
1991/1992	1079	609	867	264	1600	1100	685	153	0	152	214	260	6985
1992/1993	3070	1525	176	859	771	3598	347	208	0	102	481	605	11742
1993/1994	2654	727	609	333	104	176	590	955	149	260	909	223	7688
1994/1995	413	125	2975	627	333	209	281	529	0	459	466	303	6721
1995/1996	1123	494	320	285	1574	0	0	125	53	306	146	873	5299
1996/1997	1343	416	961	305	240	1084	212	64	202	130	512	656	6124
1997/1998	3172	5356	1350	1064	1355	1021	768	233	316	806	298	423	16163
1998/1999	522	0	507	429	1278	150	1277	159	126	81	419	155	5103
1999/2000	0	727	2853	255	730	1697	486	228	156	882	885	342	9242

Distribución Estacional y Mensual del Factor R

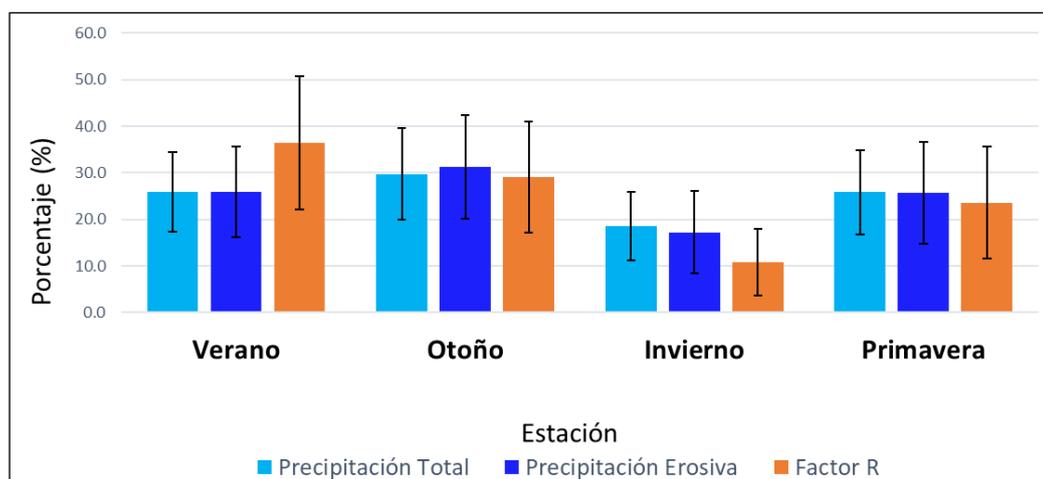
Las Figuras 8 y Anexo F presentan los valores porcentuales estacionales del índice de erosividad EI_{30} , precipitación media total y erosiva con respecto al promedio anual.

En ambas localidades el comportamiento estacional del factor R es en general similar al mostrado por las precipitaciones totales y erosivas. Con respecto a la erosividad, se observa un patrón cíclico de aumento hacia el verano y posterior disminución hacia el invierno, donde las lluvias totales y erosivas determinan la menor erosividad del año.

Verano y otoño concentran aproximadamente el 65 % de la erosividad promedio anual. Dentro de este período, los meses de mayor erosividad son diciembre, febrero y abril, representando entre el 36 y 38% de la erosividad promedio anual (Tabla 8 y Anexo E).

Figura 8

Distribución Estacional del Factor R, Precipitación Promedio Total y Erosiva Anual de 30 años en Tacuarembó



Nota. Verano (Dic- Feb); Otoño (Mar-May); Invierno (Jun-Ago); Primavera (Set-Nov).

Probabilidad de Ocurrencia y Período de Retorno

Las Tablas 9 y Anexo G presentan la erosividad anual y EI₃₀ máximo diario alcanzado en cada año, así como el período de retorno y probabilidad de ocurrencia para Tacuarembó y Rivera, respectivamente.

El máximo valor de EI₃₀ anual (17479 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹) fue calculado en Rivera en la serie 1997/1998. En Tacuarembó este valor alcanzó los 16163 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, también en la serie 1997/1998, ambos con período de retorno de 31 años y probabilidad de ocurrencia de 3.2%

La mínima erosividad anual (3165 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹), con período de retorno de 1 año y probabilidad de ocurrencia de 96.8% correspondió a Tacuarembó en el año 2007/2008.

Los factores R promedio anual de 30 años de Tacuarembó (7949 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹) y Rivera (8632 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹) tienen en ese orden una probabilidad de ocurrencia de 38.6 y 46.8%. Por lo tanto, en promedio estas erosividades pueden ser igualadas o superadas cada 2.6 y 2.1 años, respectivamente.

El mayor valor de erosividad diaria máxima anual es de 4107 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ día⁻¹ (lámina de 186 mm), correspondiente a Rivera en febrero de 1990, con período de retorno de 31 años y probabilidad de ocurrencia de 3.2%. Este único evento explica aproximadamente el 71% de la erosividad total registrada ese verano y 35.5% de la erosividad total anual. De los diez primeros valores máximos de erosividad diaria, ocho en Rivera y nueve en Tacuarembó ocurrieron en verano, principalmente en febrero.

El menor valor de erosividad diaria máxima anual fue de 461 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ (lámina de 69.8 mm), correspondiente a Rivera en el mes de mayo de 1999, probabilidad de ocurrencia de 96.8% y período de retorno de 1 año.

Tabla 9

Período de Retorno y Probabilidad de Ocurrencia de los Índices de Erosividad Anuales y Máximo Diario Anual en Rivera (1979-2009)

Índice de erosividad EI_{30}							
Año	Anual MJ mm (ha h año) ⁻¹	Máximo valor diario anual		Número de orden (m)	Período de retorno T (Años)	Probabilidad de Ocurrencia P (%)	
		Año	Mes				
1997 / 1998	17479	1990	2	4107	1	31	3.2
2001 / 2002	13120	1983	2	3331	2	15.5	6.5
1982 / 1983	12258	1997	12	2937	3	10.3	9.7
1989 / 1990	11565	1995	2	2060	4	7.8	12.9
2000 / 2001	11449	1992	12	1645	5	6.2	16.1
2002 / 2003	10200	2009	2	1545	6	5.2	19.4
1992 / 1993	9931	2001	5	1394	7	4.4	22.6
1979 / 1980	9824	1981	1	1357	8	3.9	25.8
1980 / 1981	9726	1980	4	1340	9	3.4	29.0
2006 / 2007	9555	1985	2	1192	10	3.1	32.3
1981 / 1982	9518	2002	12	1159	11	2.8	35.5
2008 / 2009	9038	2007	1	1126	12	2.6	38.7
1983 / 1984	8958	1998	1	1100	13	2.4	41.9
1991 / 1992	8896	1991	4	1043	14	2.2	45.2
1986 / 1987	8372	2003	12	1019	15	2.1	48.4
1999 / 2000	8353	1994	2	994	16	1.9	51.6
1990 / 1991	8336	1989	1	912	17	1.8	54.8
1984 / 1985	7850	1996	1	888	18	1.7	58.1
1996 / 1997	7784	2006	11	846	19	1.6	61.3
1985 / 1986	7768	1993	12	810	20	1.6	64.5
1993 / 1994	7235	1982	10	795	21	1.5	67.7
1994 / 1995	7140	1988	1	780	22	1.4	71.0
2003 / 2004	6902	1987	3	777	23	1.3	74.2
1987 / 1988	6666	2004	12	752	24	1.3	77.4
2004 / 2005	6615	2000	1	724	25	1.2	80.6
1995 / 1996	6436	1984	2	691	26	1.2	83.9
1998 / 1999	5122	1986	10	588	27	1.1	87.1
2007 / 2008	4534	2008	2	575	28	1.1	90.3
2005 / 2006	4453	2005	10	515	29	1.1	93.5
1988 / 1989	3879	1999	5	461	30	1.0	96.8

Nota. N= 30 años.

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que la metodología utilizada en este trabajo puede ofrecer una alternativa útil en la estimación del factor R, así como de su distribución estacional y mensual, en localidades cercanas donde la información pluviográfica no es accesible, pero se dispone de registros pluviométricos de largo plazo.

Se incorporaron en las estimaciones del índice EI₃₀ las actuales recomendaciones de RUSLE 2 en lo que respecta al cálculo de la energía cinética de las tormentas erosivas.

Los factores R estimados para el período 1979-2009 en Tacuarembó y Rivera son de 7949 y 8632 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Ambos valores indican un alto potencial erosivo de las lluvias. Sus períodos de retorno son de 2.6 y 1.95 años, con probabilidades de ocurrencia de 38.6 y 51.3%, respectivamente.

Las capacidades informáticas actuales, el acceso a registros de estaciones meteorológicas automáticas y a software especializado como RIST determinan que el procesamiento de grandes volúmenes de datos pluviográficos ya no sea una limitante para su análisis. Los esfuerzos, por lo tanto, deben apuntar a una mayor capacidad de adquisición de registros pluviográficos de alta resolución temporal, con amplia cobertura territorial y de largo plazo, lo que permitiría captar e identificar de mejor forma las variaciones temporales y regionales en la erosividad de las lluvias a nivel nacional.

Bibliografía

- Agricultural Research Service. (2013). *Science documentation: Revised Universal Soil Loss Equation: Version 2 (RUSLE 2)*. USDA.
<https://www.ars.usda.gov/southeast-area/oxford-ms/national-sedimentation-laboratory/watershed-physical-processes-research/research/rusle2/revised-universal-soil-loss-equation-2-rusle2-documentation/>
- Agricultural Research Service. (2019). *Rainfall Intensity Summarization Tool (RIST)*. USDA. <https://www.ars.usda.gov/southeast-area/oxford-ms/national-sedimentation-laboratory/watershed-physical-processes-research/research/rist/rist-rainfall-intensity-summarization-tool/>
- Angulo-Martínez, M., & Beguería, S. (2009). Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 379(1-2), 111-121.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.051>
- Bertoni, J., & Lombardi Neto, F. (1993). *Conservação do solo* (3a. ed.). Ícone.
- Bidegain, M., Pasten, M., Nagy, G. J., & Coronel, G. (2017). Tendencias recientes de las precipitaciones e impactos asociados con ENSO en la cuenca del Río de la Plata. *Paraquaria Natural*, 5(2), 11.
- Bonilla, C. A., & Vidal, K. L. (2011). Rainfall erosivity in Central Chile. *Journal of Hydrology*, 410(1-2), 126-133.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.022>
- Borrelli, P., Alewell, C., Álvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddoccu, M., Cerdà, A., Chalise, D., Chen, S., Chen, W., De Girolamo, A. M., Gessesse, G. D., Deumlich, D., Diodato, N., Efthimiou, N., Erpul, G., Fiener, P., ... Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the Total Environment*, 780, e146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>

- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2002). *The nature and properties of soils* (13th. ed.). Prentice Hall.
- Brown, L. C., & Foster, G. R. (1987). Storm erosivity using idealized intensity distributions. *Transactions of the ASAE*, 30(2), 379-386.
- Castaño, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., Aunchayna, R., & Bidegain, M. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009*. INIA.
- Clérici, C., & García Préchac, F. (2001). Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del Río de la Plata. *Agrociencia (Uruguay)*, 5(1), 92-103.
- Durán, A., & García Préchac, F. (2007). *Suelos del Uruguay: Origen, clasificación, manejo y conservación* (Vol. 2). Hemisferio Sur.
- Foster, G. R., McCool, D. K., Renard, K. G., & Moldenhauer, W. C. (1981). Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36(6), 355-359.
- García Préchac, F. (1992). *Guía para la toma de decisiones en conservación de suelos: 3a. aproximación*. INIA.
- García Préchac, F., & Clérici, C. (1996). *Utilización del modelo USLE/RUSLE en Uruguay* [Contribución]. XIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Aguas de Lindoia, SP, Brasil.
- García Préchac, F., Terra, J., Sawchic, J., & Pérez Bidegain, M. (2017). Improving USLE / RUSLE estimations using runoff plots data to consider the effect of soil water content. *Agrociencia (Uruguay)*, 21(2), 100-104.
<https://doi.org/10.31285/AGRO.21.2.12>
- Gunn, R., & Kinzer, G. D. (1949). The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 6(4), 243-248.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1949\)006<0243:TTVOFF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1949)006<0243:TTVOFF>2.0.CO;2)
- Hill, M. (2007). *Incorporación del efecto del contenido de agua en el suelo en el modelo USLE/RUSLE para estimar erosión en Uruguay* [Tesis de maestría]. Universidad de la República.

- Hoyos, N., Waylen, P. R., & Jaramillo, Á. (2005). Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Journal of Hydrology*, 314(1-4), 177-191.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.014>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.). *Portal INIA Banco datos agroclimático*. <http://www.inia.uy:80/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
- Instituto Uruguayo de Meteorología. (s.f.). *Clasificación climática*.
<https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/clasificacion-climatica>
- Kinnell, P. I. A. (2010). Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. *Journal of Hydrology*, 385(1-4), 384-397. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.024>
- Klik, A., Haas, K., Dvorackova, A., & Fuller, I. C. (2015). Spatial and temporal distribution of rainfall erosivity in New Zealand. *Soil Research*, 53(7), 815-825. <https://doi.org/10.1071/SR14363>
- Koolhaas, M. (1996). *Embalses agrícolas: Diseño y construcción*. Hemisferio Sur.
- Laws, J. O. (1941). Measurements of the fall-velocity of water -drops and raindrops. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 22(3), 709-721. <https://doi.org/10.1029/TR022i003p00709>
- Laws, J. O., & Parsons, D. A. (1943). The relation of raindrop-size to intensity. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 24(2), 452-460.
<https://doi.org/10.1029/TR024i002p00452>
- McGregor, K. C., Bingner, R. L., Bowie, A. J., & Foster, G. R. (1995). Erosivity Index values for Northern Mississippi. *Transactions of the ASAE*, 38(4), 1039-1047. <https://doi.org/10.13031/2013.27921>

- Nearing, M. A., Yin, S., Borrelli, P., & Polyakov, V. O. (2017). Rainfall erosivity: An historical review. *CATENA*, *157*, 357-362.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.004>
- Oliveira, P. T. S., Wendland, E., & Nearing, M. A. (2013). Rainfall erosivity in Brazil: A review. *CATENA*, *100*, 139-147.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.006>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). *Status of the world's soil resources: Main report*.
<https://www.fao.org/3/i5199e/I5199E.pdf>
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K. J., Yang, J. E., Ni, J., Miao, C., Chattopadhyay, N., Sadeghi, S. H., Hazbavi, Z., Zabihi, M., Larionov, G. A., Krasnov, S. F., Gorobets, A. V., Levi, Y., Erpul, G., Birkel, C., ... Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, *7*(1), e4175. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
- Pannone, J., García, F., & Rovira, L. A. (1983). *Índice de erosividad de lluvias en Uruguay: Factor R de la ecuación universal de pérdida de suelo*. IICA.
- Peake, L. R., & Robb, C. (2022). The global standard bearers of soil governance. *Soil Security*, *6*, e100055. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100055>
- Pérez Bidegain, M., Hill, M., Clérici, C., Terra, J., Sawchik, J., & García Préchac, F. (2018). Regulatory utilization of USLE/RUSLE erosion rate estimates in Uruguay: A policy coincident with the UN sustainable development goals. En R. Lal, R. Horn & T. Kosaki (Eds.), *Soil and sustainable development goals* (pp. 82-91). Catena-Schweizerbart.
- Pérez Bidegain, M., Piaggio, J. M., Baethgen, W., & García Préchac, F. (2017). Actualización del factor erosividad de la lluvia en Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, *21*(2), 91-99.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (2a. ed.). Mundi-Prensa.

- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. USDA.
<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19971903652>
- Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157(1-4), 287-306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
- Rovira, L. A., Corsi, W., García, F., & Hofstadter, R. (1981). *Intensidades máximas y erosividad de lluvias en el área de influencia de la Estación Agroclimática «La Estanzuela»*. MAP.
- Rovira, L. A., Corsi, W., García, F., & Hofstadter, R. (1982). *Erosividad de las lluvias en las zonas de influencia de las Estaciones Agroclimáticas La Estanzuela, Paysandú, Bella Unión y Treinta y Tres*. MAP.
- Sorrondegui, C. M. (1996). *Erosividad de las lluvias en la región noreste del Uruguay* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Terra, J., & García Préchac, F. (2001). *Siembra directa y rotaciones forrajeras en las Lomadas del Este: Síntesis 1995-2000*. INIA.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2869/1/111219240807141051.pdf>
- Todisco, F., Vergni, L., Vinci, A., & Pampalone, V. (2019). Practical thresholds to distinguish erosive and rill rainfall events. *Journal of Hydrology*, 579, e124173. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124173>
- van Dijk, A. I. J. M., Bruijnzeel, L. A., & Rosewell, C. J. (2002). Rainfall intensity–kinetic energy relationships: A critical literature appraisal. *Journal of Hydrology*, 261(1-4), 1-23. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00020-3)
- Wischmeier, W. H. (1959). A rainfall erosion index for a Universal Soil-Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, 23(3), 246-249.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1959.03615995002300030027x>

- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 39(2), 285-291. <https://doi.org/10.1029/TR039i002p00285>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1965). *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation*. USDA.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. USDA.
- Yang, X., & Yu, B. (2015). Modelling and mapping rainfall erosivity in New South Wales, Australia. *Soil Research*, 53(2), 173-178. <https://doi.org/10.1071/SR14188>
- Yu, B., & Rosewell, C. (1996). Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts for South Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 34(5), 721-733. <https://doi.org/10.1071/SR9960721>
- Zurbriggen, C., González-Lago, M., Baraibar, M., Baethgen, W., Mazzeo, N., & Sierra, M. (2020). Experimentation in the design of public policies: The uruguayan soils conservation plans. *Iberoamericana – Nordic Journal of Latin American and Caribbean Studies*, 49(1), 52-62. <https://doi.org/10.16993/iberoamericana.459>

Anexos

Anexo A

Precipitación Media Total y Erosiva Anual, Distribución Estacional y Proporción de Precipitaciones Erosivas como Porcentaje de las Precipitaciones Totales para el Período 2000-2014 en la Estación Pluviográfica La Corona.

Parámetro	Precipitaciones Totales				Precipitaciones Erosivas				PpE / PpT %	
	Anual mm	Verano %	Otoño %	Invierno %	Primavera %	Anual mm	Verano %	Otoño %		Invierno %
Media	1474	25.0	27.4	17.1	30.5	1288	25.3	27.7	15.8	87.4
Máximo	2529	49.1	41.8	32.5	56.3	2373	51.7	43.8	33.5	93.8
Mínimo	807	12.6	10.3	8.6	12.2	594	10.6	9.2	5.8	73.6
DE	472					480				

Nota. Máximo: Valores máximos de la serie; Mínimo: Valores mínimos de la serie; DE: Desvío estándar; PpE: Precipitación erosiva; PpT: Precipitación total. Primavera (Set-Nov), Verano (Dic-Feb), Otoño (Mar-May), Invierno (Jun-Ago).

Anexo B

Valores del Índice de Erosividad EI₃₀ Mensual y Anual para Registros Pluviográficos de La Corona, Período 2000-2014.

Año	Índice de erosividad EI ₃₀												
	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Anual
	MJ mm (ha h mes) ⁻¹												
	MJ mm (ha h año) ⁻¹												
2000/2001	761	1056	1092	4159	1441	285	91	0	30	1739	520	989	12162
2001/2002	198	2967	144	1486	5829	148	200	202	435	1235	4709	2085	19638
2002/2003	631	1173	1444	1124	3722	589	79	0	220	147	1196	1196	11519
2003/2004	639	425	128	101	1029	21	90	196	0	399	310	647	3985
2004/2005	202	141	844	330	1139	2006	1330	42	102	338	1099	0	7573
2005/2006	31	141	273	67	113	147	830	0	22	115	487	167	2393
2006/2007	107	509	1701	1218	1160	249	315	0	148	65	492	0	5965
2007/2008	244	210	99	45	235	453	68	498	571	27	349	378	3176
2008/2009	515	0	349	82	0	335	457	208	496	449	1391	5204	9486
2009/2010	1635	516	2305	852	154	294	381	347	115	429	29	52	7109
2010/2011	1703	168	418	717	224	262	349	128	29	3	382	536	4918
2011/2012	10	94	3252	77	573	74	1673	55	535	735	1059	246	8381
2012/2013	1566	153	1522	233	489	1465	78	117	81	539	1143	927	8314
2013/2014	107	1285	1145	332	0	91	549	541	50	377	948	543	5968
Media	596	631	1051	773	1151	458	464	167	202	471	1008	926	7899
Máximo	1703	2967	3252	4159	5829	2006	1673	541	571	1739	4709	5204	19638
Mínimo	10	0	99	45	0	21	68	0	0	3	29	0	2393
DE	612	795	934	1089	1659	572	496	182	211	489	1142	1356	4446
CV (%)	103	126	89	141	144	125	107	109	104	104	113	146	56
DPPM (%)	7.6	8.0	13.3	9.8	14.6	5.8	5.9	2.1	2.6	6.0	12.8	11.7	100.0

Nota. Máximo: Valores máximos de la serie; Mínimo: Valores mínimos de la serie; DE: Desvío estándar; CV: Coeficiente de variación; DPPM: Distribución porcentual promedio mensual.

Anexo C

Precipitación Media Total y Erosiva Anual, Distribución Estacional y Proporción de Precipitaciones Erosivas como Porcentaje de las Precipitaciones Totales para el Período 1979-2009 en Tacuarembó.

Parámetro	Precipitaciones Totales			Precipitaciones Erosivas			PpE / PpT %				
	Anual mm	V %	O %	I %	P %	Anual mm		V %	O %	I %	P %
Media	1476	26	30	19	26	1236	26	31	17	26	84
Máximo	2623	43	44	34	59	2389	42	49	37	66	91
Mínimo	817	11	3	4	11	607	10	2	0	10	72
DE	392					386					

Nota. Máximo: Valores máximos de la serie; Mínimo: Valores mínimos de la serie; DE: Desvío estándar; PpE: Precipitación erosiva; Ppt: Precipitación total. Primavera (Set-Nov), Verano (Dic-Feb), Otoño (Mar-May), Invierno (Jun-Ago).

Anexo D

Precipitación Media Total y Erosiva Anual, Distribución Estacional y Proporción de Precipitaciones Erosivas como Porcentaje de las Precipitaciones Totales para el Período 1979-2009 en Rivera.

Parámetro	Precipitaciones Totales			Precipitaciones Erosivas						PpE / PpT %	
	Anual mm	V %	O %	I %	P %	Anual mm	V %	O %	I %		P %
Media	1596	26	29	18	27	1345	26	30	17	27	84
Máximo	2494	47	41	33	56	2214	50	44	35	61	89
Mínimo	895	12	12	3	13	637	10	9	0	12	71
DE	363					355					

Nota. Máximo: Valores máximos de la serie; Mínimo: Valores mínimos de la serie; DE: Desvío estándar; PpE: Precipitación erosiva; PpT: Precipitación total. Primavera (Set-Nov), Verano (Dic-Feb), Otoño (Mar-May), Invierno (Jun-Ago).

Anexo E

Valores del Índice de Erosividad EI_{30} Mensual y Anual para Registros Pluviométricos Diarios de Rivera, Período 1979-2009.

Año	Índice de erosividad EI_{30}												Anual
	Mensual												
	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	
1979/1980	575	119	618	781	2486	313	678	349	332	0	2563	1008	9824
1980/1981	1599	2646	2259	126	648	576	290	233	55	843	192	259	9726
1981/1982	1210	308	1075	331	243	1353	276	386	750	1356	1080	1150	9518
1982/1983	552	437	6288	477	341	1275	476	483	128	456	585	761	12258
1983/1984	55	1973	1071	369	745	1659	616	276	119	851	290	936	8958
1984/1985	243	313	1675	1407	460	1471	482	363	299	639	429	69	7850
1985/1986	65	897	68	976	1321	1085	47	64	164	485	926	1672	7768
1986/1987	0	781	539	1644	1503	746	56	700	595	1127	243	438	8372
1987/1988	763	2296	315	670	168	0	268	0	128	1264	202	592	6666
1988/1989	253	1001	0	173	525	0	0	0	345	168	550	864	3879
1989/1990	475	505	4757	1497	1160	215	0	0	0	543	1023	1389	11565
1990/1991	1787	625	279	65	2662	372	266	385	0	344	1072	481	8336
1991/1992	508	303	1944	730	2354	983	691	251	123	423	216	370	8896
1992/1993	1962	1246	650	203	491	2480	567	197	0	80	1315	741	9931
1993/1994	1517	400	1836	285	349	284	250	334	158	406	1066	350	7235
1994/1995	86	607	2633	474	278	430	219	935	0	418	594	467	7140
1995/1996	164	2415	682	226	1329	0	63	0	170	269	586	532	6436
1996/1997	370	315	2322	0	669	1168	325	524	295	66	999	730	7784
1997/1998	7308	3219	898	1104	1267	667	987	214	356	776	368	316	17479
1998/1999	1064	0	427	371	887	461	426	217	81	316	778	93	5122
1999/2000	176	2197	421	720	218	1590	658	263	232	549	752	577	8353

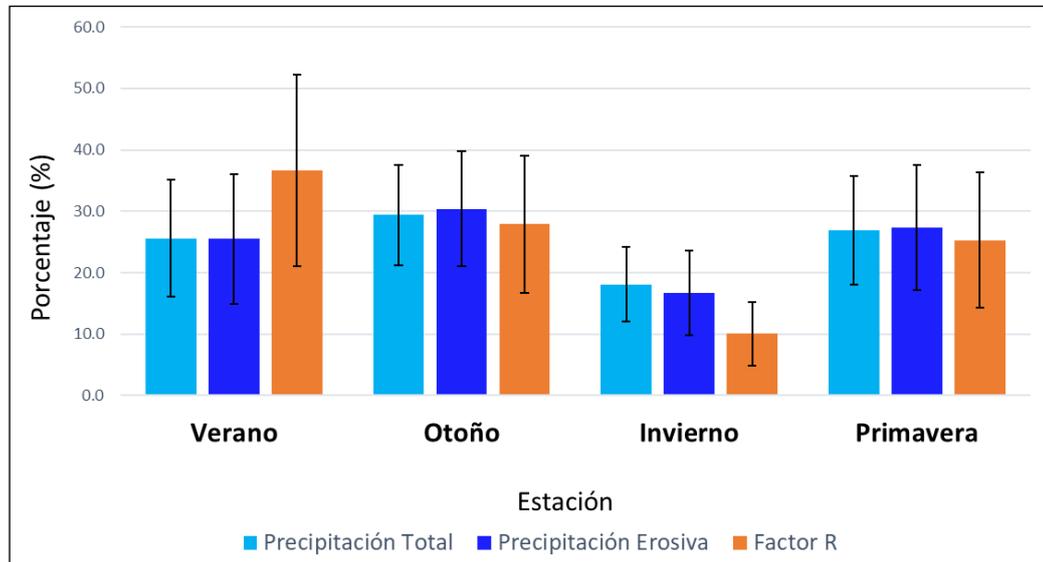
Anexo E Continuación

Índice de erosividad E ₃₀													
Año	Mensual												Anual
	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	
	MJ mm (ha h mes) ⁻¹												MJ mm (ha h año) ⁻¹
2000 / 2001	155	1324	404	750	2528	1756	209	333	357	2197	544	892	11449
2001 / 2002	482	301	946	1523	2398	1090	455	668	563	1311	1783	1601	13120
2002 / 2003	2591	221	1717	463	1684	1066	402	42	496	360	360	798	10200
2003 / 2004	2009	0	745	325	957	162	263	182	0	789	617	853	6902
2004 / 2005	936	667	0	694	333	862	337	54	626	674	1097	336	6615
2005 / 2006	160	219	0	507	418	495	475	100	0	429	542	1108	4453
2006 / 2007	565	1303	1882	2208	552	344	254	122	549	452	1183	141	9555
2007 / 2008	292	58	773	80	275	368	361	326	496	278	1010	217	4534
2008 / 2009	95	101	2796	148	0	494,958983	42	143	153	1208	693	3164	9038
Media	934	893	1334	644	975	792	348	271	252	636	789	763	8632
Máximo	7308	3219	6288	2208	2662	2480	987	935	750	2197	2563	3164	17479
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	192	69	3879
DE	1391	892	1413	546	809	609	235	225	220	477	508	617	2806
CV (%)	149	100	106	85	83	77	67	83	87	75	64	81	33
DPPM (%)	10.8	10.3	15.5	7.5	11.3	9.2	4.0	3.1	2.9	7.4	9.1	8.8	100

Nota. Máximo: Valores máximos de la serie; Mínimo: Valores mínimos de la serie; DE: Desvío estándar; CV: Coeficiente de variación; DPPM: Distribución porcentual promedio mensual.

Anexo F

Distribución Estacional del Factor R, Precipitación Promedio Total y Erosiva Anual de 30 años en Rivera



Nota. Verano (Dic- Feb); Otoño (Mar-May); Invierno (Jun-Ago); Primavera (Set-Nov).

Anexo G

Período de Retorno y Probabilidad de Ocurrencia de los Índices de Erosividad Anuales y Máximo Diario Anual en Tacuarembó (1979-2009).

Índice de erosividad EI_{30}							
Año	Anual MJ mm (ha h año) ⁻¹	Máximo valor diario anual			Número de orden (m)	Período de retorno T (Años)	Probabilidad de Ocurrencia P (%)
		Año	Mes	MJ mm (ha h día) ⁻¹			
1997 / 1998	16163	1998	1	3523	1	31	3.2
2001 / 2002	15704	1983	2	3107	2	15.5	6.5
1992 / 1993	11742	1992	12	2458	3	10.3	9.7
1985 / 1986	10359	2000	2	2266	4	7.8	12.9
2002 / 2003	10352	1990	2	2052	5	6.2	16.1
2000 / 2001	9965	1980	12	1812	6	5.2	19.4
1982 / 1983	9537	1995	2	1778	7	4.4	22.6
1983 / 1984	9500	2002	1	1645	8	3.9	25.8
1989 / 1990	9253	1986	1	1428	9	3.4	29.0
1999 / 2000	9242	1993	5	1375	10	3.1	32.3
1990 / 1991	8845	2005	6	1177	11	2.8	35.5
1981 / 1982	7916	1984	5	1150	12	2.6	38.7
1987 / 1988	7806	2001	3	1078	13	2.4	41.9
1993 / 1994	7688	1987	3	1041	14	2.2	45.2
1980 / 1981	7613	1999	4	947	15	2.1	48.4
2006 / 2007	7532	1982	2	920	16	1.9	51.6
1986 / 1987	7418	1997	5	901	17	1.8	54.8
2004 / 2005	7277	2003	4	886	18	1.7	58.1
1991 / 1992	6985	1988	1	818	19	1.6	61.3
1984 / 1985	6768	2008	5	731	20	1.6	64.5
1994 / 1995	6721	1985	5	708	21	1.5	67.7
2008 / 2009	6499	2004	1	697	22	1.4	71.0
1979 / 1980	6168	1996	4	677	23	1.3	74.2
1996 / 1997	6124	1989	12	663	24	1.3	77.4
1995 / 1996	5299	1981	12	635	25	1.2	80.6
1998 / 1999	5103	1991	4	588	26	1.2	83.9
2005 / 2006	4359	2009	12	550	27	1.1	87.1
2003 / 2004	3799	1994	2	542	28	1.1	90.3
1988 / 1989	3557	2006	1	510	29	1.1	93.5
2007 / 2008	3165	2007	2	470	30	1.0	96.8

Nota. N= 30 años.