

**EROSIVIDAD DE LA LLUVIA EN EL DEPARTAMENTO DE ALTO
PARANÁ, PARAGUAY**

ROSALBA BEATRIZ RODRÍGUEZ CRISTALDO

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de
Asunción, como requisito para la obtención del título de Magíster en Ciencia del
Suelo y Ordenamiento Territorial

Universidad Nacional de Asunción

Facultad de Ciencias Agrarias

Dirección de Postgrado

San Lorenzo, Paraguay

2012

**EROSIVIDAD DE LA LLUVIA EN EL DEPARTAMENTO DE ALTO
PARANÁ, PARAGUAY**

ROSALBA BEATRIZ RODRÍGUEZ CRISTALDO

Orientador: Prof. Ing. Agr. Dr. Carlos Andrés Leguizamón Rojas

Co-orientador: Prof. Ing. Agr. Met. Henry Benicio Valiente Ramírez

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la obtención del título de Magíster en Ciencia del Suelo y Ordenamiento Territorial

Universidad Nacional de Asunción

Facultad de Ciencias Agrarias

Dirección de Postgrado

San Lorenzo, Paraguay

2012

Universidad Nacional de Asunción
Facultad de Ciencias Agrarias
Dirección de Postgrado

**EROSIVIDAD DE LA LLUVIA EN EL DEPARTAMENTO ALTO PARANÁ,
PARAGUAY**

Esta Tesis fue aprobada por la Mesa Examinadora como requisito parcial para optar por el título de Magíster en Ciencia del Suelo y Ordenamiento Territorial otorgado por la Facultad de Ciencias Agrarias/UNA

Autor: Ing. Agr. Rosalba Beatriz Rodríguez Cristaldo _____

Orientador: Prof. Ing. Agr. Dr. Carlos Andrés Leguizamón Rojas _____

Miembros de la Mesa Examinadora

Prof. Ing. Agr. MSc. María del Pilar Galeano Samaniego _____

Prof. Ing. Agr. MSc. Rubén Alcides Franco Ibars _____

Prof. Ing. Agr. MSc. Miguel Ángel Ken Moriya Roa _____

Prof. Ing. Agr. Dr. Carlos Andrés Leguizamón Rojas _____

San Lorenzo, 18 de Diciembre 2012

*A Dios.
A mis padres Eladio (+) y Rosalba,
mis hermanos Antonella, Eladio y Pamela(+).*

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fuerza y voluntad para levantarme después de los tropiezos y seguir luchando.

A mi padre, por haberme enseñado que la calidad no es hacer las cosas bien sino poner todo de uno para que las cosas salgan bien y que lo maravilloso de aprender es que absolutamente nadie puede arrebatártelo.

A mi madre, por su constante apoyo y aliento en todos los momentos de mi vida.

A mi Orientador el Prof. Ing. Agr. Carlos A. Leguizamón R., por la experiencia compartida y la dedicación.

Al Prof. Ing. Agr. Henry Valiente R., por su apoyo constante y su colaboración en la realización del trabajo.

Al Lic. Max Pastén y los funcionarios de la Dirección de Meteorología e Hidrología, por su colaboración y disposición incondicional para el desarrollo de este trabajo.

A todos los profesores de la Maestría en Ciencia del Suelo y Ordenamiento Territorial y del Departamento de Suelos y Ordenamiento Territorial, por haberme brindado su colaboración y apoyo incondicional para la realización de esta tesis.

A mis amigos y compañeros todos de la Maestría en Ciencia del Suelo y Ordenamiento Territorial que estuvieron ahí para darme su aliento de apoyo y llegar a la culminación de este trabajo.

EROSIVIDAD DE LA LLUVIA EN EL DEPARTAMENTO ALTO PARANÁ, PARAGUAY

Autora: Ing. Agr. ROSALBA BEATRIZ RODRÍGUEZ CRISTALDO
Orientador: Prof. Ing. Agr. Dr. CARLOS ANDRÉS LEGUIZAMÓN ROJAS
Co-orientador: Prof. Ing. Agr. Met. HENRY BENICIO VALIENTE RAMÍREZ

Resumen

La erosión hídrica resulta de la erosividad de la lluvia y de la erosionabilidad de los suelos. El conocimiento de la erosividad, por lo tanto, se vuelve una guía valiosa en la recomendación de las prácticas de manejo y conservación del suelo que garanticen la disminución de la erosión hídrica. El objetivo del trabajo fue estimar la erosividad de las lluvias en el Departamento Alto Paraná de la Región Oriental del Paraguay. La investigación se llevó a cabo utilizando datos de registros pluviográficos de periodos 1.969 – 1.980 y 2.000 – 2.006 de la estación meteorológica de la Dirección de Meteorología e Hidrología del distrito de Minga Guazú situado en las coordenadas 25°27'21'' de latitud Sur y 54°59'24'' de longitud Oeste. Las variables evaluadas fueron la cantidad de lluvia caída y acumulada; el tiempo de retorno; la frecuencia de las lluvias erosivas; la precipitación mensual media; precipitación total anual; los índices de erosividad EI_{30} y $KE>25$; la frecuencia de los índices de erosividad EI_{30} y $KE>25$ y, el riesgo de erosión por erosividad de la lluvia. Fueron estudiadas 560 lluvias erosivas, de un total de 943 lluvias, con un promedio anual de precipitación acumulada de 1.012,6mm de lluvias erosivas. Los índices EI_{30} y $KE>25$ constituyen el factor de erosividad (factor R de la USLE), los cuales fueron calculados por la metodología propuesta por Wischmeier y Smith (1.958), que consiste en la sumatoria de las energías cinéticas de los segmentos de lluvia con la misma inclinación o intensidad para el índice EI_{30} y por la sumatoria de la energía cinética total de los segmentos con intensidades mayores a 25mm h⁻¹ para el índice $KE>25$, los valores anuales medios de EI_{30} y $KE>25$ de las lluvias erosivas fueron de 7.525 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹-año⁻¹ y 126,8 MJ ha⁻¹ año⁻¹. Las distribuciones medias mensuales y estacionales de los índices de erosión permitieron identificar el periodo de mayor riesgo de erosividad, que comprende los meses de enero, mayo, octubre y diciembre, representando del valor medio anual de EI_{30} y $KE>25$ el 53,3 y 51,3 % respectivamente. La distribución del tiempo de retorno y la probabilidad de ocurrencia de los índices de erosión evidenciaron que la mayor parte de las lluvias altamente erosivas coinciden con la época de preparación del suelo y siembra de los cultivos. El alto coeficiente de correlación de la regresión entre los índices medios mensuales y el coeficiente de precipitación posibilita estimar los valores medios mensuales y anuales de la erosividad de la lluvia utilizando datos pluviométricos de localidades con condiciones pluviales similares al área de estudio, las correlaciones entre los índices medio mensuales (EI_{30m} y $KE>25m$), los coeficientes de precipitación para los datos de las tres estaciones con registros históricos y las pérdidas de suelo tanto en el sistema convencional como en el sistema de siembra directa son muy bajas, lo que sugiere que estas pérdidas estarían influenciadas por otros factores del suelo.

Palabras clave: Erosividad de la lluvia, Energía Cinética, Alto Paraná

EROSIVIDADE DE CHUVA NO DEPARTAMENTO ALTO PARANÁ, PARAGUAI

Autor: Ing. Agr. ROSALBA BEATRIZ RODRÍGUEZ CRISTALDO
Orientador: Prof. Ing. Agr. Dr. CARLOS ANDRÉS LEGUIZAMÓN ROJAS
Co-orientador: Prof Ing. Agr. Met. HENRY BENICIO VALIENTE RAMÍREZ

Resumo

A erosão hídrica resultante da erosividade das chuvas e da erodibilidade dos solos. O conhecimento da erosividade, portanto, torna-se uma guia valiosa na recomendação práticas de manejo e conservação do solo para garantir a redução da erosão hídrica. O objetivo do trabalho foi estimar a erosividade das chuvas no departameto Alto Paraná da região oriental do Paraguai. A pesquisa foi realizada utilizando períodos de registro de dados pluviográficas 1969-1980 e 2000-2006 a partir da estação meteorológica da Direção de Meteorologia e Hidrologia do distrito Minga Guazú situado nas coordenadas 25°27'21" de latitude Sul e 54°59'24" de longitude Oeste. As variáveis estudadas foram a quantidade de chuva e acumulados de chuva, o tempo de retorno, a frequência de chuva erosiva, a precipitação média mensal, precipitação anual; índices de erosividade EI_{30} e $KE>25$, a frequência de índices de erosividade EI_{30} e $KE>25$ e o risco de erosão pela erosividade da chuva. Foram estudados 560 chuvas erosivas, de um total de 943 chuvas, com uma precipitação média anual de 1.012,6mm de chuvas erosivas. Índices EI_{30} e $KE>25$ constituem fator erosividade (fator R da USLE), que foram calculados pelo método proposto por Wischmeier e Smith (1958), que consiste na soma das energias cinéticas dos segmentos da chuva com a mesma inclinação ou intensidade para o índice EI_{30} e a soma da energia cinética total dos segmentos com intensidades superiores a 25mmh^{-1} para o índice $KE>25$, os valores médios anuais de EI_{30} $KE>25$ chuvas erosivas foram de $7.525 \text{ MJmmha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{ano}^{-1}$ e $126,8 \text{ MJha}^{-1}\text{ano}^{-1}$. A média de distribuição mensal e sazonal dos índices de erosão ajudou a identificar o período de maior risco de erosividade, que abrange os meses de janeiro, maio, outubro e dezembro, o que representa o valor médio anual de EI_{30} e $KE>25$ 53,3 e 51,3%, respectivamente. A distribuição do tempo de retorno e a probabilidade de ocorrência dos índices de erosão mostrou que a maioria das chuvas altamente erosivas coincidirem com o tempo de preparação do solo e da plantação das culturas. O alto coeficiente de correlação da regressão entre os índices mensais e os coeficientes de precipitação permite estimar os valores médios mensais e anuais da erosividade da chuva empregando dados de precipitação de locais com condições semelhantes de precipitação para a área de estudo, as correlações entre índices de meios mensais (EI_{30m} e $KE>25m$), os coeficientes de dados de precipitação para os três estações com registros históricos e perda de solo no sistema convencional e plantio direto são muito baixos, o que sugere que estas perdas seriam influenciados por outros fatores no solo.

Palavras-chave: Erosividade da chuva, Energia cinética, Alto Paraná

RAINFALL EROSIVITY IN THE DEPARTMENT ALTO PARANÁ, PARAGUAY

Author: Ing. Agr. ROSALBA BEATRIZ RODRÍGUEZ CRISTALDO
Advisor: Prof. Ing. Agr. Dr. CARLOS ANDRES LEGUIZAMÓN ROJAS
Co-advisor: Prof. Ing. Agr. Met. HENRY BENICIO VALIENTE RAMÍREZ

Summary

Water erosion resulting from rainfall erosivity and erodibility of soils. Knowledge of erosivity, therefore, becomes a valuable guide in recommending management practices and soil conservation to ensure the reduction of water erosion. The objective was to estimate the rainfall erosivity in Alto Paraná department of the Eastern Region of Paraguay. The research was conducted using log pluviographic data periods 1969-1980 and 2000-2006 from the meteorological station of the Department of Meteorology and Hydrology Minga Guazú district at coordinates 25°27'21" south latitude and 54°59'24" west longitude. The variables studied were the amount of rainfall and accumulated, the return time, the frequency of erosive rainfall, average monthly precipitation, annual precipitation; EI_{30} and $KE>25$ erosivity indices, the frequency of EI_{30} and $KE>25$ erosivity indices and the risk of erosion by rainfall erosivity. Erosive rainfall 560 were studied, a total of 943 rain, with an average annual rainfall of 1012.6mm of accumulated rainfall erosive. EI_{30} indices and $KE>25$ constitute erosivity factor (R factor of USLE), which were calculated by the method proposed by Wischmeier and Smith (1958), which consists of the sum of the kinetic energies of the segments of rain with the same inclination or intensity for EI_{30} index and the sum of the total kinetic energy of the segments with intensities greater than 25mm h^{-1} for $KE>25$ index, EI_{30} and $KE>25$ annual means values erosive rains were of $7,525\text{ MJ mm ha}^{-1}\text{ h}^{-1}\text{-yr}^{-1}$ and $126.8\text{ MJ ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$. The monthly and seasonal mean distributions of erosion rates helped identify the highest risk period erosivity, which covers the months of January, May, October and December, representing the average annual value of EI_{30} and $KE>25$ 53.3 and 51.3% respectively. The return time distribution and the probability of occurrence of erosion rates showed that most of the highly erosive rains coincide with the time of soil preparation and planting of crops. The high correlation coefficient of the regression between the monthly average rates and the possible precipitation coefficient estimate mean monthly and annual rainfall erosivity using rainfall data from locations with rainfall conditions similar to the study area, the correlations between monthly half indices (EI_{30m} and $KE>25m$), the coefficients of rainfall data for the three stations with historical records and soil loss in the system both conventional and direct seeding system are very low, suggesting that these losses would be influenced by other factors in the soil.

Keywords: Rainfall erosivity, Kinetic energy, Alto Paraná

TABLA DE CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN.....	v
RESUMO.....	vi
SUMMARY	vii
TABLA DE CONTENIDO.....	viii
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE ANEXOS.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Degradación del suelo	4
2.2 Erosión hídrica.....	4
2.2.1 Concepto, proceso y formas	4
2.2.2 Factores que influyen en la erosión hídrica	5
2.2.2.1 Erosividad de la lluvia	5
2.2.2.2 Topografía	6
2.2.2.3 Suelo	7
2.2.2.4 Cobertura vegetal.....	7
2.2.2.5 Practicas conservacionistas.....	8
2.3 Evaluación de la erosión hídrica.....	8
2.3.1 Métodos de reconocimiento para evaluar la erosión hídrica	8
2.3.2 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)	9
2.3.3 Otros métodos y ecuaciones	11
2.4 Precipitación	13
2.4.1 Características físicas de la lluvia.....	13
2.4.1.1 Cantidad de lluvia.....	13
2.4.1.2 Intensidad de la lluvia.....	14
2.4.1.3 Tamaño de las gotas de lluvia.....	14
2.5 Factor erosividad de la lluvia.....	15
2.6 Índices de erosividad	15
2.6.1 Cálculo del índice EI_{30}	17
2.6.2 Evaluación de las erosividad de la lluvia por medio de datos pluviométricos	18
2.7 Fenómenos climáticos en Paraguay.....	19
2.8 Estudios de erosión hídrica en Paraguay	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1 Localización de la investigación.....	26
3.2 Estaciones meteorológicas en Alto Paraná.....	28
3.3 Población de unidades y variables de medición	29
3.4 Recursos materiales y equipos técnicos.....	29
3.5 Determinación de la erosividad de la lluvia EI_{30} y $KE>25$ por datos pluviográficos	29
3.6 Distribución mensual y estacional del índice de la erosividad de la lluvia33	33

3.7	Distribución de la frecuencia y probabilidad de ocurrencia de la erosividad	33
3.8	Lluvias críticas.....	34
3.9	Evaluación de la erosividad de la lluvia por medio de datos pluviométricos	34
3.10	Métodos de control de calidad de los datos	35
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1	Frecuencia de lluvias erosivas y no erosivas	36
4.2	Precipitación acumulada.....	38
4.3.1	Intensidad de la lluvia.....	40
4.3	Índice de erosividad de la lluvia, EI_{30}	43
4.4	Índice de erosividad de la lluvia $KE>25$	47
4.5	Distribución del tiempo de retorno y probabilidad de ocurrencia de la erosividad de la lluvia EI_{30} y $KE>25$	49
4.6	Evaluación de la erosividad de la lluvia por medio de datos pluviométricos	52
4.7	Pérdida de suelo.....	59
5.	CONCLUSIONES	64
6.	REFERENCIAS	66
7.	ANEXOS	69

LISTA DE TABLAS

	Página
1. Grados de erosión hídrica en algunas áreas del Paraguay	21
2. Erosión potencial bajo diferentes usos en la microcuenca Tarumá, Alto Vera, Itapúa.	22
3. Clasificación de rangos típicos de R anual	33
4. Frecuencias mensuales, anuales y medias mensuales y anuales de lluvias erosivas, no erosivas y total observadas en el periodo 1.969 – 1.980 y 2.000 - 2.006 en Alto Paraná.	37
5. Valores mensuales, anuales y medias mensual y anual de precipitación acumulada, erosivas, no erosivas y totales en el periodo 1969 – 1.980 y 2.000 - 2006 en el Departamento Alto Paraná.....	39
6. Valores mensuales y anuales de las intensidades máxima 30 minutos observadas en el periodo de 1.969 – 1.980 y 2.000 – 2.006 en el Departamento Alto Paraná.....	41
7. Distribución de la frecuencia y probabilidad de ocurrencia de las máximas intensidades mensuales en 30 minutos.....	42
8. Sumatoria de EI ₃₀ mensual, anual y medias mensuales y anuales. Lluvias erosivas	43
9. Valores del índice de erosividad KE>25 mensual, anual, medias mensuales y anuales, según metodología propuesta por Hudson (1997).....	47
10. Frecuencia y probabilidad de ocurrencia de los índices de erosividad EI ₃₀ y KE>25 anuales en un periodo de 19 años en Alto Paraná.	50
11. Erosividad de la lluvia para el índice de Fournier, estación perteneciente a la Dirección de Meteorología e Hidrología (DINAC).....	57
12. Erosividad de la lluvia para el índice de Fournier, estación de Acuicultura, Hernandarias. Itaipú Binacional	58
13. Erosividad de la lluvia para el índice de Fournier, estación San Alberto, Itaipú Binacional	58

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Distribución del riesgo de erosión hídrica en el Departamento Alto Paraná.	24
2. Ubicación del área de estudio, Alto Paraná. Fuente: Elaboración propia.	27
4. Distribución de la precipitación media mensual acumulada en el Departamento Alto Paraná en el periodo 1969-1980 y 2000-2006.	40
5. Distribución anual del índice de erosividad EI_{30} en Alto Paraná, considerando 19 años de estudio.	44
6. Distribución porcentual del índice EI_{30} en relación a la precipitación mensual media acumulada de lluvias erosivas en un periodo de 19 años.	45
7. Distribución estacional del índice de erosividad EI_{30} para el Departamento Alto Paraná, en un periodo de 19 años.	46
8. Distribución de valores medios mensuales del índice de erosividad $KE>25$ en Alto Paraná para un periodo de 19 años.	48
9. Distribución porcentual del índice de erosividad $KE>25$, lluvias erosivas y totales acumulados en el periodo 1969-1980 y 2000-2006, en el Departamento Ato Paraná.	49
10. Probabilidad mensual de ocurrencia del índice EI_{30} en el Departamento Alto Paraná.	51
11. Distribución de la probabilidad mensual de ocurrencia del índice $KE>25$	51
12. Regresión entre los índices de erosividad $KE>25$ medio mensual ($KE>25m$) y EI_{30} medio mensual (EI_{30m}).	52
13. Regresión entre el índice EI_{30} medio mensual (EI_{30m}) y el coeficiente de distribución de la lluvia (R_p).	53
14. Regresión entre el índice $KE>25$ medio mensual ($KE>25m$) y el coeficiente de distribución de la lluvia (R_p).	53
15. Regresión entre el índice EI_{30} medio mensual (EI_{30m}) y la precipitación media mensual (P_m).	54
16. Regresión entre el índice $KE>25$ medio mensual ($KE>25m$) y la precipitación media mensual (P_m).	55
17. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en sistema convencional y el índice EI_{30} medio mensual (EI_{30m}).	59
18. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en sistema convencional y el índice $KE>25$ medio mensual ($KE>25m$).	60
19. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en sistema convencional y el coeficiente de precipitación calculado con datos de la estación de Dirección de Meteorología e Hidrología (CDMH) (DINAC).	60
20. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en el sistema de siembra directa y el índice EI_{30} medio mensual (EI_{30m}).	61
21. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en el sistema de siembra directa y el índice $KE>25$ medio mensual ($KE>25m$).	61

22.	Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en el sistema de siembra directa y el coeficiente de precipitación calculado con datos de la estación de Dirección de Meteorología e Hidrología (CDMH) (DINAC).....	62
23.	Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en el sistema convencional y el coeficiente de precipitación calculado para el año 1996 con datos de la estación de San Alberto, perteneciente a Itaipú Binacional.....	63
24.	Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en el sistema de siembra directa y el coeficiente de precipitación calculado para el año 1996 con datos de la estación de San Alberto, perteneciente a Itaipú Binacional.....	63

LISTA DE ANEXOS

	Página
1A. Fotografía de una faja pluviográfica utilizada para el cálculo de los índices de erosividad (EI_{30} y $KE>25$), con fecha 27 de octubre de 1980.	69
2A. Ejemplo de la determinación de la energía cinética de las lluvias.	69
3A. Riesgo de erosión hídrica según erosividad de la lluvia para el índice de Fournier	70
6A. Valores mensuales, anuales y medias mensuales y anuales de intensidades mínimas en 30 minutos de las lluvias erosivas observadas en el periodo 1969 – 1980 y 2000 - 2006 en Alto Paraná.	72
7A. Probabilidad de ocurrencia de los valores mensuales del índice EI_{30} en el Departamento Alto Paraná.....	73
8A Probabilidad de ocurrencia de los valores mensuales del índice $KE>25$ en el Departamento Alto Paraná.....	74
9A. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en sistema convencional y el coeficiente de precipitación calculado con datos de la estación de Acuicultura, Itaipú Binacional (CAc).	75
10A. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en sistema convencional y el coeficiente de precipitación calculado con datos de la estación de San Alberto, Itaipú Binacional (CSA).....	75
11A. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en el sistema de siembra directa y el coeficiente de precipitación calculado con datos de la estación de Acuicultura, Itaipú Binacional (CAc).	76
12A. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en el sistema de siembra directa y el coeficiente de precipitación calculado con datos de la estación de San Alberto, Itaipú Binacional (CSA).....	76

1. INTRODUCCIÓN

Se considera precipitación a cualquier forma de hidrometeoro que llega a la superficie terrestre. Éste fenómeno incluye la lluvia, llovizna, nieve, aguanieve, granizo, y excluye a la niebla y al rocío puesto que estas son formas de condensación y no de precipitación. La precipitación forma parte del ciclo hidrológico, responsable del depósito de agua dulce en el planeta. Su ritmo temporal y su distribución espacial condicionan los ciclos agrícolas y la distribución de las principales especies vegetales y animales.

El estudio de la precipitación se realiza en función de sus dos características físicas esenciales expresadas en cantidad o volumen de agua caída por unidad de superficie y la intensidad para diferentes intervalos de tiempo. La precipitación procedente de las nubes puede ser clasificada en función de la forma en que se produce. La duración e intensidad de las precipitaciones son aspectos que influyen en la pérdida del suelo fértil por el arrastre de la escorrentía superficial, la infiltración del agua en el suelo y el almacenamiento del agua en el suelo afectando la actividad agraria. Para contabilizar el volumen de precipitación en periodos de tiempos superiores a un día el instrumento más usual es el pluviómetro, que permite determinar la cantidad total, sin embargo, en lo que respecta a variables de la lluvia como duración e intensidad son necesarios pluviógrafos.

La erosión hídrica es el resultado de la acción del impacto de las gotas de lluvia y del escurrimiento superficial, combinados con la erosionabilidad del suelo, está caracterizada por las fases desagregación, transporte y sedimentación de las partículas. La desagregación y el transporte son principalmente causados por el impacto de las gotas de lluvia y el escurrimiento superficial respectivamente.

La degradación de un suelo se define como un proceso que reduce la capacidad actual y potencial de este para producir un bien o servicio. Uno de los potenciales procesos de degradación del suelo en la Región Oriental del Paraguay lo constituye la erosión hídrica por las características de clima, suelo y topografía sobre todo en regiones donde la actividad agrícola es predominante. El Departamento de Alto Paraná constituye por la gran riqueza de recursos naturales y su privilegiada posición geográfica el segundo Departamento en importancia económica y demográfica, después de Central. La explotación de sus recursos sustenta la producción agropecuaria vigente en la zona.

El Paraguay posee limitada información de los factores que determinan los procesos de degradación de los suelos. La degradación de los suelos por erosión hídrica es uno de los procesos más importantes en la pérdida de la capacidad productiva del suelo. Dentro de los factores que intervienen en este proceso de degradación, uno de los más importantes es la fuerza con la que impactan contra el suelo las gotas de lluvia.

En este sentido en el Departamento de Alto Paraná, el daño causado por el impacto de las gotas de lluvia conlleva a la aceleración de la degradación de los suelos agropecuarios y consecuentemente a la disminución de la producción agrícola y ganadera, debido a la energía de estas gotas para remover las partículas del suelo dejándolas libres para que puedan ser transportadas por la escorrentía superficial hacia las corrientes de drenaje.

Se han llevado a cabo algunas investigaciones para cuantificar la tasa de erosión bajo diferentes usos de suelo a nivel de zonas agroecológicas, microcuena y para evaluar la efectividad de diferentes coberturas vegetales en el control de la erosión en terrenos agrícolas utilizando parcelas de erosión o lotes de escurrimiento, pero pocos estudios se han enfocado en el agente causal de este proceso, la lluvia. Estos estudios pueden brindar base técnica para la predicción de la erosión teniendo en cuenta valores que se adecuan a la situación actual de nuestros suelos.

La erosividad de la lluvia es una de las características menos abordadas por las ciencias encargadas de su estudio. Sin embargo, esto determina la productividad del suelo en función de las prácticas de manejo y conservación del mismo y de su conocimiento depende en parte, el futuro alimentario del hombre, puesto que es el principal factor que desencadena la erosión hídrica, principal proceso de degradación de los suelos en el planeta así como en la Región Oriental del Paraguay.

La determinación de la magnitud de la erosividad de la lluvia de un área implica sistematizar la información de la pluviometría, generar una base de datos histórica, lo que constituye la base para predecir procesos de erosión, planificar el uso de la tierra y las prácticas de manejo y conservación de los suelos necesarias para los usos adoptados en la región.

El objetivo general del trabajo fue estimar la erosividad de la lluvia en el Departamento de Alto Paraná. Los objetivos específicos fueron: caracterizar la región en relación a la intensidad de la lluvia; estimar la energía cinética de la lluvia registrada en Alto Paraná; realizar análisis multitemporal de la precipitación en el área de estudio; determinar los índices de erosividad de la lluvia EI_{30} y $KE > 25$ en el área de estudio; relacionar los índices de erosividad de la lluvia EI_{30} y $KE > 25$ con otros índices que no necesiten de datos pluviográficos para su determinación; determinar el número de lluvias erosivas, no erosivas y totales en el área de estudio y, comparar la pérdida de suelo a partir de la Ecuación Universal de Pérdida de suelo.

La hipótesis del trabajo fue que en las condiciones de Alto Paraná la erosividad de la lluvia es alta y existen modelos alternativos para estimar la erosividad de la lluvia que se ajustan a los índices de erosividad EI_{30} y $KE > 25$ que no necesitan de pluviografía.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Degradación del suelo

De acuerdo con Porta y López (2005), la degradación o deterioro del suelo se define como la pérdida de la utilidad actual o potencial, la pérdida de propiedades intrínsecas o la pérdida de funciones del suelo.

Van del Glas (1997) e IICA (2004) citados por Ojeda (2008), afirman que las formas más comunes de degradación de los suelos en el Departamento de Alto Paraná son la erosión, la compactación y los problemas de fertilidad, debido a la continua preparación de los suelos y a la topografía característica de la zona que es ondulada.

2.2 Erosión hídrica

2.2.1 Concepto, proceso y formas

La erosión hídrica es el proceso de desprendimiento y arrastre de partículas de suelo, causado por fuerzas de la naturaleza (lluvia), de un lugar para otro (Atayde et al. 1997). Entre los daños más comunes causados por la erosión se menciona la eliminación de la capa arable del suelo que constituye el mejor medio para el desarrollo de las raíces de las plantas ya que en esta capa se encuentra la mayor parte de la materia orgánica del suelo.

La erosión causada por el agua sigue, generalmente, cinco pasos: el impacto de las gotas de lluvia, la ruptura de los agregados de la superficie, la desagregación de las partículas del suelo, el traslado o arrastre de las partículas hacia las posiciones topográficas más bajas del terreno y la sedimentación o deposición, cuando disminuye la velocidad del escurrimiento superficial. Parte de las partículas desagregadas flotan en vacíos del suelo, sellando la superficie del mismo, por lo que disminuye la tasa de infiltración de agua en el suelo (Plaster 2000). La parte del suelo que se pierde por la erosión hídrica es generalmente la más fértil, la que contiene la mayor concentración de nutrientes para las plantas, el humus, los abonos y correctivos que el agricultor haya aplicado. El suelo que queda es menos productivo, e incluso con los años, puede volverse no apto para una agricultura sostenible (FAO 1967).

Según Suarez de Castro (1980) el agua es capaz de causar erosión de las siguientes formas: erosión laminar que se debe especialmente al desprendimiento más o menos uniforme de partículas en toda una área, ocasionado por el impacto de las gotas de lluvia sobre un suelo mal protegido y al arrastre posterior de dichas partículas por la escorrentía; erosión en surcos que ocurre cuando por irregularidades en la pendiente del terreno, la escorrentía se concentra en algunos sitios del paisaje hasta adquirir volumen y velocidad suficiente para hacer otros cortes y formar canalículos que se destacan en el terreno. Esto ocurre durante aguaceros de gran intensidad y en terrenos con pendientes pronunciadas y, erosión en cárcavas que se presenta cuando hay una gran concentración de la escorrentía en determinadas zonas del terreno y que ocasiona año tras año la ampliación de los surcos formados por la acción de esas corrientes de gran volumen y velocidad.

2.2.2 Factores que influyen en la erosión hídrica

2.2.2.1 Erosividad de la lluvia

La erosividad de la lluvia es la variable más importante, desde el punto de vista de la erosión. Según Coraspe (2004) esta se define como la capacidad potencial

de la precipitación de causar erosión en un periodo determinado. La erosividad de la lluvia está en función de la intensidad, duración y época de la precipitación.

El impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo descubierto es el responsable del 95% de la erosión hídrica y solo los otros 5% son debido al escurrimiento superficial (Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento 1994).

2.2.2.2 Topografía

Según Plaster (2000) la pendiente consta de dos componentes: longitud y grado de pendiente. En una pendiente empinada, aumenta la velocidad de escurrimiento del agua, incrementándose su energía erosiva. En una pendiente larga, una mayor superficie colecta el agua en ella, lo que incrementa su volumen de flujo.

La FAO (1967) menciona que la inclinación del terreno es uno de los factores más importantes de la erosión hídrica. En las tierras planas, la erosión por el agua es generalmente despreciable, hasta el punto que, en realidad el problema que en ellas puede plantearse es el depósito (sedimentación) y no el de denudación del suelo.

Los suelos arenosos, que sufren poco la erosión cuando su declive es pequeño, están sujetos a una erosión intensa cuando dicho declive es grande; en los suelos franco limosos y franco, este fenómeno es menos perceptible durante varios años (FAO 1967). Si la pendiente del terreno se aumenta cuatro veces, la velocidad del agua que fluye sobre él se duplica y su capacidad erosiva se cuadruplica (Suarez de Castro 1980).

En relación a la topografía, otro factor relacionado con la erosión hídrica es la forma del declive. Los declives pueden ser en general convexos y cóncavos. La inclinación en el declive convexo aumenta hacia el pie del mismo, provocando el aumento de la velocidad del agua de escurrimiento. Los declives cóncavos se aplanan

hacia su parte baja y los sedimentos arrastrados por el agua de escurrimiento se depositan en esa parte, a medida que la velocidad del agua disminuye (FAO 1967).

2.2.2.3 Suelo

La erosión no es la misma en todos los suelos. Las propiedades físicas, principalmente estructura, textura, permeabilidad y densidad, así como las características químicas del suelo ejercen diferentes influencias en la erosión hídrica. La cantidad de materia orgánica en el suelo es de gran importancia en el control de la erosión, la misma tiene la capacidad de retener una cantidad de agua de hasta dos a tres veces su peso, aumentando así la infiltración, lo que resulta en una disminución de la pérdida de suelo por erosión (Bertoni y Lombardi 1990).

La estructura del suelo y sus características de estabilidad y cohesión determinan la separación entre agua que se escurre y agua que se infiltra, puesto que regulan la porosidad y velocidad de infiltración (Fournier 1975). Así también, la distribución del tamaño de las partículas es uno de los determinantes de la susceptibilidad de un suelo a la erosión (Suárez de Castro 1980).

La fuerza de los agregados del suelo también es importante, ya que los agregados fuertes resisten mejor el impacto de las gotas de lluvia. La textura también influye en el porcentaje de infiltración del agua. Las partículas de diferentes tamaños varían en la facilidad con que son separadas. Las partículas de limo son más fáciles de separar, por lo que los suelos de limo son más propensos a la erosión del agua (Plaster 2000).

2.2.2.4 Cobertura vegetal

Un suelo descubierto está completamente expuesto a las fuerzas de erosión del impacto de las gotas de lluvia y de la fricción del agua que escurre. Una cobertura superficial de residuos de plantas o vegetación de cobertura densa como los pastos reducen la erosión, protegiendo el suelo del impacto de las gotas de lluvia y

reduciendo la velocidad del flujo de escorrentía superficial, lo cual reduce su capacidad para desprender y transportar material del suelo. Sin embargo, pequeñas cantidades de residuos que no están anclados pueden ser transportados por la escorrentía junto con los sedimentos (INETER 2005).

Los efectos de la vegetación pueden ser así enumerados, de acuerdo a Bertoni y Lombardi (1990): protección directa contra el impacto de las gotas de lluvia; dispersión del agua, interceptando y evaporando antes que alcancen el suelo; descomposición de las raíces de las plantas que formando espacios porosos continuos en el suelo, aumentando la infiltración del agua; mejoramiento de la estructura del suelo, por adición de materia orgánica, aumentando así su capacidad de retención de agua y la disminución de la velocidad del escurrimiento del agua por el aumento de rozamiento en superficie.

2.2.2.5 Prácticas conservacionistas

Este factor representa el efecto de mejores prácticas mecánicas como cultivo en contorno, cultivo en faja, terraceo y drenaje subsuperficial y, dependen de la pendiente del terreno. Estas prácticas al modificar los patrones de flujo y el grado y dirección de la superficie de escurrimiento, influyen directamente en la conservación del suelo y son denominadas prácticas de soporte (Oñate 2004).

2.3 Evaluación de la erosión hídrica

2.3.1 Métodos de reconocimiento para evaluar la erosión hídrica

Según Hudson (1997) los métodos de reconocimiento son la manera de obtener una primera aproximación del volumen de suelo perdido con reflejos sobre la producción de los cultivos. Estos métodos pueden incluir las mediciones de cambio de nivel de superficie y mediciones localizadas.

La medición de los cambios a nivel de superficie de suelo consiste en medir los cambios del suelo: a) en una dimensión con respecto al nivel de la superficie en un punto, o b) en dos dimensiones, para obtener un perfil o sección transversal. Este tipo de medición es adecuada cuando la erosión es localizada, los índices de erosión son elevados y la posición de la erosión es predecible. No suele ser adecuada para las pérdidas de suelo de tierras cultivables debido a que el nivel de la superficie se verá afectada por el cultivo y los animales (Hudson 1997).

2.3.2 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), comenzó un programa en 1933, para crear 10 estaciones experimentales de erosión de suelos y 40 proyectos para el control de la erosión a través de todo el país. Las estaciones experimentales median la escorrentía y la erosión del suelo en parcelas uniformes y en pequeñas cuencas con un amplio rango de tipo de suelos y técnicas de cultivo. Cada proyecto de control de la erosión abarcaba una cuenca entera, donde los métodos de control de la erosión podían ser aplicados, evaluados y demostrados. Todos los datos recogidos en estas estaciones, aportaron el conocimiento suficiente sobre los procesos erosivos, obteniéndose como resultado la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Universal Soil Loss Equation, USLE) (Wischmeier et al. 1958).

El mismo autor resalta que, como resultado de la amplia experiencia adquirida en su utilización para evaluar las pérdidas de suelo en los Estados Unidos por erosión laminar y en arroyos, se hicieron una serie de cambios que hoy están incorporados a la Ecuación Revisada de Pérdida de Suelo (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE).

Según Wischmeier citado por Hudson (1997) esta ecuación proporciona un cálculo de la pérdida media anual del suelo de las tierras arables bajo diversas condiciones de cultivos.

La ecuación de la USLE es la siguiente:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P; \text{ donde:}$$

A: es la media anual de pérdida de suelo en $t \text{ ha}^{-1}$;

R: es la media de la fuerza erosiva de las precipitaciones y un factor para el escurrimiento por derretimiento de nieve o aplicación de agua, expresado en $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mm}^{-1}$;

K: es el factor de erosionabilidad del suelo es una cifra que refleja la susceptibilidad del suelo a la erosión, expresado en $t \text{ MJ}^{-1} \text{ h mm}^{-1}$;

L: es el factor de longitud, una ecuación que compara la pérdida del suelo con la de un campo de una longitud específica de 22,1 m;

S: es el factor de magnitud de la pendiente, relación que compara la pérdida de suelo con la de un campo de pendiente específica de 9%;

C: es un factor de cobertura del suelo o manejo de los cultivos, relación que compara la pérdida de suelo con la de un campo sometido a un tratamiento estándar de barbecho;

P: es el factor de la práctica de conservación, esta relación compara la pérdida de suelo con la de un campo sin ninguna práctica de conservación (en sentido de la pendiente).

El factor de la erosividad (R) es calculado por medio del Índice de Erosión (EI_{30}) que es la suma de la energía cinética de cada tormenta, multiplicada por la intensidad máxima de lluvia en un periodo de 30 minutos (Hudson 1997).

Extensivos estudios de datos de pérdida de suelos asociados a las características de las lluvias muestran que cuando otros factores, a excepción de la lluvia, son mantenidos constantes, las pérdidas de suelos ocasionadas por las lluvias en terrenos cultivados son directamente proporcionales al valor del producto de dos características de la lluvia: su energía cinética total y su intensidad máxima en 30 minutos (Bertoni y Lombardi 1990).

2.3.3 Otros métodos y ecuaciones

Otro método para evaluar la erosión hídrica es la Ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelo (MUSLE), que consiste en un modelo de parámetros agrupados que estima el rendimiento de sedimento de cuencas para un evento pluvioso único. MUSLE es útil en cuencas con superficie de alrededor de 100 km² (Jones et al. 1994).

También existen otras metodologías de evaluación de la erosión hídrica derivadas de la USLE. En ese sentido, Arnoldus (1977) realiza una modificación de la USLE y considera los siguientes factores para la evaluación de la erosión: el factor climático, basado en el tipo de clima dominante y la longitud del periodo de crecimiento (LPC), donde se atribuye un valor numérico para cada uno; el factor edáfico, donde se atribuye un factor de erosionabilidad a cada unidad de suelo, teniendo en cuenta las propiedades físicas (textura) y químicas y la presencia o ausencia de rocosidad y, el factor topográfico, donde se definen rasgos de pendiente en función a la información disponible.

Otros modelos de simulación citados por Jones et al. (1994) para evaluar la erosión hídrica son: Calculador de Impacto Erosión-Productividad (EPIC), Simulador de Recursos Hídricos en Cuencas Rurales (SWRRB), el SWRRBWQ y el Proyecto de Predicción de la Erosión Hídrica (WEPP).

El Calculador de Impacto Erosión-Productividad (EPIC), es un modelo a escala de campo, de tiempo continuo, diseñado para simular la respuesta de sistemas complejos de cultivo al clima, suelo y al manejo y conservación de suelos.

El Simulador de Recursos Hídricos en Cuencas Rurales (SWRRB), fue desarrollado para simular la hidrología, rendimiento de sedimentos y procesos relacionados en cuencas reales.

El SWRRBWQ, una nueva versión del modelo diseñado para simular la aplicación y transformaciones de nutrientes y plaguicidas, proporciona a los usuarios un método conveniente para simular efectos interactivos del suelo, clima, topografía,

uso de la tierra, tamaño del campo, cultivo, manejo de cultivos y residuos, y características de cursos de agua, estanques y embalses sobre el rendimiento de sedimentos y su encausamiento a escala de la cuenca.

El Proyecto de Predicción de la Erosión Hídrica (WEPP), representa la última generación de los modelos con base en procesos y fue el resultado de un esfuerzo multidisciplinar, reuniendo investigadores de varias agencias y universidades americanas. Este modelo se basa en fundamentos de las teorías de infiltración, física de suelos, fitotecnia, hidráulica y mecánica de la erosión (Chaves, citado por Cardozo et al. 2002).

Según Elliot, citado por Cardoso et al. (2002) el modelo WEPP, no solo predice tasas de erosión de suelo, sino también la liberación de sedimentos. Los componentes del modelo pueden ser divididos conceptualmente en cuatro: clima, topografía, suelo y manejo de cultivos. WEPP acepta dos diferentes tipos de archivos de clima: el formato estándar CLIGEN (Climate Generator) (Nicks et al. 1995) y el BPCDG (Breakpoint Climate Data Generator). El CLIGEN se desarrolló inicialmente para aplicarse en los EE.UU., y requiere datos atmosféricos estadísticos mensuales de largo alcance, para generar una secuencia diaria de datos meteorológicos simulados por los años que se desee; incluyendo medias, desviaciones estándar, y coeficientes de asimetría de la precipitación, probabilidades de un día húmedo seguido de un día húmedo, y de un día húmedo seguido de un día seco; temperaturas medias máximas y mínimas del aire, radiación solar, y dirección y velocidad del viento. Para lugares fuera de los Estados Unidos de América puede ser difícil y aun imposible obtener esta información (Zeleeke y Flanagan 1999).

La remoción de las partículas de suelo en surcos ocurre por el impacto de la lluvia (salpicadura) y por la escorrentía, como se describe en la ecuación:

$$D_i = K_i (i \times q); \text{ donde}$$

D_i : es la remoción de partículas entre surcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

K_i : es la erosionabilidad entre surcos (kg s m^{-4})

i : es la intensidad de lluvias (m s^{-1})

q: es la tasa de escorrentía (m s^{-1})

2.4 Precipitación

La precipitación es definida como todas aquellas formas de humedad caídas directamente sobre el suelo en estado líquido o sólido (Cuadrat 1997).

De acuerdo con el mismo autor, las condiciones para que se originen las precipitaciones son: el ascenso del aire y su enfriamiento, la condensación del vapor de agua y formación de nubes, una fuerte concentración de humedad y, el crecimiento de las gotas de agua de las nubes.

2.4.1 Características físicas de la lluvia

2.4.1.1 Cantidad de lluvia

Datos de lluvia en totales o medias mensuales y anuales son poco significativas en relación a la erosión. En dos regiones puede caer en un año, la misma cantidad de lluvia, pero esto no significa que la situación sea la misma, puesto que, en un lugar pudo haber caído un gran número de lluvias leves y, en el otro dos o tres lluvias fuertes con un 60 u 80% del total (Bertoni y Lombardi, 1990).

Evidentemente, existe una asociación entre la cantidad de lluvia y cantidad de suelo erosionado, es decir, a mayor lluvia corresponde mayor erosión, pero en términos estadísticos la correlación entra ambas variables es de poco valor. La misma cantidad total de lluvia puede dar lugar, en diferentes circunstancias, a intensidades de erosión muy diversas, de manera que se requieren otras medidas más específicas para describir la capacidad erosiva de la lluvia (Hudson 1997).

2.4.1.2 Intensidad de la lluvia

Existen claras pruebas de la asociación que hay entre la erosión y la intensidad de lluvia; además, la intensidad es importante como parámetro potencial de la erosividad, porque es la única característica que, junto con la cantidad de agua caída, suele registrarse en las estaciones meteorológicas convencionales (Hudson 1997).

De acuerdo con Cuevas et al., 2010, la intensidad de la lluvia suele medirse en milímetros por hora, es decir, la precipitación por unidad de tiempo. La precipitación se mide por la altura en milímetros que alcanzaría sobre una superficie plana y horizontal donde no se perdiera por infiltración o evaporación, y tal altura se da en milímetros. Un milímetro de precipitación equivale a un litro de agua por metro cuadrado.

Las mediciones de intensidad para trabajos meteorológicos suelen obtenerse mediante pluviógrafos, en los que los incrementos sucesivos de lluvia se registran como total acumulado en un gráfico cuya velocidad depende de la frecuencia con que pueda ser cambiado, por lo general diariamente, o, en zonas remotas o inaccesibles, semanal o mensualmente. La intensidad se calcula a partir de la tasa de cambio en la cantidad de lluvia registrada, es decir, la pendiente de grabado. (Hudson 1997).

2.4.1.3 Tamaño de las gotas de lluvia

Considerando que la lluvia afecta directamente a la erosión del suelo, deben ser consideradas algunas particularidades de las gotas de lluvia: ellas tienen un diámetro bastante variable, con un máximo de 7mm, y no son esféricas, esto debido a las variaciones de presión y la resistencia del aire. Las gotas grandes no son estables, y por lo general, las mayores a 5mm se rompen en el aire (Bertoni y Lombardi 1990).

2.5 Factor erosividad de la lluvia

La erosividad de la lluvia es la capacidad potencial de causar erosión, es medida por medio de los índices de erosividad. Los índices más importantes y de mayor aplicación geográfica son: EI₃₀, KE>25, Alm., Ram y Fournier (Wischmeier, 1959; Hudson, 1981; Lal, 1979; Roose, 1979; Arnoldus, 1980, respectivamente) aunque existen varios mas con aplicaciones locales exitosas (Ríos, 2012).

La erosión producida por la precipitación resulta de la interacción de dos factores, lluvia y suelo, los cuales influyen sobre la intensidad de la erosión, si bien en el estudio de los procesos erosivos suelen considerarse por separado. Al efecto de la lluvia denominada **erosividad** y al del suelo **erosionabilidad** (Porta et al. 2003).

2.6 Índices de erosividad

De acuerdo con Fernández 1996, dos son los más importantes: el clásico de Fournier o índice de agresividad del clima, y el factor R o índice de erosión pluvial. El primero tiene la ventaja de utilizar datos de precipitación disponibles en gran número de observatorios, por lo que es un buen indicativo de los rasgos generales del potencial erosivo del clima. El factor R, más preciso, exige datos de precipitación disponibles en muy pocos observatorios (Fernández 1996).

Una estimación de la erosividad a partir de datos pluviométricos la obtuvo Wischmeier (1959) en Estados Unidos. Tras demostrar que la correlación entra la pérdida de suelo en distintas tormentas y la cantidad de lluvia caída o la cantidad máxima en distintos intervalos era pequeña, pero que el factor más correlacionado con la erosión era la energía cinética, el mejor estimador de la pérdida de suelo resultó ser un parámetro igual al producto de la energía cinética de la tormenta por la intensidad máxima registrada en 30 minutos (deducida a partir de las bandas del pluviógrafo y multiplicada por 2 para expresarla en mm h^{-1}) (Castillo et, al. 2001).

El EI₃₀ fue propuesto por Wischmeier (1959) y es definido como el producto de la energía cinética total de la lluvia (E) por la intensidad máxima en 30 minutos

(I_{30}). Mide el efecto en que la erosión por salpicamiento y la turbulencia del flujo se combinan con el escurrimiento para remover del terreno partículas del suelo separadas de este. Este proceso es conocido como erosión laminar. Su cálculo se realiza con la siguiente ecuación:

$$EI_{30} = (Ec) (I_{30})$$

Donde:

EI_{30} = índice de erosividad para un evento (MJ.mm/ha.h)

Ec = Energía cinética total de la lluvia (MJ/ha)

I_{30} = Intensidad máxima de la lluvia en 30 min (mm/h)

De acuerdo con Lal et al, 1.980, citado por Bertol et al., 2.002 en regiones tropicales y subtropicales, sin embargo, otros factores han demostrado tener una mejor correlación con las pérdidas de suelo. Para África del Sur, por ejemplo (Hudson 1.981), analizando el factor $KE > 25$, el cual es representado por la sumatoria de la energía cinética total de las lluvias con intensidades superiores a 25 mm h^{-1} , encontró coeficientes de correlación entre éste factor y las pérdidas de suelo entre 0,92 a 0,96. Esto se debe a que en esas regiones, las lluvias presentan menor duración y mayores intensidades y erosividades que en las regiones templadas.

En España se cuenta con un excelente trabajo sobre la agresividad de la lluvia a escala general realizado por el ICONA (Instituto para la Conservación de la Naturaleza), que ha sido ampliado a las diferentes cuencas hidrográficas en las que se calcula el factor R . Así mismo, se han realizado correlaciones entre este factor y el de Fournier, por lo que es fácilmente utilizable para las distintas zonas del territorio español (Fernández 1.996).

Índice de Fournier: la capacidad del clima se define según un índice muy simple que relaciona la precipitación media mensual más elevada (p) respecto a la precipitación media anual.

$$K = \frac{p^2}{p}$$

Donde:

K: representa la Erosividad de la lluvia;

p: es la precipitación mensual;

P: representa la precipitación anual.

En los climas semiáridos con una gran variabilidad en las precipitaciones, es aconsejable calcular el índice año a año. La erosividad de la lluvia así determinada, fue representada por cuatro categorías respecto al riesgo de erosión hídrica, según propuesta por Ortiz et al., (1997).

Factor de concentración de la lluvia máxima en un año: ha sido definido para España (ICONA, 1988), sustituyendo en el Fournier la lluvia mensual por la máxima diaria correspondiente. El factor de concentración calculado para un año es el cociente entre la máxima lluvia en 24 horas observada durante ese año, elevada a cuadrado, y la suma de las máximas en 24 horas de todos los meses del mismo periodo.

Factor R o índice de erosión pluvial: es el principal parámetro que interviene en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, por lo tanto es más extendido y el que ofrece mayor precisión a la hora de evaluar la acción erosiva del clima.

2.6.1 Cálculo del índice EI_{30}

La expresión desarrollada por Wischmeier & Smith (1958), citado por Castillo et al. (2001), para estimar la energía cinética de una tormenta es:

$$Ec = 0,119 + 0,0873 \log_{10} I$$

donde:

E = energía cinética en MJ/ha por mm de lluvia [$\text{MJha}^{-1} \text{mm}^{-1}$].

I = intensidad de la precipitación en mm/h.

2.6.2 Evaluación de las erosividad de la lluvia por medio de datos pluviométricos

La utilización de métodos simplificados para la determinación del índice de erosividad puede convertirse en un recurso eficiente, principalmente lugares donde los registros pluviográficos son escasos o inexistentes. Diversos autores intentaron correlacionar el índice de erosividad con otros factores más fácilmente disponibles, como lo valores cuantitativos de las precipitaciones.

Fournier, 1960, citado por Bertoni et al., 1990, encontró una alta correlación entre la degradación específica o total anual de erosión y un coeficiente de distribución de la lluvia (C) expresada en la ecuación:

$$C = p^2/P$$

Donde: **p** es la precipitación media mensual del mes más lluvioso y **P** es la precipitación media anual.

Lombardi Neto y Moldenhauer (1980), citados por González (1986), utilizando datos pluviométricos de 22 años de Campinas (SP), encontraron un alto coeficiente de correlación para la regresión lineal entre el índice medio mensual y el coeficiente de la lluvia, con algunas modificaciones del coeficiente original propuesto por Fournier, cuya ecuación es la siguiente:

$$EI = 6,886 (p^2/P)$$

Donde: **EI** es la media mensual del índice de erosión, **p** es la precipitación media mensual en mm y **P** es la precipitación media anual en mm.

Con la utilización de esta ecuación, Lombardi et al. (1980) establecieron el mapa de las isoerodentes del Estado de San Pablo, a través de los valores medios de EI₃₀ de 115 lugares.

Alonso (1982), utilizando datos pluviométricos de 15 y 21 años para Ciudad del Este y Villarrica, calculó el factor R para ambas localidades, a través de la

ecuación propuesta por Lombardi Neto (1977) obteniendo valores de 683,84 y 624,90 respectivamente.

Pereira (1983), citado por González (1986), encontró un alto coeficiente de correlación para regresión lineal entre los índices medios mensuales de erosión (EI_{30m} y $KE_{>25m}$), el coeficiente de la lluvia y la precipitación, utilizando 20 años de registros de precipitación en Piracicaba (SP), y concluyó que es posible obtener buenas estimaciones del índice de erosión, a través de las ecuaciones obtenidas en lugares que no presentan datos pluviográficos y que posean condiciones climáticas y fisiográficas semejantes a Piracicaba.

2.7 Fenómenos climáticos en Paraguay

LA NIÑA es la fase opuesta de la fluctuación climática de escala global conocido como EL NIÑO - OSCILACIÓN SUR (ENOS). El concepto ENOS enfatiza que el fenómeno engloba una compleja interacción entre el océano (corrientes oceánicas) y la atmósfera (Índice de Oscilación del Sur) (Pastén 2010).

El mismo autor menciona que La Niña se caracteriza por temperaturas oceánicas inhabitualmente frías en las partes central y oriental del Pacífico ecuatorial. Otras condiciones asociadas con La Niña son: la intensificación de los vientos alisios frente a las costas de Sudamérica; reforzamiento del afloramiento de aguas frías y un mayor desnivel de la superficie oceánica a lo largo de la línea ecuatorial.

La respuesta atmosférica de La Niña en nuestro país se traduce generalmente en condiciones más frías que lo normal durante el invierno y más seco que lo normal durante la primavera y el verano. Por esta razón, los sectores socioeconómicos más afectados son la agricultura, la ganadería y el transporte fluvial por el descenso acelerado del nivel del Río Paraguay.

Con base a estudios realizados por la Dirección de Meteorología e Hidrología de la DINAC, existe una fuerte correlación entre las anomalías de la TSM (temperatura superficial del mar) y el comportamiento pluviométrico de nuestro país. De esta forma, durante el trimestre septiembre - octubre - noviembre de 2010, el centro y sur de la Región Oriental presentaron un déficit de precipitación.

Por otro lado, durante el trimestre diciembre de 2010 - enero y febrero de 2011, el centro y norte del Chaco estuvieron influenciados con déficit importantes de lluvia.

Los eventos La Niña más fuertes ocurrieron en los años 1970, 1973, 1975, 1988 y 2000; con anomalías de temperatura superficial del mar (TSM), entre 1 °C y - 2 °C entre los meses de septiembre y abril. El efecto atmosférico observado en nuestro país, fue la reducción del volumen de lluvias durante esos meses hasta el 100%, principalmente en el sur de la Región Oriental.

2.8 Estudios de erosión hídrica en Paraguay

Un estudio sobre la erosión potencial de suelos de Argentina, Bolivia, Brasil, Chile y Paraguay, manifiesta que existe mayor riesgo de erosión hídrica en Brasil y Bolivia, menor riesgo en Argentina y Chile y valor intermedio ($181 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en Paraguay (Saintraint y Slood, 1993) que consistió en la aplicación del Modelo USLE y la Ecuación de la Erosión Eólica (WEE), modelando y superponiendo datos del Mapa Mundial de Suelos con los resultados del Proyecto de Zonas Agroecológicas, donde los resultados se refieren a la erosión potencial de un suelo sin vegetación ni uso. Los mismos autores, analizando en forma conjunta la erosión hídrica y la eólica en suelos del Paraguay indican que el riesgo de erosión es ligero en 0,41%; moderado en 3,47%; fuerte en 62,14% y muy fuerte en 33,98% de la superficie del país.

De acuerdo con IIDMA, STP y AID, mencionados por Moriya y Alfonso (1994), el Paraguay no dispone de suficiente información acerca de la magnitud de los procesos erosivos en cada una de sus regiones.

Resultados obtenidos por Fatecha (1979), demuestran que algunas áreas del Paraguay poseen diferentes grados de erosión hídrica, los cuales se presentan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Grados de erosión hídrica en algunas áreas del Paraguay

Zona	Porcentaje de Erosión			Superficie Total (ha)	Erosión Total (%)
	Ligera	Moderada	Severa		
Paraguarí	18	8	6	825.500	32
San Juan Nepomuceno	45	14	9	336.500	68
Curuguaty	50	18	2	249.000	70
Eje Norte	74	5	5	132.000	84
Yvy-jau	54	6	0	173.000	60
Alto Paraná	73	2	0	747.000	75

Fuente: Fatecha (1979).

González (1986), estudió la erosividad de la lluvia en Ciudad del Este y Villarrica, a partir de registros pluviométricos de 15 y 26 años respectivamente, el factor de erosividad de la lluvia (R) en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) evaluada por los valores medios anuales de los índices EI_{30} y $KE_{>25}$ fueron respectivamente, 944,93 y 618,83 $t\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ año^{-1}$ para Ciudad del Este y de 818,25 y 491,43 $t\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ año^{-1}$ para Villarrica.

Los periodos estacionales con mayor riesgo de erosión fueron primavera y verano, coincidiendo con el periodo de mayor precipitación. Sin embargo, fue común la ocurrencia de lluvias individuales con gran capacidad erosiva en el mes de marzo, que son responsables de la erosividad relativamente alta de otoño. La mayor probabilidad de ocurrencia de lluvias erosivas, coincide con la época de preparación del suelo, plantación y primeros estadios del desarrollo de la mayoría de los cultivos anuales, en los meses de octubre y mayo, lo que indica alto potencial de erosión hídrica (González, 1986).

El Proyecto de Manejo de los Recursos Naturales Renovables realizó evaluación de la erosión hídrica en la microcuenca Tarumá, situada en Alto Vera, Departamento de Itapúa, mediante la aplicación de modelo USLE y un Sistema de Información Geográfica. Estas herramientas permitieron obtener mapas de diferentes niveles de erosión potencial, tanto para uso actual como para usos alternativos del suelo, bajo el supuesto de una cobertura pareja y uniforme, considerando cuatro grupos de cultivos con practica de manejo de siembra directa y labranza en curvas de nivel (Alfonso et al., 1995). Parte de estos resultados son presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Erosión potencial bajo diferentes usos en la microcuenca Tarumá, Alto Vera, Itapúa.

Cultivos	Erosión promedio (%)				Total (ha)
	Tolerable	Moderada	Severa	Muy Severa	
Pino	13,52	23,16	8,68	54,64	567,1
Poroto	0	0,03	13,49	86,48	567,1
Mandioca	0	0,03	13,49	86,48	567,1
Algodón	0	0	8,84	91,16	567,1

Fuente: Alfonso et al., 1995

En el Paraguay han sido medidas las pérdidas de suelo por erosión hídrica en parcelas de 4.000m² en suelo arcilloso, con 6% y 8% de pendiente, en el Departamento de Itapúa, las pérdidas medias en cinco años de medición fueron de 22.940kg ha⁻¹ en el sistema convencional de preparación del suelo y de 33.190kg ha⁻¹ cuando se mantuvo el suelo descubierto, en tanto que en el sistema de siembra directa se perdieron 530kg ha⁻¹ de suelo. Según Derpsch et al., (2000), en el mismo experimento se verificó que altas precipitaciones ocurridas en los días 9 y 18 de Junio de 1995 que totalizaron 186 mm, ocasionaron pérdidas extremas de suelo por erosión hídrica en un sistema de labranza convencional que alcanzaron 46.500kg ha⁻¹ de suelo, mientras que en la parcela adyacente bajo sistema de siembra directa las pérdidas registradas fueron de 99kg ha⁻¹, ambas parcelas presentaban 8% de pendiente del terreno. Estos resultados indican el potencial del sistema de siembra directa para mitigar el proceso de erosión hídrica.

En un estudio de investigación de pérdidas de suelo y agua con una duración de 12 meses, en parcelas de experimentación piloto, fueron evaluados dos sistemas

de preparación de suelos para cultivos anuales mecanizados, el convencional asociado a camellones en curvas de nivel y el de siembra directa, en un área que presentaba una pendiente de 6% en un suelo Typic Paleudult en la microcuenca del Arroyo Dos Hermanas, situado en Los Cedrales, Departamento de Alto Paraná (Ortiz 1996).

En el sistema convencional con camellones en curvas de nivel, con un área de 500m^2 , la cantidad de suelo que se perdió en el periodo de estudio, fue de $300\text{kg}\text{año}^{-1}$, lo que representa a $6\text{ t ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$. La precipitación media anual fue de $1.679,3\text{mm}$ que equivale a 839.650litros en 500m^2 , el agua recolectada fue de 21.301litros equivalente al 2,5% del volumen de agua precipitada, por lo que el agua infiltrada fue de 818.349litros equivalentes al 97,5% (Ortiz 1996).

En el sistema de siembra directa, sin camellones en curva de nivel, representada por un área de 160m^2 , la cantidad de suelo perdido en dicho periodo de estudio fue de 16 kgaño^{-1} , equivalente a $1\text{ t ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$. La precipitación media anual fue de $1679,3\text{mm}$ que representa 268.688litros en 160m^2 , el agua total recolectada fue de 295litros que equivale al 0,1% del volumen total del agua precipitada, por lo tanto, el agua infiltrada fue de 268.393litros equivalentes al 99,9% del agua precipitada (Ortiz 1997).

Estudios de riesgo de erosión hídrica fueron realizados en la Región Este, Centro y Sur de la Región Oriental del Paraguay (Caballero 2004; Sarubi 2005).

Según Caballero, (2004), el riesgo de erosión hídrica en el centro de la Región Oriental del Paraguay conformado por los Departamentos de Central, Paraguari, Cordillera, Caazapá, Guaira y Caaguazú son los siguientes: las tierras con riesgo de erosión ligera ocupan 15,79%; las tierras con riesgo de erosión moderada ocupan 69,85%; las tierras con riesgo de erosión severa 8,46%; y muy severa 0,62% de la región.

Según Sarubi (2005), la unidad geográfica del Sur Oriental Paraguayo presenta en gran parte de su área riesgo de erosión hídrica moderado (58,45% de su superficie). El 28,73%, de su superficie presenta riesgo de erosión ligero y el 11,78% del área estudiada presenta un riesgo de erosión severo.

El mismo autor señala que el Departamento de Ñeembucú presenta el 66,9% de su extensión bajo riesgo de erosión ligero y el 30,6% bajo riesgo de erosión moderado; el Departamento de Misiones 72% bajo riesgo de erosión moderado y el 27,6% bajo riesgo de erosión ligero; Itapúa 71,08% bajo riesgo moderado y 27,16% bajo riesgo severo.

En la Figura 1, se presentan los resultados obtenidos por Sánchez (2.004), en un estudio realizado para estimar el riesgo de erosión hídrica en el Departamento de Alto Paraná, considerando la textura del suelo, la pendiente y la erosividad de la lluvia obtenido mediante el índice de Fournier. El autor menciona que el Departamento presenta riesgo de erosión hídrica moderado en la mayor parte de su superficie 86,1%, y en menor proporción las clases de riesgo ligero y severo.

Mapa de Riesgo de Erosión Hídrica en el departamento Alto Paraná

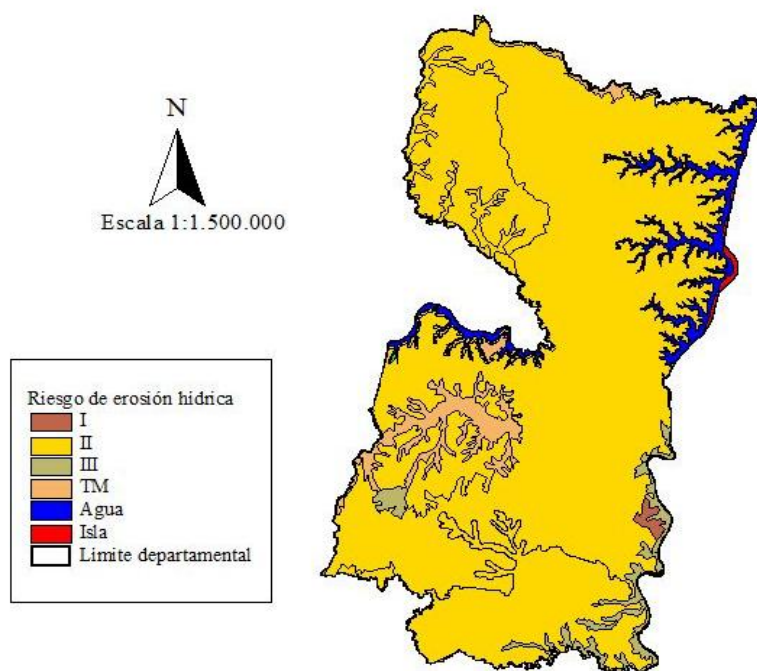


Figura 1. Distribución del riesgo de erosión hídrica en el Departamento Alto Paraná.

Bertol et al., (2002), evaluaron la erosividad de la lluvia y la erosionabilidad de los suelos, utilizando datos de lluvias y pérdida de suelos del periodo comprendido entre 1989 y 1998, en el Centro de Ciencias Agroveterinarias de Lages (SC. Br.), en el estudio fueron considerados diversos factores de erosividad, utilizando los métodos de Wischmeier y Smith y de Wagner y Massambani, de 437 lluvias consideradas erosivas de un total de 966 lluvias, el valor del índice de erosividad EI_{30} y el factor de erosividad (R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) recomendado para Lages fue de $5.790 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, un 63% del cual ocurre en primavera – verano, 76% en el periodo de setiembre a marzo y en el periodo crítico, octubre, enero y febrero, que constituye el 41% de erosividad de la lluvia.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización de la investigación

El área de estudio constituyó el Departamento de Alto Paraná (Figura 2), ubicado en 25°30'60'' latitud Sur y 54°37'60'' longitud Oeste. Sus límites actuales, son casi todos naturales, lo separan al norte con el Departamento de Canindeyú, al este con con la República Federativa del Brasil y la República Argentina, al sur con el Departamento de Itapúa, al suroeste con el Departamento Caazapá y al oeste con el Departamento de Caaguazú (DGEEC 2004b).

Alto Paraná es responsable por la producción de alrededor de 44% de la soja que se produce en el Paraguay, el 35% del trigo, el 20% del maíz y el 9% del algodón (Paredes 1998).

El Alto Paraná presenta una temperatura máxima en el verano de 38 °C. La mínima en el invierno llega a 0 °C. La media anual es de 21 °C. Cuenta con abundantes precipitaciones durante todo el año. Los registros llegan a marcar 1725 mm anuales. Esta es la cifra más alta registrada en todo el país. A consecuencia de ello, la zona posee mucha humedad ambiental, aspecto favorable para las tareas agrícolas. En épocas invernales, son constantes las lloviznas y las neblinas (Sánchez 2006).



Figura 2. Ubicación del área de estudio, Alto Paraná. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo la DGEEC (2002) gran parte del Departamento está formado por tierras altas y onduladas. Las áreas próximas al río Paraná presentan pendientes pronunciadas, con altas barrancas en todo el curso del río. Bosques frondosos cubrían el área departamental, pero a partir de la década del 60 y especialmente la del 70, la cobertura boscosa se ha ido reduciendo debido a la explotación indiscriminada de la madera y al desmonte para la habilitación de lotes agrícolas. Actualmente existen planes de reforestación en la zona. El río Paraná y sus principales afluentes: Itambey, Limoy, Yguazú, Acaray, Monday, Yacuy Guazú, Ypety y Ñacunday, así como numerosos arroyos, conforman el sistema hídrico del Departamento. Los ríos Paraná y Acaray son utilizados por las hidroeléctricas Itaipú y Acaray respectivamente, situación que lo convierte en el Departamento con mayor energía hidroeléctrica del país. Los ríos Monday y Ñacunday son también potenciales generadores de energía electrohidráulica.

Antiguamente en la zona, la principal actividad era la explotación forestal. En la actualidad, los habitantes se dedican en parte a la industrialización de diversas variedades de madera como ser: cedro, yvyra pyta, lapacho, taperyva guasu, petereby, guatambu, incienso, guaica y otras más. Una actividad importante es el cultivo de pino como reforestación. Aproximadamente 440.000 ha son ocupadas para la agricultura. Se produce: soja, maíz, trigo, menta, algodón, caña de

azúcar, mandarino, naranjo dulce, tomate, mandioca, batata, arroz, secano, papa, zanahoria, frutilla, girasol, arveja y ka'a he'e (DGEEC 2002).

En este Departamento se cría ganado vacuno y porcino. También se destaca la cría de razas indianas como el cebú y nelore. La industria ocupa un lugar de creciente importancia. Existen fábricas de aceites, de alimentos balanceados, embutidos, aserraderos, molinos arroceros y yerbateros, cerámica, envasadoras de palmitos y productos lácteos (MAG 2012).

3.2 Estaciones meteorológicas en Alto Paraná

Las estaciones meteorológicas identificadas en el Departamento de Alto Paraná, totalizan siete, de las cuales cinco pertenecen a la entidad Itaipú Binacional, ubicadas en los Distritos de San Alberto (una) y Hernandarias (cuatro), una estación pertenece a la Dirección de Meteorología e Hidrología dependiente de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC). Se encuentra ubicada en el Distrito de Minga Guazú y la última ubicada en el Distrito de Hernandarias pertenece a la Represa de Acaray de la Administración Nacional de Electricidad.

Las estaciones de la entidad Itaipú Binacional que cuentan con registros históricos entre las cinco identificadas son dos, la ubicada en el Distrito de San Alberto, en las coordenadas 24°57'50'' de latitud Sur y 54°57'51'' de longitud Oeste, y otra en el Distrito de Hernandarias, en la estación de Acuicultura, en las coordenadas 25°26'30'' de latitud Sur y 54°37'41'' de longitud Oeste, en estas estaciones existen registros que datan de 1982 para la estación ubicada en el Distrito de San Alberto y desde 1979 para la estación ubicada en el Distrito de Hernandarias.

La tercera estación pertenece a la Dirección de Meteorología e Hidrología y cuenta con registros desde 1.966 hasta 1.997, se encontraba ubicada en el Distrito de Minga Guazú, desde ese año la estación pasó a funcionar en el Aeropuerto Guaraní en las coordenadas 25° 27'21'' de latitud Sur y 54°59'24'' de longitud Oeste, en el Distrito de Minga Guazú.

3.3 Población de unidades y variables de medición

El trabajo fue realizado a partir de los registros pluviográficos diarios y datos sobre el clima del área de estudio, proveídos por la Dirección de Meteorología e Hidrología del Ministerio de Defensa Nacional. También se trabajó con registros pluviométricos de las estaciones de la entidad Itaipú Binacional ubicadas en los Distritos de San Alberto y Hernandarias.

Las variables medidas en la investigación fueron: la cantidad de lluvia caída y acumulada; el tiempo de retorno; la frecuencia de las lluvias erosivas; la precipitación mensual media; la precipitación total anual; los índices de erosividad EI_{30} y $KE>25$; la frecuencia de los índices de erosividad EI_{30} y $KE>25$; el coeficiente de precipitación; el índice de Fournier y, el riesgo de erosión por erosividad de la lluvia

3.4 Recursos materiales y equipos técnicos

El trabajo fue realizado a partir de registros pluviográficos y pluviométricos proveídos por la Dirección de Meteorología e Hidrología del Ministerio de Defensa Nacional y la Entidad Binacional Itaipú.

Los datos fueron procesados en planillas electrónicas de Microsoft Excel versión 2007 y presentados utilizando Microsoft Word y el programa Arcview versión 3.2 para los mapas.

3.5 Determinación de la erosividad de la lluvia EI_{30} y $KE>25$ por datos pluviográficos

En la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) del Ministerio de Defensa Nacional fueron seleccionados los pluviogramas con registros diarios (1A). Estos pluviogramas corresponden a un periodo de 19 años (1969 - 1980 y 2000 - 2006). Los periodos no considerados presentan fajas con registro semanal.

A partir de los pluviogramas con registros diarios fueron determinados los índices de erosividad de la lluvia, EI_{30} y $KE > 25$. Para el cálculo de estos índices, fueron segmentadas y analizadas las lluvias erosivas conforme la recomendación de Wischmeier y Smith (1958), con pequeñas variaciones según sugerencias de Cabeda (1976).

Esto consistió en seccionar los pluviogramas que presentaban 10,0mm o más de lluvia; seccionar los pluviogramas que presentaban menos de 10,0mm de lluvia, si la cantidad en 15 minutos fuese de 6,0mm o más.

Las lluvias separadas por menos de 6 horas con cualquier cantidad de lluvia en ese periodo, o lluvias separadas por 6 horas consecutivas y con 1,0mm o más de lluvia en ese periodo, fueron tratadas como una única lluvia, es decir, el índice de erosión fue uno solo para el grupo entero de lluvias.

Las lluvias separadas por 6 horas consecutivas o más con menos de 1,0mm de precipitación en ese periodo, fueron tratadas como lluvias diferentes, los índices de erosión fueron calculados de acuerdo a la cantidad de eventos.

Para todas las lluvias consideradas erosivas, fueron analizadas la duración, la precipitación, la energía cinética total, la energía cinética para cada segmento de lluvia con intensidades mayores a $25,0 \text{ mm h}^{-1}$ y las intensidades máximas en 30 minutos.

La energía cinética (E_c) de las precipitaciones fue determinada por medio de la siguiente ecuación:

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \log_{10} I \quad (\text{Wischmeier y Smith, 1958}) \quad (1)$$

Dónde

E_c = energía cinética por milímetro de lluvia, $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$

I = intensidad de la lluvia, mm h^{-1} , y

0,019; 0,0873; parámetros de ajustes de las ecuaciones.

La energía cinética fue calculada para todas las intensidades de los segmentos cortados y sumadas al final (2A).

Para intensidades mayores a 25 mm h^{-1} , el cálculo de la energía cinética fue realizado aislando cada segmento de lluvia con esa intensidad mediante la sumatoria de las energías cinéticas de estos eventos conforme el índice de Hudson, $KE > 25$.

El cálculo de la intensidad máxima en 30 minutos, fue en mm h^{-1} . Si una lluvia tuvo una duración de menos de 30 minutos, la intensidad máxima en 30 minutos fue calculada como si la lluvia hubiese durado por lo menos 30 minutos.

El procedimiento utilizado para la estimación de la energía cinética es descrito a continuación:

- a. Separar lluvias individuales. Una lluvia individual, por definición, es aquella separada de la anterior y la posterior, por un periodo mínimo de 6 horas sin lluvia, o donde la cantidad total de lluvia no sobrepase 1mm;
- b. Verificar si se trata de una lluvia erosiva. Lluvia erosiva, por definición es aquella cuya cantidad total sea igual o superior a 10 mm, o que tenga 6 mm o más ocurridos en 15 minutos o menos;
- c. Separar los segmentos uniformes (segmentos con la misma inclinación en la curva), que representan periodos de misma intensidad de lluvia. En función de la cantidad de lluvia en el segmento y a la duración del mismo se calcula la intensidad de la lluvia en cada segmento en unidades de mm h^{-1} ;
- d. Para cada uno de los segmentos uniformes será calculada la energía cinética mediante la ecuación: $E_c = 0,119 + 0,0873 \log_{10} I$
 dónde:
 E_c = unidad de energía por mm de lluvia ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$);
 I = intensidad de lluvia en el segmento uniforme (mm h^{-1})

- e. Multiplicar cada valor de “Ec” por la cantidad total de lluvia, en mm, ocurrida en el segmento, con eso se obtendrá en valor de la energía cinética en ese segmento de lluvia, en MJ ha⁻¹;
- f. Sumando la energía cinética de todos los segmento de una lluvia individual será obtenida la energía cinética total de la referida lluvia;
- g. Durante todo el periodo de una lluvia individual, determinar el periodo consecutivo de 30 minutos en que ocurrió la mayor cantidad de lluvia, con base a esos 30 minutos determinar la intensidad máxima de la lluvia individual, dada en mm h⁻¹ (cantidad de lluvia en 30 minutos multiplicada por 2 para expresar la intensidad en mm h⁻¹);
- h. Calcular el índice EI₃₀ de la lluvia individual, que está dado por el producto de la energía cinética total de la lluvia y la intensidad máxima, en mm.h⁻¹, dado con base en un periodo de 30 minutos, (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹);
- i. Sumando los EI₃₀ de todas la lluvias individuales de un determinado mes, se obtendrá la erosividad de las lluvias para ese mes (erosividad mensual);
- j. Sumando los índices de erosividad (EI₃₀) de los 12 meses de un determinado año, será obtenida la erosividad anual de las lluvias para ese año;
- k. Haciendo una media de la erosividad anual de las lluvias de un periodo largo (19 años o más), será obtenido el Factor “R” de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, en (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹)

A partir de la obtención de todos los parámetros de la lluvia, fueron calculados los índices de erosión EI₃₀, según Wischmeier y Smith (1958) y el índice KE > 25, según lo propuesto por Hudson (1971), citados por González (1986), expresados a través de las ecuaciones presentadas a continuación:

$$EI_{30} = \sum (Ec \times P) \times I_{30}, y \quad (2)$$

$$KE > 25 = \sum (Ec \times P \times I \geq 25) \quad (3)$$

Dónde:

EI₃₀ y KE >25 = índices de erosión de la lluvia, en MJ mm ha⁻¹h⁻¹ y MJha⁻¹

I_{30} = intensidad máxima en 30 minutos, en mm h^{-1}

$I \geq 25$ = segmento de lluvia donde la intensidad es mayor o igual a 25 mm/h

Los índices de erosividad fueron luego llevadas a la clasificación sugerida por Gumbel, citado por Mannaerts (1999) descripto a continuación

Tabla 3. Clasificación de rangos típicos de R anual

Clase	R ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$)
Muy baja	<500
Baja	500-1000
Mediana	1000-3000
Alta	3000-6000
Muy alta	>6000

3.6 Distribución mensual y estacional del índice de la erosividad de la lluvia

A partir de la media aritmética de los valores mensuales de los índices calculados, fueron obtenidos las medias mensuales y ser relacionados con el valor medio anual, los porcentajes de cada mes permitieron hacer una distribución mensual de los índices en el área de estudio. De la misma forma, la relación entre la media aritmética de los valores de los índices para cada estación del año con el valor medio anual resultó en una distribución estacional de los índices.

3.7 Distribución de la frecuencia y probabilidad de ocurrencia de la erosividad

La distribución de la frecuencia de los valores de los índices anuales fue mostrada por Wischmeier (1959). Para el cálculo de la distribución de la frecuencia, los índices anuales de erosión fueron colocados en orden decreciente, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$T = (N + 1) / m \quad (4)$$

Dónde:

T = frecuencia en años que un dado índice de erosión de lluvia será igualado o excedido;

N = número de años de registro

m = orden del índice

La probabilidad (P) de ocurrencia fue calculada por la ecuación inversa de T y convertida en porcentaje a través de la ecuación:

$$P = (1 / T) \times 100 \quad (5)$$

Fueron realizados análisis semejantes para valores mensuales y máximo mensual para el área de estudio.

3.8 Lluvias críticas

Las lluvias fueron consideradas erosivas cuando presentaban 10 mm o más, o cuando presentaban un mínimo de 6mm caídos en un periodo máximo de 15 minutos, siendo consideradas los demás eventos de lluvia inferiores como no erosivas (Wischmeier y Smith, 1978).

Considerando los resultados obtenidos para la erosividad de la lluvia fue estimada la correlación de estos índices con resultados obtenidos en el Departamento sobre pérdida de suelo en donde fue plicada la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

3.9 Evaluación de la erosividad de la lluvia por medio de datos pluviométricos

En una tentativa de utilizar los datos pluviométricos, fueron estudiados modelos de regresiones entre los índices de erosividad medios mensuales (EI_{30} y $KE > 25$) y la razón de precipitación (coeficiente de lluvia), que fue calculado para cada mes, utilizando valores medios de precipitación del mismo periodo que fue utilizado para la obtención de los índices de erosividad.

Así mismo fueron calculados el Índice de Fournier para las tres estaciones con las que se contaban con datos de precipitación acumulada, este índice relaciona

la precipitación media mensual más elevada (p) respecto a la precipitación media anual.

$$K = \frac{p^2}{P} \quad (6)$$

Dónde:

K: representa la Erosividad de la lluvia;

p: es la precipitación mensual;

P: representa la precipitación anual.

La erosividad de la lluvia así determinada, fue representada por cuatro categorías respecto al riesgo de erosión hídrica, según propuesta por Ortiz et al. (1997). Estas categorías se presentan en el 3A.

3.10 Métodos de control de calidad de los datos

Fue analizada la congruencia de los datos obtenidos con especialistas y control cruzado con datos de estaciones meteorológicas de ITAIPU Binacional.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Frecuencia de lluvias erosivas y no erosivas

Durante el periodo de muestreo que abarcó desde 1.969 – 1.980 y del 2.000 – 2.006, con datos de registros pluviográficos diarios proveídos por la Dirección de Meteorología e Hidrología (DINAC), ocurrieron un total de 943 lluvias; de las cuales 560 fueron lluvias erosivas, representando el 59,3% del total y 383 lluvias no erosivas alcanzando el 40,7%. Resultados semejantes fueron obtenidos por Bertol et al. (2002) para el Municipio de Lages (SC). El mes de octubre es el que presenta mayor número de precipitación con 10,1% del total de eventos, mientras que el mes con menor número de precipitaciones fue abril con 5,8% del total de eventos estudiados (Tabla 4).

En relación al número de lluvias erosivas (4A), los meses de mayo, setiembre, octubre, diciembre y enero constituyen el 53,6% del total de lluvias erosivas ocurridas, caracterizándose como los meses más críticos en los cuales es mayor el riesgo de erosión, y coinciden con los meses de preparación del suelo y siembra de los cultivos de primavera-verano, mientras que en el mes de julio ocurre solo un 3,6% del total de lluvias erosivas ocurridas en el periodo de estudio. Los valores medios anuales de la cantidad de eventos pluviales ocurridos en un periodo de 19 años en el Departamento de Alto Paraná fueron de 29,5, 20,2 y 49,6 para las lluvias consideradas erosivas, no erosivas y totales, respectivamente con un coeficiente de variación de 24,7, 79,0 y 30,0 %. En ese periodo los números máximo y mínimo de eventos mensuales ocurridos variaron de 95 a 55 para los meses de octubre y abril, respectivamente.

Tabla 4. Frecuencias mensuales, anuales y medias mensuales y anuales de lluvias erosivas, no erosivas y total observadas en el periodo 1.969 – 1.980 y 2.000 - 2.006 en Alto Paraná.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic	Total
EROSIVAS													
Total	65	41	38	38	57	42	20	32	55	63	49	60	560
Media	3,4	2,2	2,0	2,0	3,0	2,2	1,1	1,7	2,9	3,3	2,6	3,2	29,5
C.V. (%)	65,9	78,5	88,9	68,8	73,3	74,2	84,3	64,0	68,1	38,0	69,3	55,6	24,7
NO EROSIVAS													
Total	27	30	39	17	34	48	40	39	31	32	21	25	383
Media	1,4	1,6	2,1	0,9	1,8	2,5	2,1	2,1	1,6	1,7	1,1	1,3	20,2
C.V. (%)	122,6	142,1	77,0	161,9	90,5	95,5	93,5	91,1	79,7	159,6	116,4	168,1	79,0
TOTAL													
Total	92	71	77	55	91	90	60	71	86	95	70	85	943
Media	4,8	3,7	4,1	2,9	4,8	4,7	3,2	3,7	4,5	5,0	3,7	4,5	49,6
C.V. (%)	45,8	81,2	57,9	65,0	70,5	53,5	60,9	39,7	59,5	55,4	67,7	67,2	30,0

*Aquella cuya cantidad total sea igual o superior a 10 mm, o que tenga 6 mm o más ocurridos en 15 minutos o menos, de acuerdo con Wischmeier y Smith (1.958).

En la Figura 3, se presenta la distribución de las frecuencias medias mensuales de eventos de precipitación ocurridos en el Departamento Alto Paraná en el periodo de 1969 – 1980 y 2000 – 2006. Se observa que los meses de enero, mayo, setiembre, octubre y diciembre son los que presentan mayor número de eventos considerados erosivos.

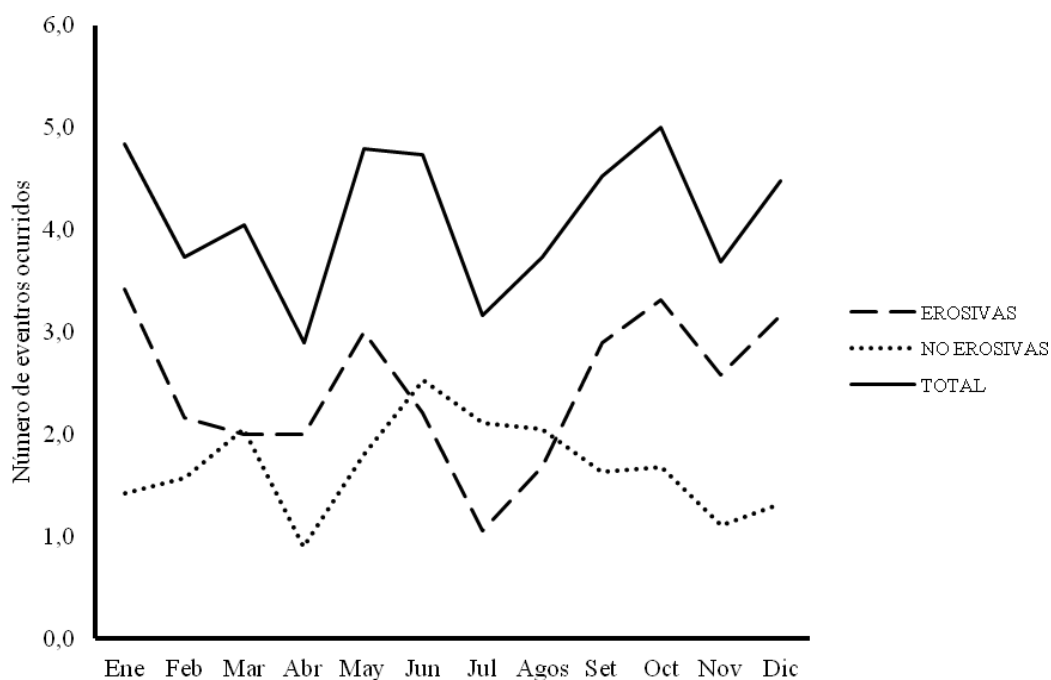


Figura 3. Distribución media mensual de la frecuencia de eventos pluviales registrados en el periodo de 1969-1980 y 2000-2006 en el Departamento Alto Paraná.

4.2 Precipitación acumulada

En lo que concierne a la precipitación acumulada en el periodo de estudio (Tabla 5), las lluvias erosivas corresponden al 92,6%, alcanzando una cantidad media anual igual a 1.012,6 mm y las lluvias no erosivas corresponden al 7,4% restante, con una media anual de 81,2mm. La media anual para el total de eventos estudiados en el periodo 1.969 – 1.980 y 2.000 – 2.006 corresponde a 1.093,2 mm. Los valores medios anuales de la precipitación mensual acumulada para el periodo de estudio presentan una desviación estándar de 286,3 mm para las lluvias erosivas, 63,8mm para las lluvias no erosivas y 273,9 mm para el total, con un coeficiente de variación igual a 28,3% para lluvias erosivas, 78,6% para las lluvias no erosivas y 25,0% para el total de eventos en el periodo estudiado. Los valores medios mensuales de precipitación acumulada en el periodo de estudio varían de 766,4mm para el mes de julio y 2.450, mm para el mes de octubre respectivamente (ver 5A). El elevado porcentaje de lluvias erosivas en relación al total, indica la necesidad de tener consideraciones con el uso de las prácticas conservacionistas en la región.

De igual manera, considerando la acumulación de lluvias erosivas (Tabla 3), se verifica que los meses de enero, mayo, octubre y diciembre contribuyen en un 46,5% del total precipitado, lo cual indica que en estos meses deben ser consideradas las prácticas conservacionistas en el área de estudio ya que estos meses coinciden con la preparación del terreno para la siembra, dejando al suelo expuesto a la erosión hídrica, así como también en la siembra directa, mientras que los meses de julio y agosto son los que presentan menor porcentaje en relación al total de lluvias erosivas con un 8,1%, caracterizándose como los meses con menor riesgo de erosión hídrica.

Tabla 5. Valores mensuales, anuales y medias mensual y anual de precipitación acumulada (mm), erosivas, no erosivas y totales en el periodo 1969 – 1.980 y 2.000 - 2006 en el Departamento Alto Paraná.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic	Total
EROSIVAS*													
Mm													
Total	2319,2	1315,4	1371,9	1365,1	2161,4	1405,6	585,3	972,9	1581,1	2312,9	1695,9	2152,9	19239,6
Media	122,1	69,2	72,2	71,8	113,8	74,0	30,8	51,2	83,2	121,7	89,3	113,3	1012,6
C.V. (%)	76,8	87,7	108,3	78,2	98,2	78,8	102,6	81,1	59,9	46,3	80,9	72,2	28,3
NO EROSIVAS													
Total	103,5	149,0	126,7	56,1	147,8	187,2	181,1	100,3	165,0	137,4	99,8	88,5	1542,4
Media	5,4	7,8	6,7	3,0	7,8	9,9	9,5	5,3	8,7	7,2	5,3	4,7	81,2
C.V. (%)	146,0	147,3	102,2	202,7	92,7	123,7	124,7	123,3	105,0	150,6	181,8	160,5	78,6
TOTAL													
Total	2422,7	1464,4	1498,6	1421,2	2309,2	1592,8	766,4	1073,2	1746,1	2450,3	1795,7	2241,4	20782,0
Media	127,5	77,1	78,9	74,8	121,5	83,8	40,3	56,5	91,9	129,0	94,5	118,0	1093,8
C.V. (%)	71,3	76,8	99,9	75,0	94,8	66,3	76,2	68,1	55,1	42,1	75,5	71,3	25,0

*Aquella cuya cantidad total sea igual o superior a 10 mm, o que tenga 6 mm o más ocurridos en 15 minutos o menos, de acuerdo con Wischmeier y Smith (1.958).

En la Figura 4, se grafica la distribución de las precipitaciones medias mensuales acumuladas del periodo de estudio, los meses de enero, mayo, octubre y diciembre se caracterizan por ser los meses en los cuales se da una mayor precipitación con una media mensual igual a 122,1 mm, 113,8 mm, 129,0 mm y 118,0 mm respectivamente, mientras que los meses de julio y agosto presentan valores menores con una media mensual de 30,8 y 51,2 mm cada uno, esto teniendo en cuenta la precipitación acumulada de los eventos considerados como erosivos.

Del mismo modo, se representan los valores porcentuales de las precipitaciones acumuladas durante el periodo de estudio en el Departamento de Alto Paraná, los meses más erosivos representan un 45,3% del total de precipitaciones acumuladas en el periodo de estudio, atribuyéndose este valor a la sumatoria de los porcentajes de los meses con mayor número de eventos erosivos y mayor acumulación de precipitación media en el Departamento. En relación al número de eventos erosivos ocurridos en el periodo de estudio existe una marcada diferencia en el mes de setiembre, en el que se da un gran número de lluvias, sin embargo, la mayoría de estos eventos son considerados no erosivos.

Los meses de julio y agosto representan los valores porcentuales más bajos en relación al total de precipitación acumulada así como al porcentaje de lluvias consideradas como erosivas.

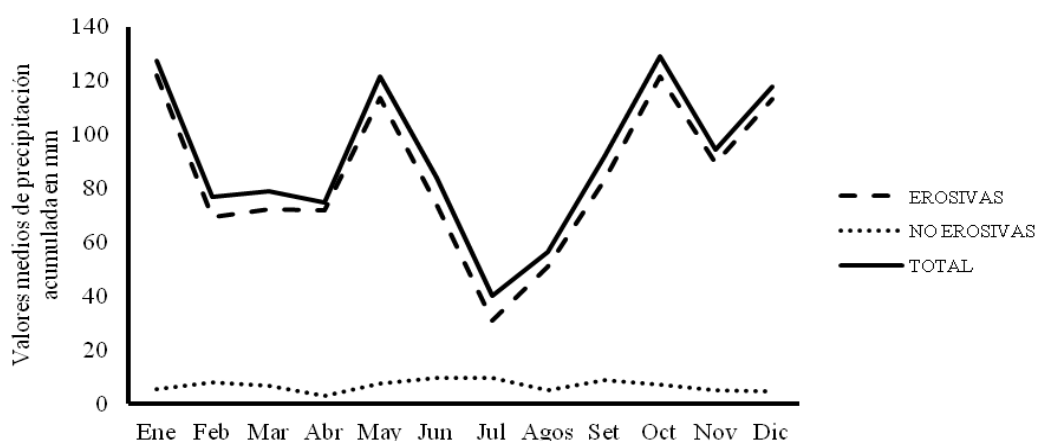


Figura 4. Distribución de la precipitación media mensual acumulada en el Departamento Alto Paraná en el periodo 1969-1980 y 2000-2006.

4.3.1 Intensidad de la lluvia

Los valores de las intensidades máximas de los eventos estudiados en Alto Paraná en el periodo 1.969 – 1.980 y 2.000 – 2.006, considerados como eventos erosivos de acuerdo con la metodología Wischmeier y Smith (1.958), están representados en la Tabla 6. La intensidad máxima media anual alcanzó $35,4 \text{ mm h}^{-1}$ con un coeficiente de variación igual a 45,2 %. Es importante aclarar que los espacios sin datos representan los meses en los cuales no se registraron eventos de lluvia erosiva.

La intensidad mensual máxima en 30 minutos alcanzó $88,8 \text{ mm h}^{-1}$ observada en el mes de abril del año 1.975, mientras que la intensidad mínima en 30 minutos de los eventos estudiados fue de $3,2 \text{ mm h}^{-1}$, observada en setiembre del 2.005.

Los meses que presentan las mayores intensidades medias anuales en 30 minutos para el periodo de estudio en el Departamento Alto Paraná son enero, marzo, octubre y diciembre con valores de $47,9$, $41,7$, $46,2$ y $44,1 \text{ mm h}^{-1}$, respectivamente.

Entre las intensidades mínimas en 30 minutos de todos los eventos estudiados, las casillas con valor “cero” corresponden a los meses en los cuales se registro un solo evento, el cual fue considerado como la intensidad máxima en ese mes (6A).

Tabla 6. Valores mensuales y anuales de las intensidades máxima en 30 minutos observadas en el periodo de 1.969 – 1.980 y 2.000 – 2.006 en el Departamento Alto Paraná

Año	Intensidad máxima en 30 minutos (mm h ⁻¹)												Media
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic	
1.969	45,8	59,6	29,8	13,2	80,6	30,4	--	8,2	20,2	13,0	35,6	41,8	34,4
1.970	63,8	9,2	45,4	49,2	16,0	21,4	12,0	10,2	19,4	46,4	--	27,2	29,1
1.971	79,0	76,6	48,8	33,8	33,8	31,2	28,0	13,8	46,8	37,2	21,0	29,8	40,0
1.972	46,8	32,4	35,4	44,0	8,6	40,4	23,4	30,4	42,0	52,0	63,2	23,2	36,8
1.973	63,6	38,0	65,8	24,2	86,0	49,4	19,6	13,2	25,2	23,8	14,4	22,2	37,1
1.974	71,0	39,6	20,2	14,8	40,2	29,6	8,4	28,4	12,9	36,6	24,2	47,5	31,1
1.975	39,2	26,2	42,6	88,8	4,8	28,8	26,6	14,6	18,0	61,8	17,4	67,2	36,3
1.976	6,6	--	47,0	16,4	31,8	--	25,8	31,8	19,2	57,4	51,0	40,4	32,7
1.977	44,6	--	--	--	36,8	9,8	19,4	15,8	21,4	39,8	46,6	38,4	30,3
1.978	36,6	--	34,0	--	22,8	23,2	33,4	19,2	24,6	51,0	37,2	41,9	32,4
1.979	51,0	38,4	--	77,8	38,0	23,0	17,6	50,8	28,4	56,8	24,8	76,0	43,9
1.980	39,0	45,8	68,2	17,2	20,3	29,2	26,0	36,2	14,2	27,2	--	--	32,3
2.000	60,4	66,2	14,8	30,8	33,0	47,0	--	10,4	35,2	46,2	34,6	55,0	39,4
2.001	43,0	66,8	28,4	34,6		36,0	9,2	26,2	15,8	32,2	38,4	33,8	33,1
2.002	54,8	21,8	--	--	64,6	--	--	--	27,0	44,2	37,0	83,6	47,6
2.003	33,2	31,0	41,4	12,0	15,6	20,6	9,0	6,8	20,4	79,4	26,2	43,4	28,3
2.004	26,4	26,4	23,6	51,8	40,0	29,6	--	19,8	--	61,2	29,0	52,6	36,0
2.005	57,4	16,4	--	17,2	43,2	84,3	27,2	--	22,8	39,6	51,6	20,6	38,0
2.006	--	28,6	80,2	67,8		18,4	--	--	--	71,6	41,8	48,6	51,0
Media	47,9	38,9	41,7	37,1	36,2	32,5	20,4	21,0	24,3	46,2	34,9	44,1	35,4
C.V.	34,8	48,2	42,8	63,3	61,3	49,8	38,4	55,7	37,3	34,9	36,7	39,5	45,2

En la Tabla 7 están presentadas la distribución de la frecuencia y la probabilidad de ocurrencia de los valores máximos de intensidad mensual en 30 minutos calculados para un periodo de 15 años en el Departamento de Alto Paraná.

Puede observarse que la media anual para los meses con mayor intensidad tienen una probabilidad de 53,1 % de ocurrir por lo menos una vez cada 1,9 años para el mes de enero, para los meses de marzo y diciembre existe una probabilidad de 46,9 % de ocurrir al menos una vez cada 2,1 años y para el mes de octubre una probabilidad de ocurrencia de 62,5 % cada 1,6 años, en los cuales se podrían alcanzar o sobrepasar las intensidades medias mensuales máximas.

Tabla 7. Distribución de la frecuencia y probabilidad de ocurrencia de las máximas intensidades mensuales en 30 minutos.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic	Orden (n)	Tiempo de Retorno T (años)	Probabilidad (%)
mm h ⁻¹														
79,0	76,6	80,2	88,8	86,0	84,3	33,4	50,8	46,8	79,4	63,2	83,6	1	16,0	6,3
71,0	66,8	68,2	77,8	80,6	49,4	28,0	36,2	42,0	71,6	51,6	76,0	2	8,0	12,5
63,8	66,2	65,8	67,8	64,6	47,0	27,2	31,8	35,2	61,8	51,0	67,2	3	5,3	18,8
63,6	59,6	48,8	51,8	43,2	40,4	26,6	30,4	28,4	61,2	46,6	55,0	4	4,0	25,0
60,4	45,8	47,0	49,2	40,2	36,0	26,0	28,4	27,0	57,4	41,8	52,6	5	3,2	31,3
57,4	39,6	45,4	44,0	40,0	31,2	25,8	26,2	25,2	56,8	38,4	48,6	6	2,7	37,5
54,8	38,4	42,6	34,6	38,0	30,4	23,4	19,8	24,6	52,0	37,2	47,5	7	2,3	43,8
51,0	38,0	41,4	33,8	36,8	29,6	19,6	19,2	22,8	51,0	37,0	43,4	8	2,0	50,0
46,8	32,4	35,4	30,8	33,8	29,6	19,4	15,8	21,4	46,4	35,6	41,9	9	1,8	56,3
45,8	31,0	34,0	24,2	33,0	29,2	17,6	14,6	20,4	46,2	34,6	41,8	10	1,6	62,5
44,6	28,6	29,8	17,2	31,8	28,8	12,0	13,8	20,2	44,2	29,0	40,4	11	1,5	68,8
43,0	26,4	28,4	17,2	22,8	23,2	9,2	13,2	19,4	39,8	26,2	38,4	12	1,3	75,0
39,2	26,2	23,6	16,4	20,3	23,0	9,0	10,4	19,2	39,6	24,8	33,8	13	1,2	81,3
39,0	21,8	20,2	14,8	16,0	21,4	8,4	10,2	18,0	37,2	24,2	29,8	14	1,1	87,5
36,6	16,4	14,8	13,2	15,6	20,6	--	8,2	15,8	36,6	21,0	27,2	15	1,1	93,8

4.3 Índice de erosividad de la lluvia, EI₃₀

Los valores medios mensuales y anuales del índice de erosividad EI₃₀ en el Departamento Alto Paraná, para un periodo de 19 años (periodo de 1969 – 1980 y 2000 – 2006) se presentan en la Tabla 8. Cabe destacar que los espacios sin datos en la tabla corresponden a los meses en los cuales no se tuvieron registros pluviográficos, sin embargo, esto no significa que no hubo precipitaciones en esos meses.

El factor R “erosividad de la lluvia” de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), definido como el índice que evalúa la capacidad erosiva media anual de la lluvia en un área sin protección o bajo condiciones normales de manejo, para el Departamento Alto Paraná es de 7.525 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹. El 53,3% del EI₃₀ para el periodo de estudio se da en los meses de enero, mayo, octubre y diciembre, con medias mensuales de 1.158, 859, 991 y 1.002 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ respectivamente. Estos meses coinciden con los de mayor intensidad en 30 minutos, exceptuando el mes de mayo en el que la intensidad media anual fue de 36,2 mm h⁻¹ siendo menor al determinado en marzo (Tabla 6). El índice EI₃₀ fue inferior en los meses de junio, julio, agosto y setiembre alcanzando una media de 404, 134, 226 y 332 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹, respectivamente.

Tabla 8. Sumatoria de EI₃₀ mensual, anual y medias mensuales y anuales. Lluvias erosivas

Año	Índice de erosividad de la lluvia EI ₃₀ (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)												Total
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
1969	1.694	1.608	788	222	2.944	549	--	27	456	207	682	641	9.820
1970	870	54	667	345	345	328	195	62	421	1.065	--	159	4.510
1971	2.530	885	2.287	590	586	316	290	119	629	422	410	265	9.328
1972	354	355	476	744	38	362	512	730	1.183	720	2.543	147	8.163
1973	1.703	869	1.120	658	2.258	748	138	88	378	555	182	146	8.841
1974	3.446	597	67	81	572	915	28	639	126	496	827	964	8.759
1975	970	448	1.127	2.651	23	394	127	116	231	1.293	151	1.691	9.223
1976	20	--	827	286	339	--	101	490	222	1.104	1.108	927	5.425
1977	740	--	--	--	214	101	78	175	181	408	1.076	559	3.531
1978	286	--	232	--	132	388	501	137	148	602	375	551	3.352
1979	411	909	--	1.725	1.178	73	101	828	574	1.042	579	3.583	11.004
1980	408	796	1.375	96	429	117	164	417	227	337	--	--	4.367
2000	2.571	3.100	47	240	590	1.135	--	92	440	1.598	563	1.941	12.318
2001	1.560	1.105	165	959	--	406	56	270	165	346	748	738	6.519
2002	2.306	133	--	--	2.771	--	--	--	400	593	208	2.571	8.981

Tabla 8. Sumatoria de EI₃₀ mensual, anual y medias mensuales y anuales. Lluvias erosivas (continuación).

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Índice de erosividad de la lluvia EI ₃₀ (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)													
2003	405	466	266	34	62	155	38	24	328	1.880	180	2.024	5.863
2004	175	91	103	790	1.074	171	--	73	--	2.361	303	724	5.865
2005	1.542	43	--	167	2.765	1.422	209	--	196	1.461	425	148	8.379
2006	--	277	3.006	1.237	--	90	--	--	--	2.341	517	1.260	8.728
Media	1.158	618	661	570	859	404	134	226	332	991	572	1.002	7.525
C.V. (%)	86,1	124,1	130,0	123,6	121,7	96,9	116,1	118,3	77,8	67,8	99,9	95,8	34,0

El valor medio anual del índice EI₃₀ para el Departamento Alto Paraná fue de 7.525 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹, con un desvío estándar de 2.558 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ y un coeficiente de variación igual a 34,0%. Durante el periodo de estudio, los valores anuales del índice de erosividad variaron de 3.352 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ a 12.318 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ para los años 1978 y 2000, respectivamente (Figura 5).

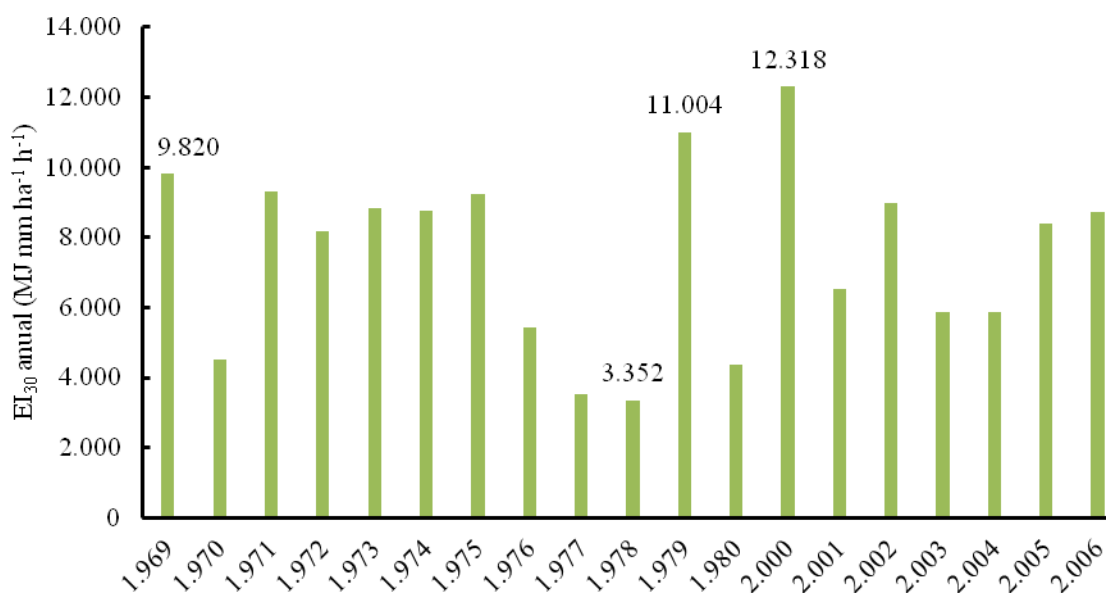


Figura 5. Distribución anual del índice de erosividad EI₃₀ en Alto Paraná, considerando 19 años de estudio.

En la Figura 6, están representados los valores porcentuales del índice de erosividad EI₃₀ medio mensual en relación al total medio anual y las medias mensuales de las lluvias consideradas erosivas con respecto al total anual. Los porcentajes más elevados para el índice EI₃₀ se determinaron en los meses enero, mayo, octubre y diciembre.

Durante los meses de junio, julio, agosto y setiembre puede observarse que el porcentual de lluvias erosivas es superior al del índice EI₃₀, indicando que las lluvias erosivas presentaron menor potencial erosivo en estos meses.

El conocimiento de la distribución media mensual de la erosividad de la lluvia en un área determinada es fundamental para la planificación conservacionista de uso del suelo, dando prioridad a los periodos del año donde se dan las erosividades críticas.

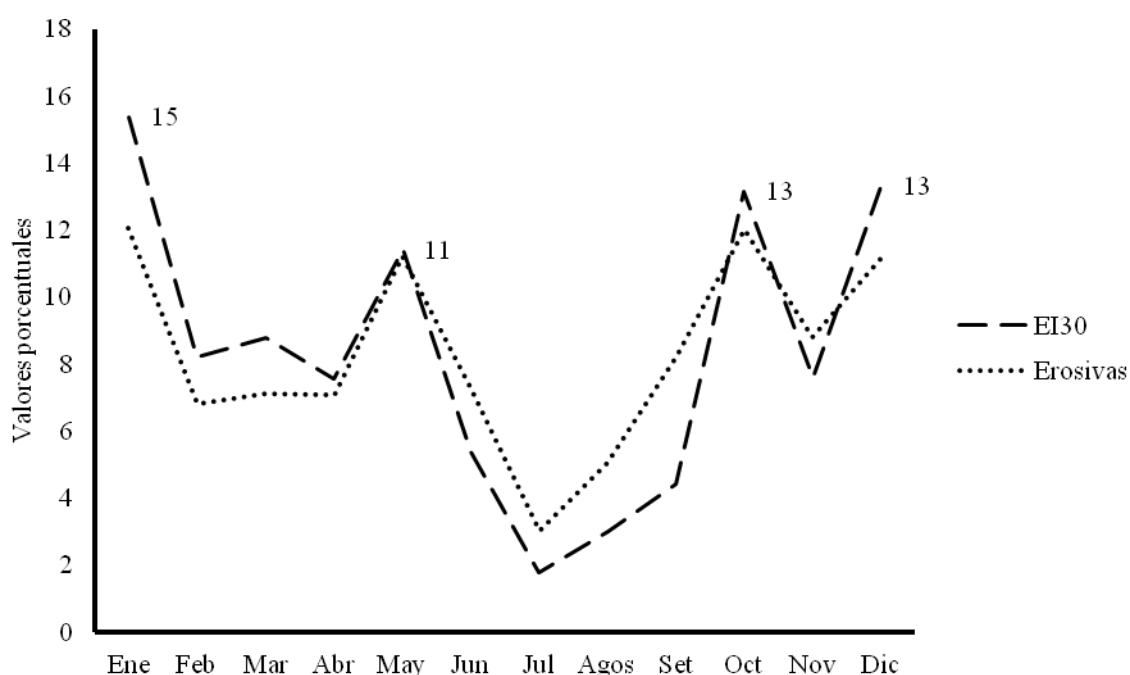


Figura 6. Distribución porcentual del índice EI₃₀ en relación a la precipitación mensual media acumulada de lluvias erosivas en un periodo de 19 años.

A través de los valores medios mensuales del índice de erosividad EI₃₀, relacionado con el valor medio anual, fue obtenida la distribución porcentual del índice para cada mes, lo que permitió la distribución estacional (Figura 7), las estaciones de verano, otoño y primavera son las que presentan un mayor porcentaje de erosividad con 37, 28 y 25 %, respectivamente. El invierno representa el 10 % de riesgo de erosividad.

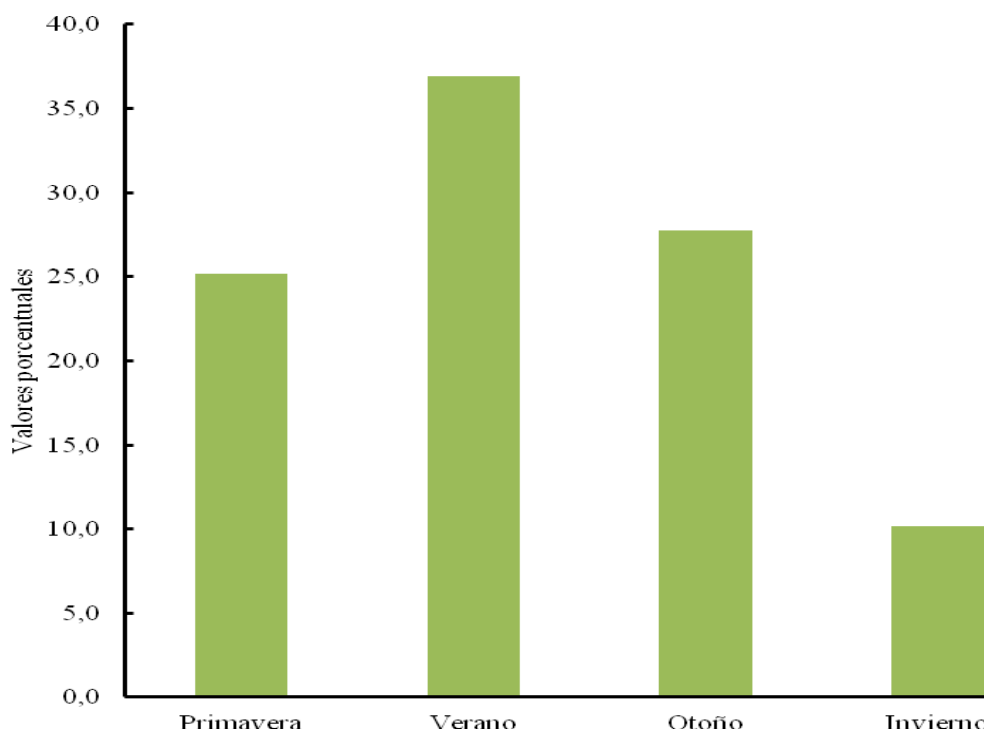


Figura 7. Distribución estacional del índice de erosividad EI_{30} para el Departamento Alto Paraná, en un periodo de 19 años.

La distribución de los índices de erosividad en relación a la distribución de los fenómenos climáticos de El Niño y La Niña tiene una baja correspondencia, de acuerdo con los registros de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos de América (NOAA 2012). Los años del Niño en el Paraguay considerando el periodo de evaluación de este trabajo fueron 1969, 1970, 1972, 1973, 1976 – 1978 y, 2002 - 2006, estos corresponden los que presentan mayor número de precipitaciones, sin embargo los años 1970, 1976 – 1978, 2003 y 2004 fueron los que presentan un menor índice de erosividad de la lluvia.

Los años de la Niña para nuestro país constituyen 1970 – 1976, 2000 y 2001 teniendo en cuenta el periodo de estudio, los años 1970 y 1976 corresponden a éste fenómeno cuya principal característica es la disminución de las precipitaciones, no así los años 1971 -1975 y 2000.

4.4 Índice de erosividad de la lluvia KE>25

En la Tabla 9 están representados los valores medios mensuales y anuales del índice de erosividad KE>25 en el Departamento de Alto Paraná, para un periodo de 19 años, cabe destacar que los espacios sin datos en la tabla corresponden a los meses en los cuales no se registraron eventos, esto considerando los registros pluviográficos disponibles para el estudio, sin embargo, esto no significa que no hubieron precipitaciones en esos meses.

El valor medio anual del índice KE>25 para el Departamento de Alto Paraná fue de 126,8 MJ ha⁻¹ año⁻¹, con un coeficiente de variación igual a 31,7 %. Durante el periodo de estudio, los valores variaron de 206,7 MJ ha⁻¹ año⁻¹ a 55,7 MJ ha⁻¹ año⁻¹ para los años 1978 y 1971, respectivamente.

Tabla 9. Valores del índice de erosividad KE>25 mensual, anual, medias mensuales y anuales, según metodología propuesta por Hudson (1997)

Año	Índice de erosividad de la lluvia KE>25 (MJ ha ⁻¹)												Total
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
1969	27,1	28,6	7,5	1,2	30,3	9,5	--	0,0	1,2	4,3	15,7	11,2	136,7
1970	12,1	1,0	11,0	0,0	14,4	6,2	3,0	0,0	3,3	10,6	--	3,3	64,9
1971	34,5	10,9	36,8	10,1	4,3	1,9	6,0	0,0	90,6	5,8	0,0	5,8	206,7
1972	6,2	5,1	7,8	11,3	0,0	5,2	2,8	9,9	27,9	10,7	31,7	1,2	119,7
1973	27,2	12,2	10,7	3,8	29,2	7,1	0,0	1,0	2,7	5,3	5,2	3,9	108,3
1974	54,4	11,6	1,0	0,0	5,2	11,4	0,0	9,4	3,1	10,0	2,5	7,9	116,4
1975	16,0	5,4	24,5	30,0	0,0	6,3	3,3	0,0	0,9	20,6	3,7	22,5	133,3
1976	0,0	--	13,2	1,2	4,7	--	3,3	9,1	0,0	14,1	19,6	20,8	86,0
1977	14,6	--	--	--	5,8	0,0	2,4	0,0	0,7	5,1	21,5	13,8	64,0
1978	6,5	--	4,9	--	2,8	2,1	8,7	1,2	2,7	8,9	9,9	8,0	55,7
1979	6,8	20,4	--	12,9	17,9	0,0	0,0	13,6	6,0	21,6	1,8	50,6	151,6
1980	8,3	13,2	21,7	4,0	8,5	3,7	3,2	6,5	0,0	8,0	--	--	77,0
2000	36,4	35,7	0,0	3,8	7,5	15,8	--	0,7	9,9	30,0	7,8	31,4	179,1
2001	32,0	18,5	3,5	18,6	--	6,0	0,0	6,0	2,9	10,1	9,9	14,3	121,8
2002	38,8	2,1	--	--	43,2	--	--	--	12,3	9,9	5,4	37,9	149,7
2003	8,0	11,9	5,4	0,0	3,4	3,1	0,0	0,0	2,1	23,5	2,2	25,2	84,8
2004	3,3	3,3	2,9	15,0	13,5	3,7	--	2,4	--	41,1	4,5	12,5	102,3
2005	27,3	0,0	--	5,5	41,2	13,2	6,8	--	1,7	27,8	7,9	0,0	131,5
2006	--	3,6	16,1	11,2	--	1,6	--	--	0,0	20,1	12,7	21,9	87,3
Total	359,6	183,5	166,9	128,6	232,1	96,8	39,5	59,8	168,0	287,6	161,8	292,5	2.176,7
Media	20,0	11,5	11,1	8,0	13,7	5,7	2,8	3,7	9,3	15,1	9,5	16,2	126,8
C.V. (%)	76,0	88,5	90,7	103,4	102,5	80,0	99,1	123,2	228,9	66,7	88,6	83,9	31,7

Los valores medios mensuales para el índice de erosividad $KE>25$ considerando un periodo de 19 años, en el área de estudio están representados en la Figura 8. Los meses que presentan los mayores valores para éste índice son enero, mayo, octubre y diciembre, los cuales coinciden con los meses de mayor erosividad según la metodología de Wischmeier y Smith (1958), con valores de 20,0, 13,7, 15,1 y 16,3 $MJ ha^{-1}$, respectivamente.

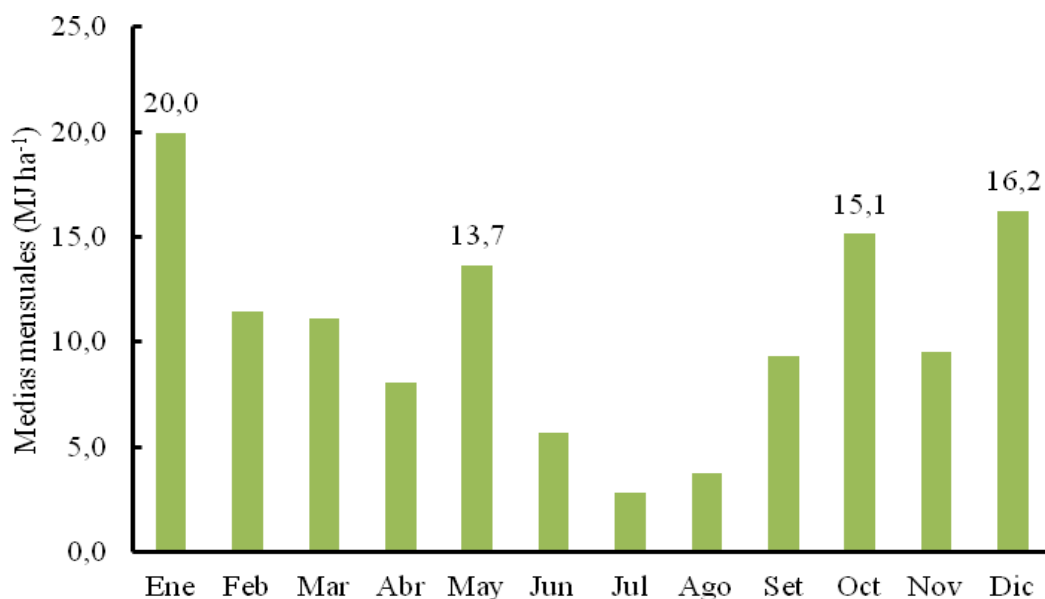


Figura 8. Distribución de valores medios mensuales del índice de erosividad $KE>25$ en Alto Paraná para un periodo de 19 años.

En la Figura 9 se presentan la distribución porcentual durante los meses del año de la precipitación acumulada y el índice de erosividad $KE>25$. Se puede observar que las distribuciones tienen las mismas tendencias, esto se da cuando las precipitaciones son elevadas y los índices también son elevados. En los meses de junio, julio y agosto se observa una predominancia de la precipitación, sobre el índice $KE>25$, lo que indica la ocurrencia de lluvias de baja intensidad, mientras que en los meses de enero y diciembre ocurre a la inversa, en los cuales las lluvias son de mayor intensidad.

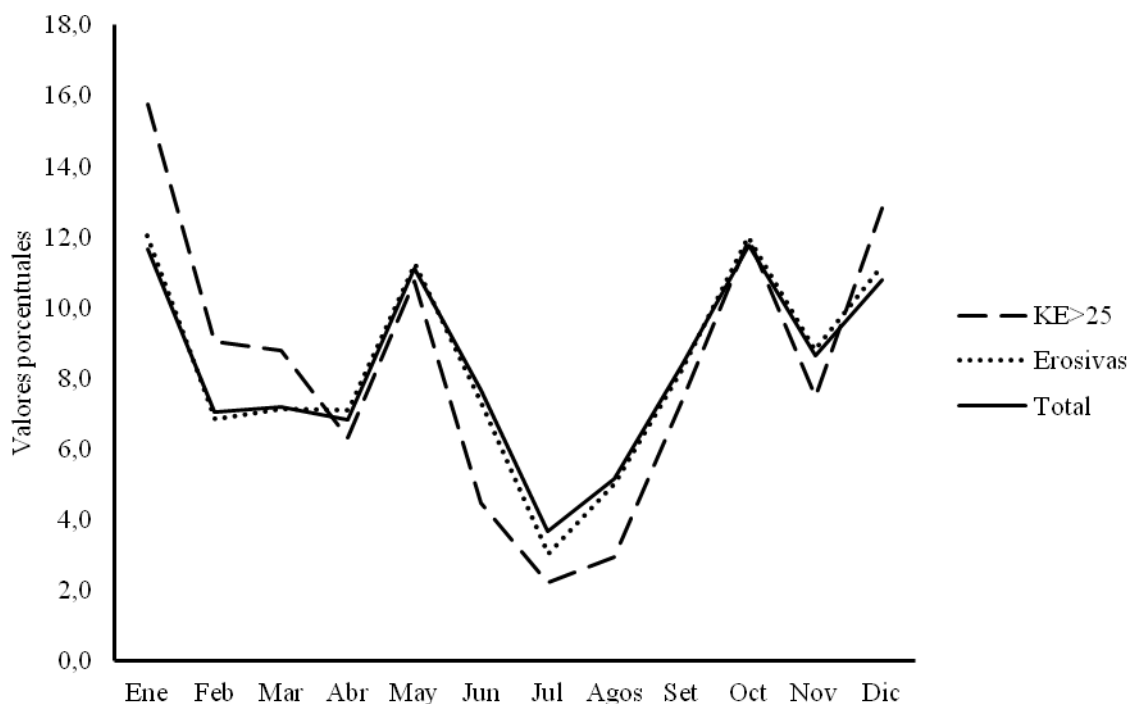


Figura 9. Distribución porcentual del índice de erosividad $KE>25$, lluvias erosivas y totales acumuladas en el periodo 1969-1980 y 2000-2006, en el Departamento Ato Paraná.

4.5 Distribución del tiempo de retorno y probabilidad de ocurrencia de la erosividad de la lluvia EI_{30} y $KE>25$

La distribución del tiempo de retorno y la probabilidad de ocurrencia de los valores medios anuales de los índices de erosividad calculados para un periodo de 19 años en el Departamento de Alto Paraná, están representadas en la Tabla 10.

Puede observarse que los índices EI_{30} y $KE>25$ medio anuales tienen una probabilidad de alrededor de 57,4 y 37,5% de ocurrir, por lo menos una vez cada 1,7 y 2,7 años. El conocimiento de la distribución teórica de la probabilidad de ocurrencia de los índices tiene importancia práctica, puesto que las recomendaciones para el control de la erosión pueden estar basadas en los niveles de mayor de probabilidad.

Tabla 10. Frecuencia y probabilidad de ocurrencia de los índices de erosividad EI_{30} y $KE>25$ anuales en un periodo de 19 años en Alto Paraná.

$EI_{30}(MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1})$		$KE>25(MJ\ ha^{-1})$		Número de orden	Tiempo de retorno (año) T	Probabilidad (%)
Año	Valor anual	Año	Valor anual			
2000	12.317,8	1.971	206,7	1	20,00	5,00
1979	11.003,5	2.000	179,1	2	10,00	10,00
1969	9.819,9	1.979	151,6	3	6,67	14,99
1971	9.327,6	2.002	149,7	4	5,00	20,00
1975	9.223,2	1.969	136,7	5	4,00	25,00
2002	8.980,7	1.975	133,3	6	3,33	30,03
1973	8.841,3	2.005	131,5	7	2,86	34,97
1974	8.758,6	2.001	121,8	8	2,50	40,00
2006	8.727,9	1.972	119,7	9	2,22	45,05
2005	8.378,8	1.974	116,5	10	2,00	50,00
1972	8.163,1	1.973	108,6	11	1,82	54,95
2001	6.518,6	2.004	102,3	12	1,67	59,88
2004	5.865,3	2.006	87,3	13	1,54	64,94
2003	5.862,8	1.976	86,0	14	1,43	69,93
1976	5.425,3	2.003	84,8	15	1,33	75,19
1970	4.509,8	1.980	76,9	16	1,25	80,00
1980	4.367,4	1.970	64,9	17	1,18	84,75
1977	3.530,9	1.977	64,0	18	1,11	90,09
1978	3.352,6	1.978	55,7	19	1,05	95,24

En las Figuras 10 y 11 se presentan las probabilidades mensuales de ocurrencia de los índices EI_{30} y $KE>25$, en los niveles de 5,0, 30,0 y 45,1% para EI_{30} y 5,0, 35,0 y 69,9% para el índice $KE>25$. Los valores fueron extraídos de las tablas de probabilidad mensual presentadas en los anexos 7A y 8A.

Las curvas de 5,0% de probabilidad indican que los valores mensuales máximos observados pueden ocurrir, o sobrepasar por lo menos una vez cada 20 años. Por lo tanto, podrían darse grandes pérdidas de suelo en estas condiciones, en caso de que el suelo no estuviera protegido.

En relación a los índices de erosividad EI_{30} medios mensuales (Figura 10), los meses de febrero y marzo se muestran superiores, esto es debido a que en estos meses los valores de los índices fueron mayores sin embargo considerando las medias anuales los índices fueron menores. Con respecto al índice de erosividad

KE>25 (Figura 11), el mes de setiembre presenta el mayor índice de erosividad mensual.

En ambas figuras se observa también la amplitud entre los valores, en los meses donde los índices fueron elevados, se presenta una desuniformidad en la distribución de la erosividad durante el año.

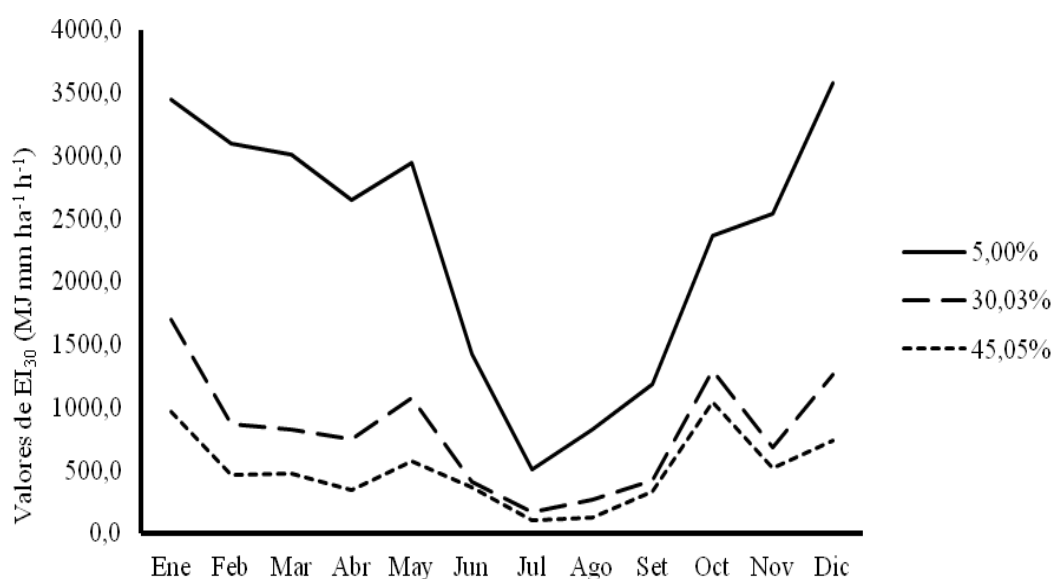


Figura 10. Probabilidad mensual de ocurrencia del índice EI₃₀ en el Departamento de Alto Paraná

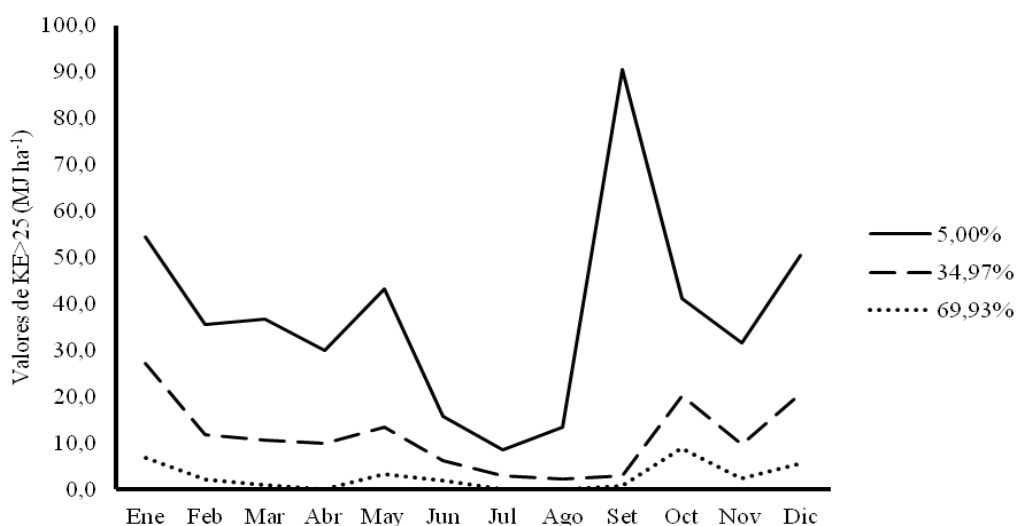


Figura 11. Distribución de la probabilidad mensual de ocurrencia del índice KE>25.

En la Figura 12 se presenta la relación entre los índices de erosividad medios mensuales (EI_{30} y $KE>25$), observándose una ecuación lineal, con un elevado R^2 , esto sugiere que el comportamiento de éstos índices está estrechamente relacionado.

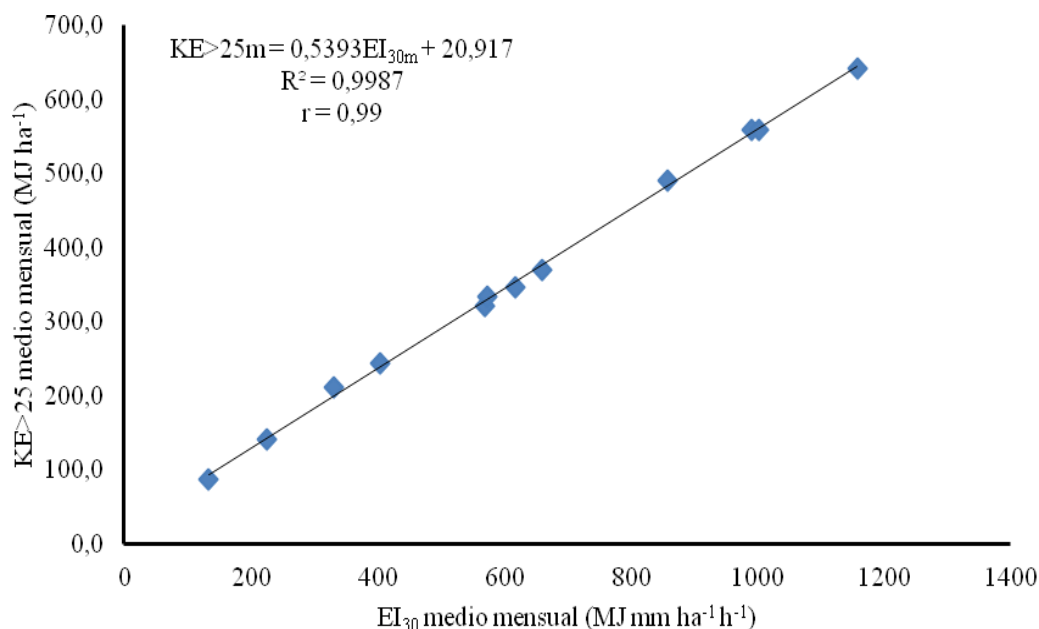


Figura12. Regresión entre los índices de erosividad $KE>25$ medio mensual ($KE>25m$) y EI_{30} medio mensual (EI_{30m}).

4.6 Evaluación de la erosividad de la lluvia por medio de datos pluviométricos

Las ecuaciones obtenidas a través de regresiones lineales simples entre el coeficiente de la lluvia y los índices medios mensuales EI_{30} (EI_{30m}) y $KE>25$ ($KE>25m$) se presentan en las Figuras 13 y 14, para el departamento de Alto Paraná. También, para las mismas variables son presentadas los coeficientes de determinación

En las Figuras se puede observar que las ecuaciones de regresión lineal entre las variables siguen un modelo $y = a + bx$, con un coeficiente de regresión lineal igual a 0,58 (significativo al nivel de 1%).

Los coeficientes de regresión y de correlación son más elevados cuando el coeficiente de distribución de la lluvia relacionado con el índice $KE>25$ medio

mensual, que cuando relacionado con el índice EI_{30} medio mensual. Estos resultados indican que existe más estrecha relación para con el índice de erosividad $KE>25$.

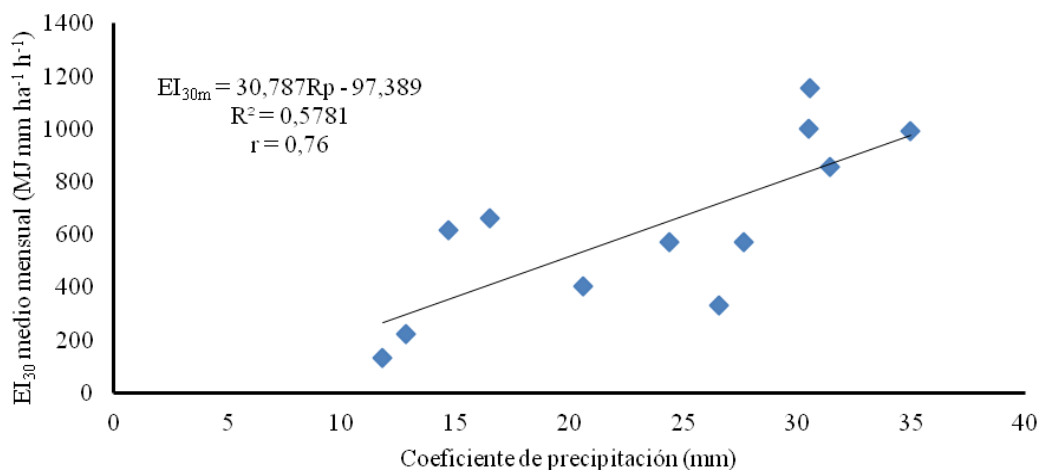


Figura 13. Regresión entre el índice EI_{30} medio mensual (EI_{30m}) y el coeficiente de precipitación (R_p).

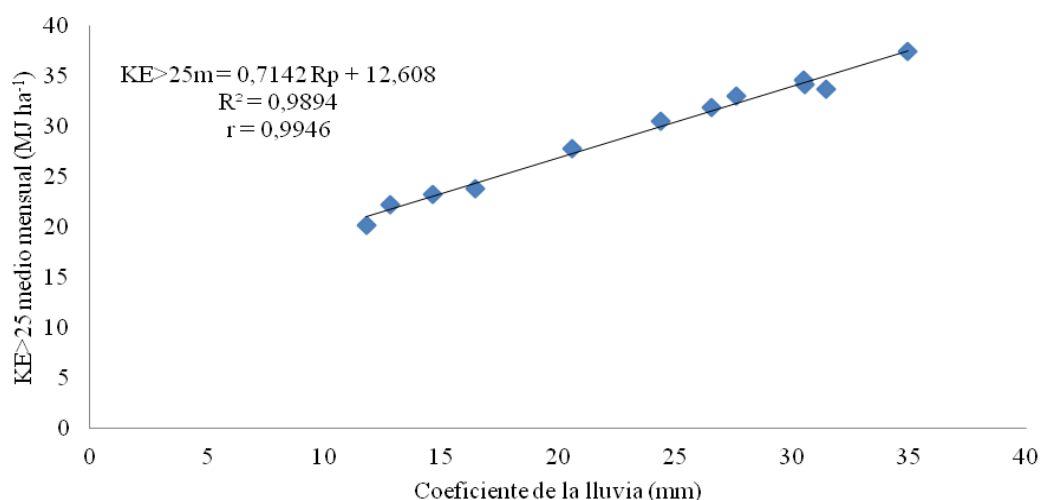


Figura 14. Regresión entre el índice $KE>25$ medio mensual ($KE>25m$) y el coeficiente de precipitación (R_p)

Las regresiones y los coeficientes de correlación entre los índices medios mensuales EI_{30} y $KE>25$ y la precipitación media mensual están presentadas en las Figuras 15 y 16. Los datos para ambas relaciones tuvieron un mejor ajuste a ecuación potencial (las demás ecuaciones dieron valores muy bajos), obteniéndose coeficientes de regresión R^2 superior a 0,8. La ecuaciones obtenidas fueron:

$$EI_{30m} = 0,2814Pm^{1,6917}$$

$$R^2 = 0,8262$$

$$r = 0,9089$$

$$KE>25m = 2,6554Pm^{0,5349}$$

$$R^2 = 0,8209$$

$$r = 0,9094$$

Por otro lado, la correlación entre la precipitación media mensual y los coeficientes de erosividad de la lluvia fueron elevados, superando 0,9. González (1986) para Ciudad del Este, había encontrado una baja correlación entre éstos índices y la precipitación media mensual.

De acuerdo con las ecuaciones obtenidas entre las relaciones de los índices de erosividad medios obtenidos por pluviografía (EI_{30} y $KE>25$) y el coeficiente de la precipitación es posible determinar los índices de las diferentes estaciones con registros pluviométricos ubicados en el Departamento, puesto que los coeficientes de regresión y de correlación entre las variables utilizadas fueron elevados.

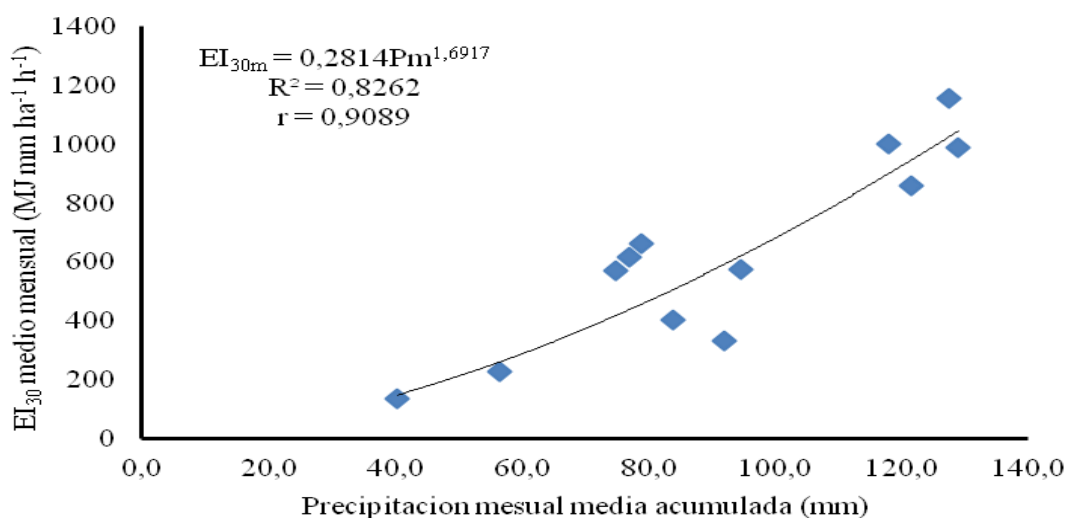


Figura 15. Regresión entre el índice EI_{30} medio mensual (EI_{30m}) y la precipitación media mensual (Pm).

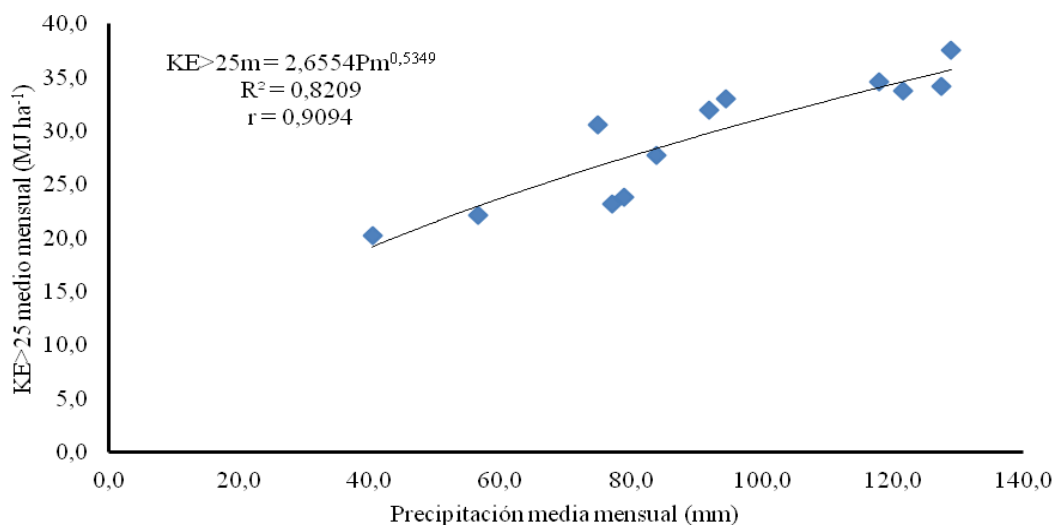


Figura 16. Regresión entre el índice KE>25 medio mensual (KE>25m) y la precipitación media mensual (Pm).

De acuerdo con la metodología propuesta por Fournier (1975), el riesgo de erosión hídrica en el Departamento de Alto Paraná es moderado, los valores fueron obtenidos para las estaciones meteorológicas de San Alberto, Hernandarias y Minga Guazú, teniendo en cuenta los años de estudio y los registros históricos de las mismas. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Sanchez (2004), el mismo autor menciona que el Departamento de Alto Paraná tiene un riesgo de erosión hídrica moderado en 86,1 % del total de sus superficie, correspondiente a tierras con limitaciones que requieren inversion en practicas conservacionistas.

En la Tabla 11, se representan los valores mensuales y anuales de las precipitaciones acumuladas registradas en la estación perteneciente a la Dirección de Meteorología e Hidrología, así como los valores del índice de erosividad de la lluvia de Fournier en el periodo 1969 – 1980 y 2000 – 2006. A partir de los 19 años evaluados se presenta una media igual a 51,6 con un coeficiente de variación de 49,4 %, el mayor índice se erosividad se dió en el 2005 alcanzando 110,5 mientras que el menor sucedió en 1978, donde la erosividad de la lluvia alcanzó 19,5.

Los índices de erosividad de la lluvia para los datos de las estaciones ubicadas en los Distritos de Hernandarias y San Alberto pertenecientes a la Itaipú Binacional están presentadas en las Tablas 12 y 13. Los mismos fueron calculados para los años

1979, 1980, 2000 – 2006 para la estación ubicada en Hernandarias y los años 2000 al 2006 para la estación instalada en San Alberto, los mismos presentan una media de 70,4 y 67,1 con un coeficiente de variación igual a 24,2 y 32,3 %, respectivamente.

Tabla 11. Erosividad de la lluvia para el índice de Fournier, estación perteneciente a la Dirección de Meteorología e Hidrología (DINAC).

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total	Índice de Fournier
	mm													
1.969	228,6	139,3	161,7	108,6	304,9	137,2	3,0	18,9	164,1	84,0	120,1	96,2	1566,6	59,3
1.970	62,7	39,3	87,4	27,5	32,3	81,7	80,5	31,2	158,2	166,0	0,0	47,9	814,7	33,8
1.971	198,2	43,4	278,8	90,1	97,6	104,1	49,7	57,0	80,9	89,9	92,6	47,1	1229,4	63,2
1.972	39,3	59,9	73,7	97,7	33,8	59,6	120,8	165,8	189,1	67,7	286,3	30,6	1224,3	67,0
1.973	183,2	130,8	85,2	140,6	170,8	134,4	61,7	46,3	70,6	140,1	62,1	32,7	1258,5	26,7
1.974	287,1	133,1	25,4	36,8	94,6	200,5	1,8	94,4	34,3	61,1	185,7	153,1	1307,9	23,1
1.975	120,8	106,4	158,7	173,8	47,2	70,1	32,4	54,3	93,6	117,6	38,9	156,0	1169,8	25,8
1.976	17,8	10,6	96,7	94,7	75,2	14,9	16,7	85,0	62,7	117,9	94,6	168,5	855,3	33,2
1.977	139,7	0,0	4,0	0,0	29,3	53,2	45,2	89,2	69,6	57,1	196,7	78,0	762,0	50,8
1.978	45,7	0,0	52,0	0,0	28,7	107,6	84,2	38,8	41,6	110,8	40,1	79,2	628,7	19,5
1.979	32,6	115,9	0,3	179,7	204,8	15,2	28,2	98,6	144,8	153,0	129,9	289,0	1392,0	60,0
1.980	89,1	84,1	104,9	41,2	131,1	19,6	30,1	72,4	96,4	94,9	0,0	0,0	763,8	22,5
2.000	309,2	231,4	18,6	36,5	133,9	198,9	2,2	52,2	117,2	178,6	103,5	186,7	1568,9	60,9
2.001	187,6	83,3	40,5	132,6	4,8	90,9	34,4	66,4	86,5	57,0	134,5	101,7	1020,2	34,5
2.002	208,0	39,7	16,0	8,6	346,7	46,0	35,0	13,7	86,0	138,2	62,1	225,6	1225,6	98,1
2.003	72,5	124,6	38,9	14,6	18,1	68,1	42,6	35,2	99,1	172,4	47,8	268,8	1002,7	72,1
2.004	37,9	40,2	23,6	92,7	189,6	46,0	41,0	19,1	11,0	231,6	96,9	62,4	892,0	60,1
2.005	132,2	34,7	3,0	67,8	365,8	115,1	49,5	13,5	134,4	215,6	32,6	46,5	1210,7	110,5
2.006	30,5	47,7	229,2	77,7	0,0	29,7	7,4	21,2	6,0	196,8	71,3	171,4	888,9	59,1
Media	127,5	77,1	78,9	74,8	121,5	83,8	40,3	56,5	91,9	129,0	94,5	118,0	1093,8	51,6
C.V. (%)	71,3	76,8	99,9	75,0	94,8	66,3	76,2	68,1	55,1	42,1	75,5	71,3	25,0	49,4

Tabla 12. Erosividad de la lluvia para el índice de Fournier, estación de Acuicultura, Hernandarias. Itaipú Binacional

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total	Índice de Fournier
	mm													
1979	31,3	184,4	58,6	249,7	311,1	27,7	124,3	212,8	188,0	197,8	210,3	374,0	2.170,0	64,5
1980	287,2	108,9	64,2	47,5	241,8	53,4	45,4	114,6	151,2	145,6	112,5	103,1	1.475,4	55,9
2000	460,0	242,0	32,7	125,6	171,9	229,8	74,2	141,7	116,6	202,2	188,4	277,7	2.262,8	93,5
2001	367,1	275,5	191,2	152,7	70,4	106,1	90,7	65,1	149,2	89,8	206,7	145,2	1.909,7	70,6
2002	326,6	96,7	94,4	19,6	431,9	56,7	64,6	81,4	178,2	145,5	400,5	202,8	2.098,9	88,9
2003	125,7	221,6	62,6	221,9	42,9	60,8	45,3	46,3	193,8	267,1	120,4	363,8	1.772,2	74,7
2004	75,3	33,5	34,4	140,1	250,2	85,4	145,9	27,3	44,4	229,2	201,1	38,9	1.305,7	47,9
2005	195,2	12,8	7,6	143,3	407,1	217,4	88,0	57,3	197,7	350,7	70,8	152,3	1.900,2	87,2
2006	305,0	152,2	205,4	74,8	1,2	78,1	26,7	110,8	243,4	221,1	154,8	270,3	1.843,8	50,5
Media	241,5	147,5	83,5	130,6	214,3	101,7	78,3	95,3	162,5	205,4	185,1	214,2	1.859,9	70,4
C.V. (%)	59,3	62,2	83,4	57,8	72,5	71,4	49,4	60,0	35,1	37,0	51,0	54,0	16,8	24,2

Tabla 13. Erosividad de la lluvia para el índice de Fournier, estación San Alberto, Itaipú Binacional

Año	Ene	Febr	Mar	Abr.	May	Jun.	Jul.	Ag.	Set	Oct.	Nov	Dic	Total	Índice de Fournier
	mm													
2000	290,7	202,2	85,9	51,1	141,8	241,4	91,6	119,5	144,7	216,1	200,1	171,5	1.956,6	43,2
2001	182,7	312,4	326,9	113,4	103,1	102,6	50,3	66,6	205,6	131,4	284,6	150,6	2.030,2	52,6
2002	165,9	92,5	56,5	28,9	393,8	34,8	57,7	55,5	186,2	124,6	412,0	61,4	1.669,8	101,7
2003	159,7	182,9	70,0	131,9	137,1	48,2	100,7	36,7	149,3	231,3	155,5	372,1	1.775,4	78,0
2004	131,6	36,1	100,3	190,5	326,1	143,5	125,3	6,0	51,4	236,2	264,8	127,8	1.739,6	61,1
2005	172,7	14,6	161,0	102,8	237,4	245,9	38,8	94,0	209,3	393,8	70,3	78,4	1.819,0	85,3
2006	227,5	171,2	280,2	79,3	4,3	142,2	36,8	117,7	200,6	88,6	189,7	98,8	1.636,9	48,0
Media	190,1	144,6	154,4	99,7	191,9	136,9	71,6	70,9	163,9	203,1	225,3	151,5	1.803,9	67,1
C.V. (%)	27,8	72,0	69,9	53,8	70,4	61,3	47,9	59,7	34,2	50,4	48,2	69,2	8,0	32,3

4.7 Pérdida de suelo

El coeficiente de correlación entre los diferentes índices obtenidos en este trabajo y las pérdidas de suelo obtenidas por Ortiz (1996), en un estudio donde se midieron sedimentos en parcelas pilotos para dos condiciones de sistemas de manejo del suelo (sistema convencional y siembra directa) se presentan en las Figuras 17, 18 y 19 para sistema de manejo convencional (SC) y en las Figuras 20, 21 y 22 para el sistema de siembra directa (SD). Las regresiones de los sedimentos de suelo y los coeficientes de precipitación calculados para las estaciones de San Alberto y Acuicultura tuvieron el mismo comportamiento en ambas condiciones de manejo del suelo (9A, 10A, 11A y 12A).

En las figuras se puede apreciar que los coeficientes de correlación poco o nada explican los resultados obtenidos por Ortiz (1.996), donde los valores de R^2 son muy bajos para los dos sistemas de manejo. Esto podría deberse a que otros factores como la pendiente, la textura y estructura de los suelos de las parcelas piloto influyeron en estas pérdidas.

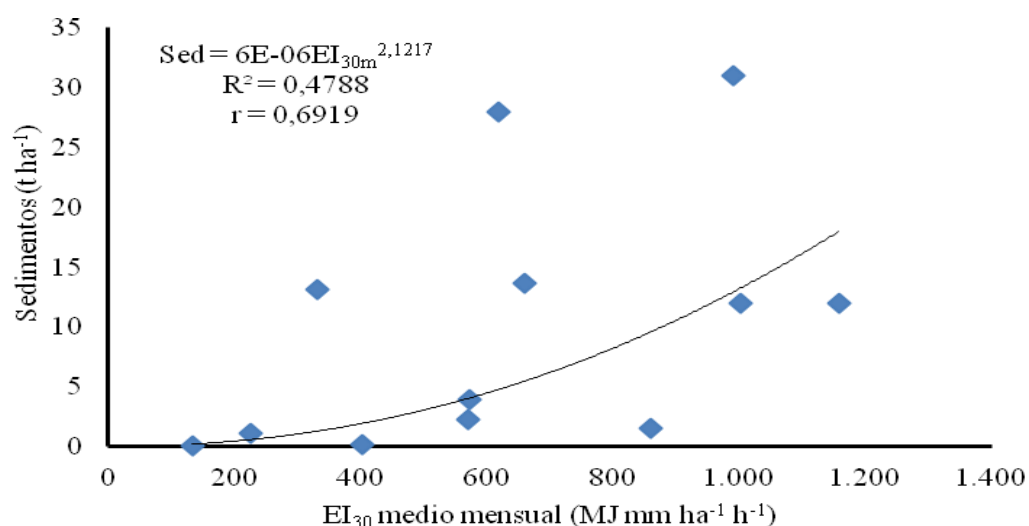


Figura 17. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en sistema convencional y el índice EI_{30} medio mensual (EI_{30m}).

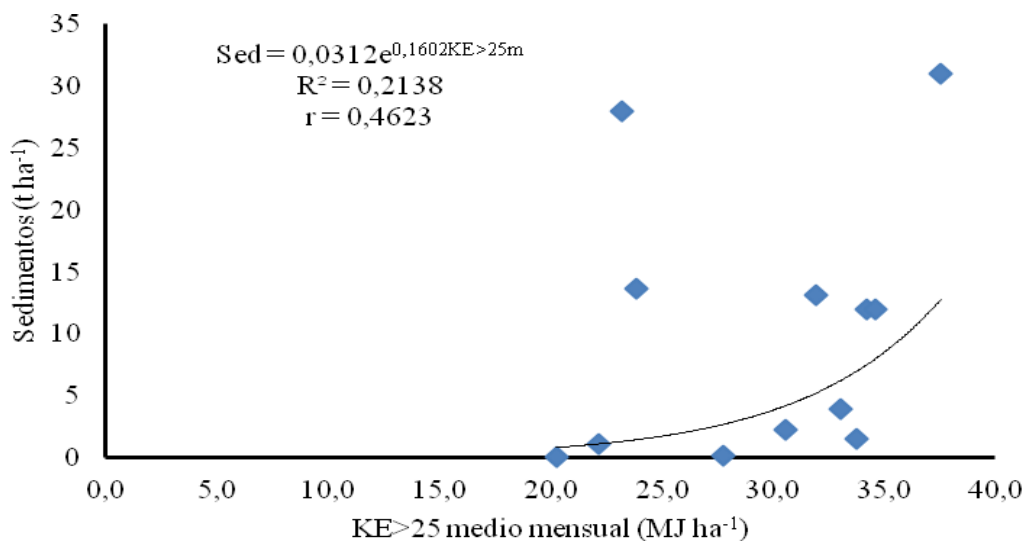


Figura 18. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en sistema convencional y el índice KE>25 medio mensual (KE>25m).

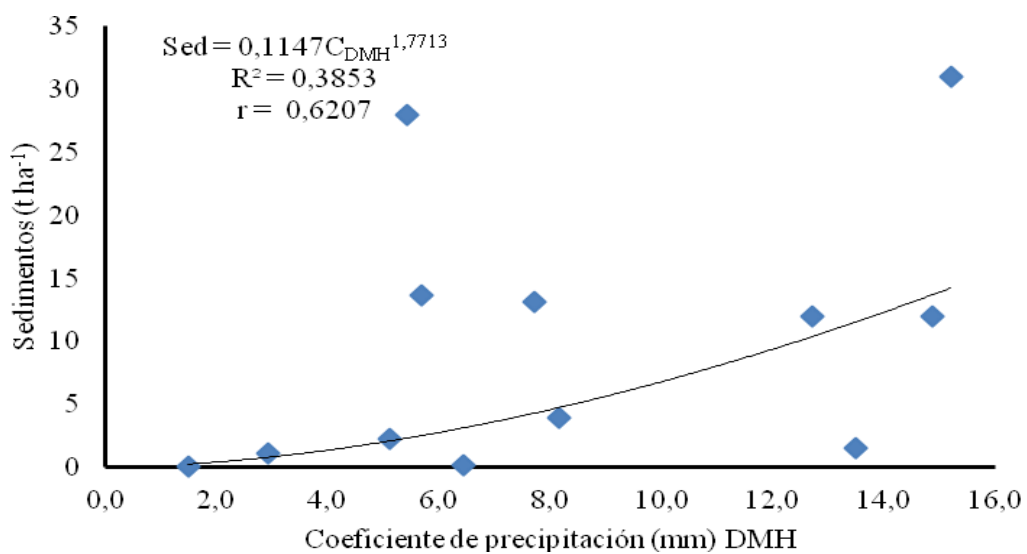


Figura 19. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en sistema convencional y el coeficiente de precipitación calculado con datos de la estación de Dirección de Meteorología e Hidrología (C_{DMH}) (DINAC).

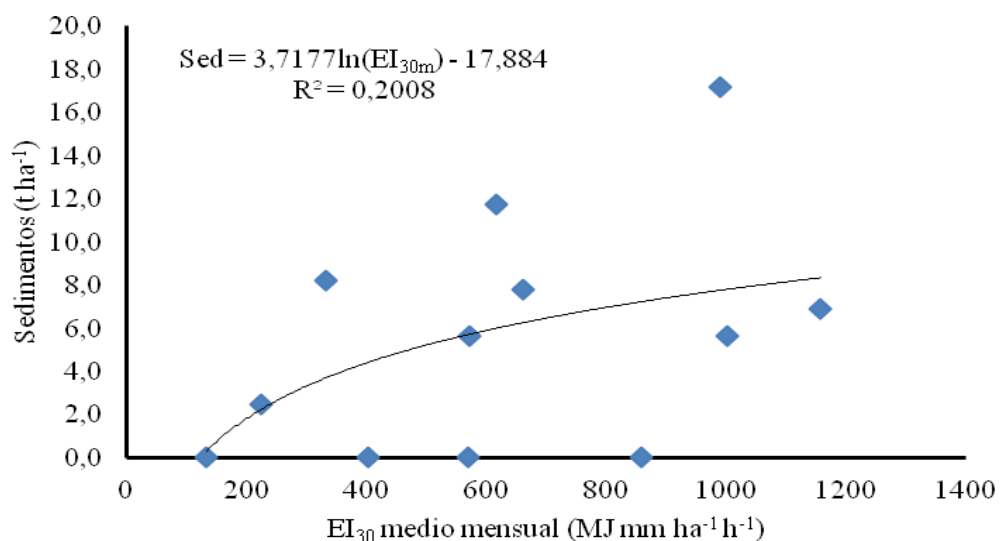


Figura 20. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en el sistema de siembra directa y el índice EI_{30} medio mensual (EI_{30m}).

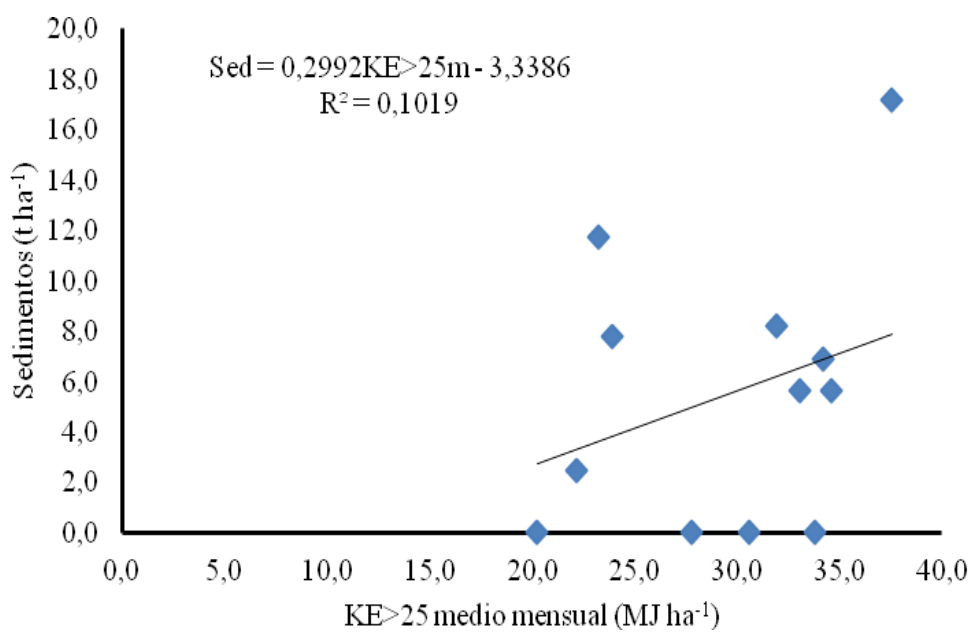


Figura 21. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en el sistema de siembra directa y el índice $KE>25$ medio mensual ($KE>25m$).

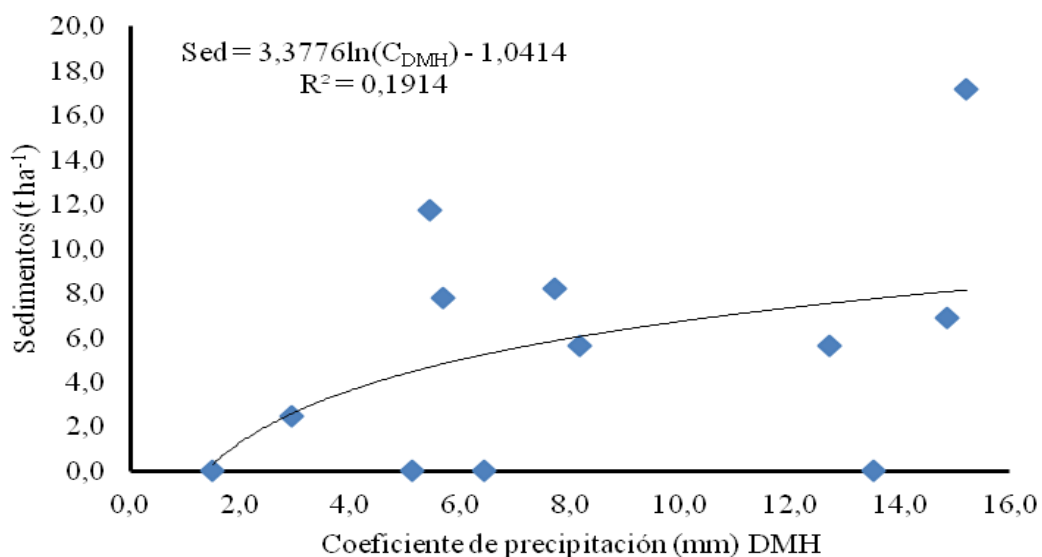


Figura 22. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en el sistema de siembra directa y el coeficiente de precipitación calculado con datos de la estación de Dirección de Meteorología e Hidrología (CDMH) (DINAC).

En las Figuras 23 y 24 se observa la relación entre los sedimentos y el coeficiente de precipitación para el año en que se midió la sedimentación (1996) en las condiciones de manejo de suelo. El comportamiento de la línea de tendencia para el sistema de manejo convencional obedece a un modelo lineal, mientras que la curva entre los sedimentos del sistema de siembra directa en relación al coeficiente de precipitación sigue una tendencia logarítmica, esto se debe a que son las que mejor explican la asociación entre estas dos variables en cada sistema de manejo de suelo, con un R^2 superior a 0,5. Teniendo así la ecuación, podría reemplazarse esta en las que asocian la erosividad de la lluvia con estos parámetros para determinar el factor R.

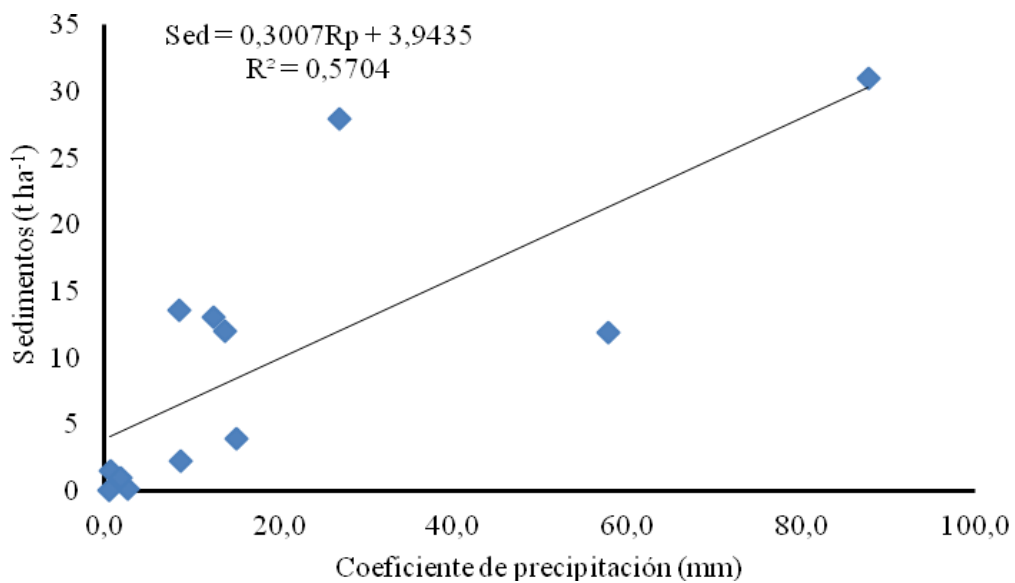


Figura 23. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en el sistema convencional y el coeficiente de precipitación calculado para el año 1996 con datos de la estación de San Alberto, perteneciente a Itaipú Binacional.

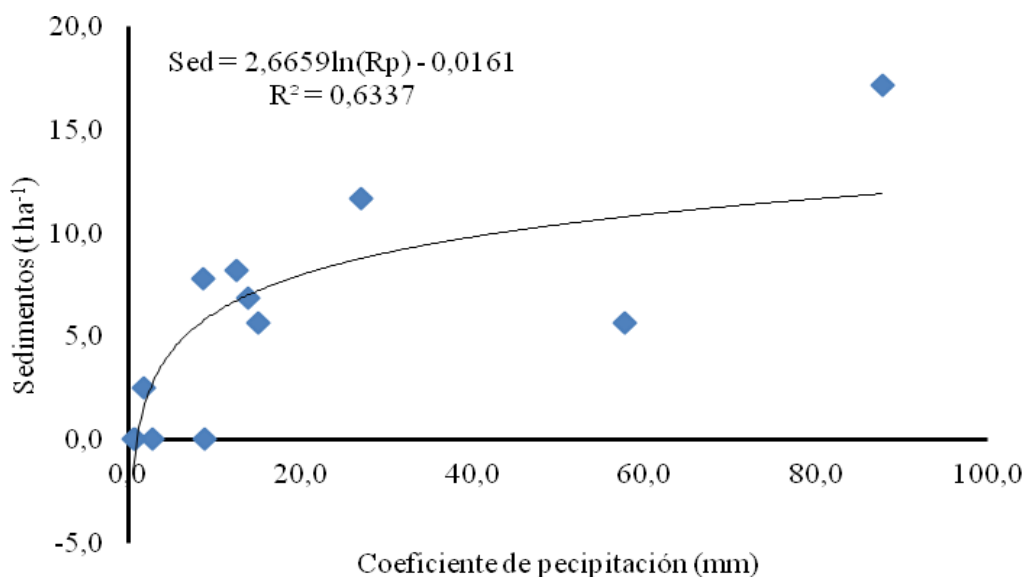


Figura 24. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en el sistema de siembra directa y el coeficiente de precipitación calculado para el año 1996 con datos de la estación de San Alberto, perteneciente a Itaipú Binacional.

5. CONCLUSIONES

En las condiciones del presente trabajo, los resultados obtenidos y discutidos permitieron llegar a las siguientes conclusiones.

El factor de erosividad de la lluvia (R) de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) obtenido para el Departamento de Alto Paraná es elevado alcanzando una media de $7.525 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ mediante el índice EI_{30} , mientras que siguiendo la metodología sugerida por Hudson (1997) el índice $KE>25$ es de $126,8 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para un periodo de 19 años.

Los meses que presentan las mayores intensidades medias anuales en 30 minutos para el periodo de estudio en el Departamento de Alto Paraná son enero, marzo, octubre y diciembre con valores de 47,9, 41,7, 46,2 y $44,1 \text{ mm h}^{-1}$ respectivamente. La intensidad mensual máxima en 30 minutos alcanza $88,8 \text{ mm h}^{-1}$.

Los meses de enero, mayo, octubre y diciembre son los meses en los cuales se dan los valores más elevados de erosividad media mensual tanto en el índice EI_{30} como para el índice $KE>25$, siendo 53,3 % y 51,3% respectivamente los valores medios anuales. Estos presentan los valores más significativos de erosividad y constituyen los meses en los que se podrían producir las máximas pérdidas de suelos en caso de que no se aplique ninguna práctica conservacionista.

El periodo estacional más erosivo corresponde a la primavera-verano, coincidiendo este con el periodo de mayor precipitación. Aunque es posible la ocurrencia de lluvias individuales con gran capacidad erosiva en las estaciones con menor índice de erosividad.

La probabilidad de ocurrencia de la mayor parte de las lluvias altamente erosivas coincide con la época de preparación de los suelos, la siembra y desarrollo de la mayoría de los cultivos anuales en el Departamento.

Se observa un elevado coeficiente de correlación para las regresiones entre los índices medios mensuales (EI_{30m} y $KE>25m$) y el coeficiente de la precipitación. Las ecuaciones obtenidas pueden ser utilizadas para el cálculo de los valores medios mensuales de los índices de erosividad para lugares que posean condiciones pluviales similares al área de estudio, utilizando datos pluviométricos para estimar el factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos.

Se observa que no existe correlación entre los índices medios mensuales (EI_{30m} y $KE>25m$), los coeficientes de precipitación para los datos de las tres estaciones con registros históricos y las pérdidas de suelo tanto en el sistema convencional como en el sistema de siembra directa, evaluadas por Ortiz (1.996) son muy bajas, estas pérdidas estarían influenciadas por otros factores del suelo.

6. REFERENCIAS

Atayde Boarett W.; Souza C. M.; Wruck F. J. 1997. Índice da Erosividade das chuvas para Viscosa/MG. Revista Ceres (Brasil).

Bertoni J.; Lombardi Neto, F. 1990. Conservação do Solo. 3ra. Edição. São Paulo, Brasil.

Cardoso Machado, C.; Reis García A.; Silva E.; Machado Fontes A. 2002. Comparação de Taxas de Erosão em estradas florestais estimadas pelo modelo WEPP, modificado em relação a medições experimentais. Revista Arvore. Brasil.

Coraspe H.M. 2004. Conservación de los suelos agrícolas en las zonas altas del Estado de Trujillo (en línea). Trujillo, VE. Consultado 28 de diciembre de 2009. Disponible en: www.ceniap.gov.ve/publica/divulga/fdivul.htm

Cuadrat, J. M.; M. F. Pita. 1997. Climatología. Ediciones Cátedra S.A. Madrid, España. 496p.

Cuevas, L. Rolón, A. 2010. Actualización de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de Precipitación en el Paraguay. Tesis (Ing. Civil). San Lorenzo, PY:FI, UNA. 283p.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT) 1967. La Erosión del Suelo por el Agua: Algunas medidas para combatir las en tierras de cultivo. Roma. 207p. (Colección FAO: Fomento de tierras y aguas; N° 7/ FAO: Cuadernos de Fomento Agropecuario, N° 81).

Fournier F. 1975. Conservación de Suelos. Versión Española de J.A. Medina. San Juan. Madrid, ES: Mundi-Prensa. 254p.

Grassi B.; Pastén A.; Armoa J. 2001. Mapa de Distribución de Lluvias en Paraguay: Normales Climatológicas 1961-1990. San Lorenzo, PY:UNA/FP/DINAC. Sin escala. Color.

González F., J. C. 1986. Erosividade da chuva. Distribuição e relações com a precipitação em Porto Presidente Stroessner e Villarrica – Paraguai. Tesis (M. Sc.). Piracicaba (SP), Basil. 83p

Hudson N. W. 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía. FAO. Roma, Italia. 147p. (Publicación Científica).

INETER (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, NI). 2005. Proyecto: Metodologías para el análisis y manejo de los Riesgos Naturales. Erosión Hídrica. Mapas de Amenaza. Recomendaciones técnicas para su elaboración (en línea). Managua, NI. Consultado 31 de julio 2012. Disponible en www.ineter.gob.ni/geofisica/proyectos/metalarn/erosion.pdf

Jones C. A.; Griges R. H.; Williams J. R.; Scrinivasan R. 1994. Predicción de la Erosión Hídrica y Eólica del suelo. In: FAO. Erosión del Suelo en América Latina. Santiago, CL.: FAO. 7-20 p.

Mannaerts. 1999. Modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisado. Consultado el 02 de noviembre de 2012. Disponible en <http://www.miliarium.com/prontuario/medioambiente/suelos/Rusle.htm>

National Oceanic and Atmospheric Administration. E.E.U.U. Consultado el 30 de noviembre de 2012. Disponible en www.noaa.gov/index.html.

Oñate V., F. 2004. Metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y protección de los proyectos hidráulicos (en línea). Revista electrónica de la REDLACH. N° 1. Año 1. Disponible en: www.rlc.fao.org/es/tecnica/redlach/boletines/rev1.1.pdf

Ortiz M., L. M. 1996. Manual de manejo y conservación integrado de suelo y agua en microcuencas hidrográficas del área de influencia de la represa hidroeléctrica de la Itaipú Binacional. Hernandarias, Paraguay. 754p.

Pastén, M. 2010. Pronóstico Climático Setiembre-Octubre-Noviembre de 2010. En línea. Consultado el 29 de octubre de 2010. Disponible en http://www.agr.una.py/meteorologia/imagen_de_meteorologia/trimestre.pdf

Plaster E. J. 2000. La ciencia del suelo y su manejo. Ed. Parainfo. Madrid, España. 405 p.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO, BR. DIRECTORÍA DE RECURSOS NATURAIS. 1994. Manual de Uso, Manejo e Conservação do Solo e Da Água. 2da Ed. Rev. Atual e Amp. Florianópolis, BR: EPAGRI./200 p.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO, BR. 1994. Manual Técnico do Subprograma de Manejo e Conservação do Solo. 2da Ed. Curitiba, BR: IAPAR. 306p. (Paraná Rural. Programa do Desenvolvimento Rural do Paraná).

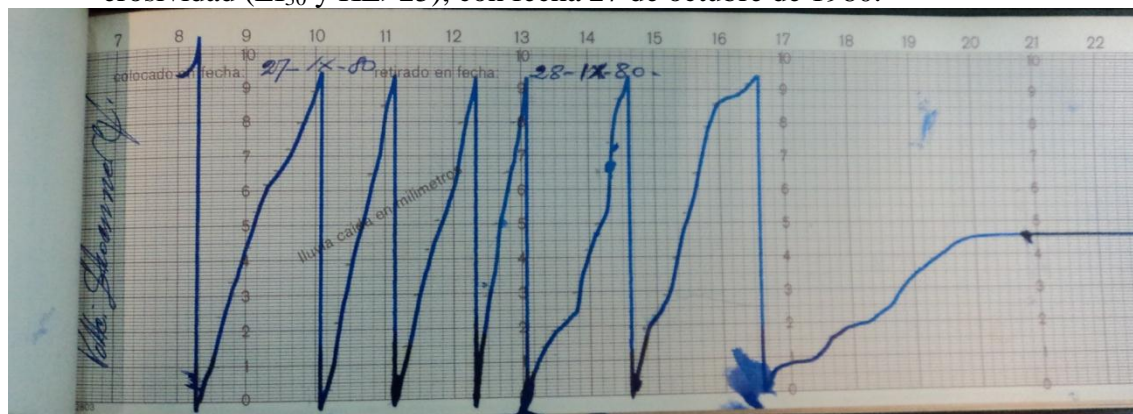
Suárez de Castro F. 1980. Conservación de los suelos. San José, CR.: IICA. 315 p. (Serie de libros y materiales educativos; N° 37).

Wischmeier W. C. 1976. Use and minuses of the Universal Soil Loss Equation. J. Soiland Water Cons. 31(1): 5-9 p

Zelege G. T. W.; D. C. FLANAGAN. 1999. BPCDG: Breakpoint Climate Data Generator for WEPP using observed climate standard weather data sets (en línea). Disponible en <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/BPCDG.html>. In: WEPP 2002.7.

7. ANEXOS

1A. Fotografía de una faja pluviográfica utilizada para el cálculo de los índices de erosividad (EI_{30} y $KE > 25$), con fecha 27 de octubre de 1980.



2A. Ejemplo de la determinación de la energía cinética de las lluvias.

Fecha	Tiempo (h:min)	Lluvia acumulada (mm)	Δt (min)	ΔP (mm)	Intensidad (mm/h)	Energía Cinética	
						por mm de lluvia ($MJ \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$) (Wischmerier & Smith, 1958)	por incremento (MJ/ha)
27/10/80	05:20	5,9	0	0,0	0,0	0,000	0,0000
	05:30	6,3	10	0,4	2,4	0,152	0,0609
	05:50	16,9	20	10,6	31,8	0,250	2,6517
	06:00	18,5	10	1,6	9,6	0,205	0,3276
	06:10	20,7	10	2,2	13,2	0,217	0,4770
	06:30	21	10	0,3	1,8	0,141	0,0424
	06:40	21,4	10	0,4	2,4	0,152	0,0609
	06:50	21,5	10	0,1	0,6	0,100	0,0100
	07:00	22,2	10	0,7	4,2	0,173	0,1214
	07:10	22,4	10	0,2	1,2	0,126	0,0252
	07:20	22,7	10	0,3	1,8	0,141	0,0424
	07:45	23,6	25	0,9	2,2	0,148	0,1334
	07:50	24,2	5	0,6	7,2	0,194	0,1163
	08:00	24,3	10	0,1	0,6	0,100	0,0100
	08:10	24,3	10	0,0	0,0	0,000	0,0000
	08:30	25,4	20	1,1	3,3	0,164	0,1807
	08:40	25,7	10	0,3	1,8	0,141	0,0424
08:55	26,7	15	1,0	4,0	0,172	0,1716	
09:00	27	5	0,3	3,6	0,168	0,0503	
09:10	28	10	1,0	6,0	0,187	0,1869	
			220	22,1	97,7		4,7109

$$I_{30} = (12,2 \text{ mm}/30 \text{ min}) \times (60 \text{ min}/1 \text{ h})$$

$$I_{30} = 24,4 \text{ mm h}^{-1}$$

$$EI_{30} = 4,7109 \text{ MJ/ha} \times 24,4 \text{ mm/h}$$

$$EI_{30} = 114,95 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$$

3A. Riesgo de erosión hídrica según erosividad de la lluvia para el índice de Fournier

Riesgo de erosión hídrica	Erosividad de la lluvia
Ligero	0 – 50
Moderado	50 – 500
Severo	500 – 1000
Muy Severo	> 1000

4A. Frecuencias mensuales, anuales y medias mensuales y anuales de lluvias erosivas, no erosivas y total observadas en el periodo 1.969 – 1.980 y 2.000 - 2.006 en Alto Paraná.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic	Total
EROSIVAS													
1969	6	4	5	3	8	4	0	1	6	2	4	4	47
1970	2	1	2	1	2	2	1	2	6	4	0	2	25
1971	6	1	6	2	3	3	2	2	2	2	2	2	33
1972	2	2	2	3	1	1	3	4	8	2	7	1	36
1973	6	3	2	4	3	5	2	1	2	3	2	1	34
1974	6	5	1	1	3	5	0	2	1	2	4	5	35
1975	3	4	5	4	1	2	1	2	2	3	1	4	32
1976	1	0	3	2	3	0	1	3	2	3	3	5	26
1977	4	0	0	0	2	1	2	3	3	1	5	3	24
1978	1	0	2	0	1	2	2	1	2	5	1	2	19
1979	1	3	0	4	5	1	1	3	4	6	3	7	38
1980	3	2	2	2	4	1	1	2	2	3	0	0	22
2000	8	5	1	1	3	6	0	2	3	3	3	4	39
2001	6	2	1	4	0	2	1	2	3	3	4	3	31
2002	4	1	0	0	7	0	0	0	2	3	1	6	24
2003	2	5	1	1	1	2	1	1	3	4	1	3	25
2004	1	1	1	3	4	2	0	1	0	5	4	2	24
2005	3	1	0	2	6	2	2	0	4	4	1	2	27
2006	0	1	4	1	0	1	0	0	0	5	3	4	19
Total	65	41	38	38	57	42	20	32	55	63	49	60	560
Media	3,4	2,2	2,0	2,0	3,0	2,2	1,1	1,7	2,9	3,3	2,6	3,2	29,5
C.V. (%)	65,9	78,5	88,9	68,8	73,3	74,2	84,3	64,0	68,1	38,0	69,3	55,6	24,7
NO EROSIVAS													
1969	0	0	0	0	1	3	2	0	2	1	2	0	11
1970	0	1	3	0	2	3	0	0	3	0	0	1	13
1971	2	0	1	0	1	1	1	0	2	2	1	0	11
1972	1	0	1	0	1	3	1	1	2	2	1	0	13
1973	0	1	1	1	3	3	3	3	1	2	0	2	20
1974	1	2	3	1	0	1	1	1	0	0	0	0	10
1975	0	1	2	2	2	1	2	1	3	2	0	0	16
1976	1	1	1	0	2	3	2	1	0	0	0	0	11
1977	2	0	1	0	0	0	3	2	2	2	2	1	15
1978	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	8
1979	0	0	1	0	2	0	0	2	0	1	1	0	7
1980	0	0	2	0	2	1	2	1	1	2	0	0	11
2000	0	0	1	1	2	1	1	3	4	1	1	0	15
2001	0	1	3	0	1	1	1	1	0	0	0	0	8
2002	2	4	4	5	5	10	8	7	4	12	1	6	68
2003	4	8	3	1	1	6	3	4	1	3	3	8	45
2004	3	6	2	2	6	2	6	2	1	0	5	1	36
2005	4	3	2	4	3	5	2	5	3	2	1	2	36
2006	6	2	7	0	0	3	1	4	1	0	2	3	29
Total	27	30	39	17	34	48	40	39	31	32	21	25	383
Media	1,4	1,6	2,1	0,9	1,8	2,5	2,1	2,1	1,6	1,7	1,1	1,3	20,2
C.V. (%)	122,6	142,1	77,0	161,9	90,5	95,5	93,5	91,1	79,7	159,6	116,4	168,1	79,0
TOTAL													
1969	6	4	5	3	9	7	2	1	8	3	6	4	58
1970	2	2	5	1	4	5	1	2	9	4	0	3	38
1971	8	1	7	2	4	4	3	2	4	4	3	2	44
1972	3	2	3	3	2	4	4	5	10	4	8	1	49
1973	6	4	3	5	6	8	5	4	3	5	2	3	54
1974	7	7	4	2	3	6	1	3	1	2	4	5	45
1975	3	5	7	6	3	3	3	3	5	5	1	4	48
1976	2	1	4	2	5	3	3	4	2	3	3	5	37
1977	6	0	1	0	2	1	5	5	5	3	7	4	39
1978	2	0	3	0	1	3	3	2	3	5	2	3	27
1979	1	3	1	4	7	1	1	5	4	7	4	7	45

4A. Frecuencias mensuales, anuales y medias mensuales y anuales de lluvias erosivas, no erosivas y total observadas en el periodo 1.969 – 1.980 y 2.000 - 2.006 en Alto Paraná. (continuación)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic	Total
TOTALES													
1980	3	2	4	2	6	2	3	3	3	5	0	0	33
2000	8	5	2	2	5	7	1	5	7	4	4	4	54
2001	6	3	4	4	1	3	2	3	3	3	4	3	39
2002	6	5	4	5	12	10	8	7	6	15	2	12	92
2003	6	13	4	2	2	8	4	5	4	7	4	11	70
2004	4	7	3	5	10	4	6	3	1	5	9	3	60
2005	7	4	2	6	9	7	4	5	7	6	2	4	63
2006	6	3	11	1	0	4	1	4	1	5	5	7	48
Total	92	71	77	55	91	90	60	71	86	95	70	85	943
Media	4,8	3,7	4,1	2,9	4,8	4,7	3,2	3,7	4,5	5,0	3,7	4,5	49,6
C.V. (%)	45,8	81,2	57,9	65,0	70,5	53,5	60,9	39,7	59,5	55,4	67,7	67,2	30,0

5A. Valores mensuales, anuales y medias mensual y anual de precipitación acumulada (mm), erosivas, no erosivas y totales en el periodo 1969 – 1.980 y 2.000 - 2006 en el Departamento Alto Paraná.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic	Total
EROSIVAS*													
mm													
1969	228,6	139,3	161,7	108,6	299,1	125,8	0	18,9	163,1	83,5	119,0	96,2	1543,8
1970	62,7	30,5	71,6	27,5	26,0	79,4	80,5	31,2	148,3	166,0	0	40,5	764,2
1971	187,0	43,4	277,0	90,1	95,3	99,6	49,5	57,0	69,5	71,3	91,5	47,1	1178,3
1972	39,0	59,9	72,1	97,7	22,4	39,7	111,1	164,6	179,3	66,6	285,5	30,6	1168,5
1973	183,2	129,5	84,9	140,3	149,8	127,1	56,2	35,6	69,9	131,0	62,1	28,6	1198,2
1974	286,8	121,9	14,3	31,6	94,6	193,8	0	94,0	34,3	61,1	185,7	153,1	1271,2
1975	120,8	102,6	149,1	163,4	30,6	68,1	21,0	53,7	69,8	105,9	38,9	156,0	1079,9
1976	17,3	0	95,7	94,7	73,1	0	16,1	82,0	62,7	117,9	94,6	168,5	822,6
1977	130,7	0	0	0	29,3	53,2	23,4	81,6	54,6	44,6	184,2	66,2	667,8
1978	33,5	0	47,2	0	28,7	102,3	73,7	34,6	36,8	110,8	38,9	78,7	585,2
1979	32,6	115,9	0	179,7	199,4	15,2	28,2	94,1	144,8	149,8	125,9	289,0	1374,6
1980	89,1	84,1	100,7	41,2	119,6	17,8	29,2	71,7	90,2	76,1	0	0	719,7
2000	309,2	231,4	17,2	36,1	124,5	198,6	0	50,4	97,2	176,2	91,5	186,7	1519
2001	187,6	74,8	25,7	132,6	0	87,9	32,0	66,1	86,5	57,0	134,5	101,7	986,4
2002	202,3	29,1	0	0	336,1	0	0	0	73,0	94,9	22,6	215,6	973,6
2003	59,8	81,1	27,0	14,3	16,7	39,1	23,2	19,5	98,7	160,4	36,8	241,7	818,3
2004	27,8	14,0	21,3	85,1	170,2	44,3	0	17,9	0	231,6	84,5	61,6	758,3
2005	121,2	13,1	0	44,5	346,0	90,6	41,2	0	102,4	211,4	31,4	35,7	1037,5
2006	0	44,8	206,4	77,7	0	23,1	0	0	0	196,8	68,3	155,4	772,5
Total	2319,2	1315,4	1371,9	1365,1	2161,4	1405,6	585,3	972,9	1581,1	2312,9	1695,9	2152,9	19239,6
Media	122,1	69,2	72,2	71,8	113,8	74,0	30,8	51,2	83,2	121,7	89,3	113,3	1012,6
C.V. (%)	76,8	87,7	108,3	78,2	98,2	78,8	102,6	81,1	59,9	46,3	80,9	72,2	28,3
NO EROSIVAS													
1969	0	0	0	0	5,8	11,4	3,0	0	1,0	0,5	1,1	0	22,8
1970	0	8,8	15,8	0	6,3	2,3	0	0	9,9	0	0	7,4	50,5
1971	11,2	0	1,8	0	2,3	4,5	0,2	0	11,4	18,6	1,1	0	51,1
1972	0,3	0	1,6	0	11,4	19,9	9,7	1,2	9,8	1,1	0,8	0	55,8
1973	0	1,3	0,3	0,3	21,0	7,3	5,5	10,7	0,7	9,1	0	4,1	60,3
1974	0,3	11,2	11,1	5,2	0	6,7	1,8	0,4	0	0	0	0	36,7
1975	0	3,8	9,6	10,4	16,6	2,0	11,4	0,6	23,8	11,7	0	0	89,9
1976	0,5	10,6	1,0	0	2,1	14,9	0,6	3,0	0	0	0	0	32,7
1977	9,0	0	4,0	0	0	0	21,8	7,6	15,0	12,5	12,5	11,8	94,2
1978	12,2	0	4,8	0	0	5,3	10,5	4,2	4,8	0	1,2	0,5	43,5
1979	0	0	0,3	0	5,4	0	0	4,5	0	3,2	4,0	0	17,4
1980	0	0	4,2	0	11,5	1,8	0,9	0,7	6,2	18,8	0	0	44,1
2000	0	0	1,4	0,4	9,4	0,3	2,2	1,8	20,0	2,4	12,0	0	49,9
2001	0	8,5	14,8	0	4,8	3,0	2,4	0,3	0	0	0	0	33,8
2002	5,7	10,6	16,0	8,6	10,6	46,0	35,0	13,7	13,0	43,3	39,5	10,0	252
2003	12,7	43,5	11,9	0,3	1,4	29,0	19,4	15,7	0,4	12,0	11,0	27,1	184,4
2004	10,1	26,2	2,3	7,6	19,4	1,7	41,0	1,2	11,0	0	12,4	0,8	133,7
2005	11,0	21,6	3,0	23,3	19,8	24,5	8,3	13,5	32,0	4,2	1,2	10,8	173,2
2006	30,5	2,9	22,8	0	0	6,6	7,4	21,2	6,0	0	3,0	16,0	116,4
Total	103,5	149,0	126,7	56,1	147,8	187,2	181,1	100,3	165,0	137,4	99,8	88,5	1542,4
Media	5,4	7,8	6,7	3,0	7,8	9,9	9,5	5,3	8,7	7,2	5,3	4,7	81,2
C.V. (%)	146,0	147,3	102,2	202,7	92,7	123,7	124,7	123,3	105,0	150,6	181,8	160,5	78,6
TOTAL													
1969	228,6	139,3	161,7	108,6	304,9	137,2	3,0	18,9	164,1	84,0	120,1	96,2	1566,6
1970	62,7	39,3	87,4	27,5	32,3	81,7	80,5	31,2	158,2	166,0	0	47,9	814,7
1971	198,2	43,4	278,8	90,1	97,6	104,1	49,7	57,0	80,9	89,9	92,6	47,1	1229,4
1972	39,3	59,9	73,7	97,7	33,8	59,6	120,8	165,8	189,1	67,7	286,3	30,6	1224,3
1973	183,2	130,8	85,2	140,6	170,8	134,4	61,7	46,3	70,6	140,1	62,1	32,7	1258,5
1974	287,1	133,1	25,4	36,8	94,6	200,5	1,8	94,4	34,3	61,1	185,7	153,1	1307,9
1975	120,8	106,4	158,7	173,8	47,2	70,1	32,4	54,3	93,6	117,6	38,9	156,0	1169,8

5A. Valores mensuales, anuales y medias mensual y anual de precipitación acumulada (mm), erosivas, no erosivas y totales en el periodo 1969 – 1.980 y 2.000 - 2006 en el Departamento Alto Paraná. (continuación)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic	Total
EROSIVAS*													
mm													
1976	17,8	10,6	96,7	94,7	75,2	14,9	16,7	85,0	62,7	117,9	94,6	168,5	855,3
1977	139,7	0	4,0	0	29,3	53,2	45,2	89,2	69,6	57,1	196,7	78,0	762
1978	45,7	0	52,0	0	28,7	107,6	84,2	38,8	41,6	110,8	40,1	79,2	628,7
1979	32,6	115,9	0,3	179,7	204,8	15,2	28,2	98,6	144,8	153,0	129,9	289,0	1392
1980	89,1	84,1	104,9	41,2	131,1	19,6	30,1	72,4	96,4	94,9	0	0	763,8
2000	309,2	231,4	18,6	36,5	133,9	198,9	2,2	52,2	117,2	178,6	103,5	186,7	1568,9
2001	187,6	83,3	40,5	132,6	4,8	90,9	34,4	66,4	86,5	57,0	134,5	101,7	1020,2
2002	208,0	39,7	16,0	8,6	346,7	46,0	35,0	13,7	86,0	138,2	62,1	225,6	1225,6
2003	72,5	124,6	38,9	14,6	18,1	68,1	42,6	35,2	99,1	172,4	47,8	268,8	1002,7
2004	37,9	40,2	23,6	92,7	189,6	46,0	41,0	19,1	11,0	231,6	96,9	62,4	892
2005	132,2	34,7	3,0	67,8	365,8	115,1	49,5	13,5	134,4	215,6	32,6	46,5	1210,7
2006	30,5	47,7	229,2	77,7	0	29,7	7,4	21,2	6,0	196,8	71,3	171,4	888,9
Total	2422,7	1464,4	1498,6	1421,2	2309,2	1592,8	766,4	1073,2	1746,1	2450,3	1795,7	2241,4	20782,0
Media	127,5	77,1	78,9	74,8	121,5	83,8	40,3	56,5	91,9	129,0	94,5	118,0	1093,8
C.V (%)	71,3	76,8	99,9	75,0	94,8	66,3	76,2	68,1	55,1	42,1	75,5	71,3	25,0

*Aquella cuya cantidad total sea igual o superior a 10 mm, o que tenga 6 mm o más ocurridos en 15 minutos o menos, de acuerdo con Wischmeier y Smith (1.958).

6A. Valores mensuales, anuales y medias mensuales y anuales de intensidades mínimas en 30 minutos de las lluvias erosivas observadas en el periodo 1969 – 1980 y 2000 - 2006 en Alto Paraná.

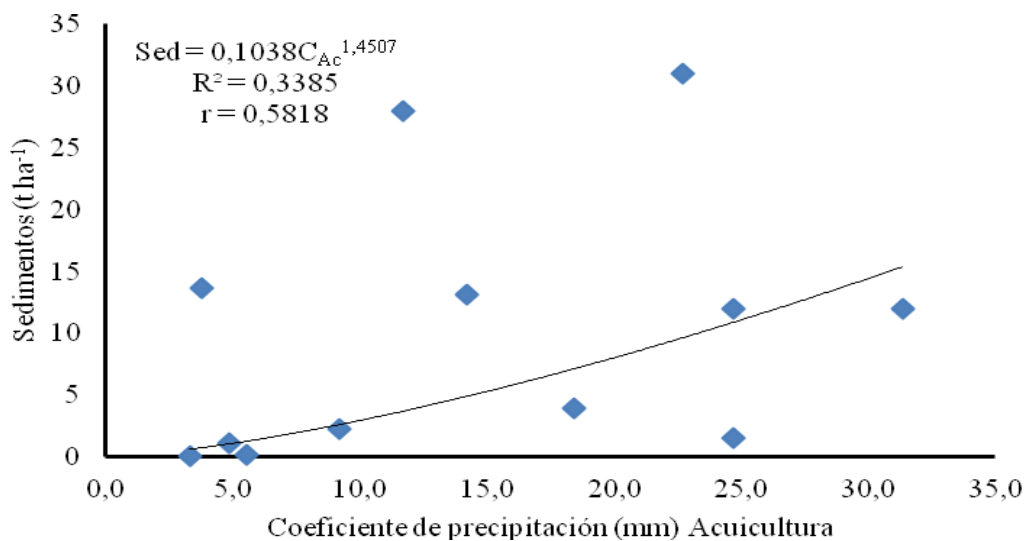
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set	Oct	Nov	Dic	Media
mm h ⁻¹													
1969	13,2	24,2	11,6	4,0	8,2	8,8		0	8,0	8,8	20,0	18,4	11,4
1970	18,0	0	38,4	0	9,0	19,0	0	8,8	7,0	13,8		7,6	11,1
1971	21,4	0	15,4	27,6	14,8	8,0	20,6	12,6	27,8	22,0	20,2	21,4	17,7
1972	15,6	11,0	26,8	19,2	0	0	14,6	15,8	10,8	30,0	16,6	0	13,4
1973	13,4	30,8	20,6	19,0	18,6	13,4	10,0	0	20,2	18,6	14,0	0	14,9
1974	28,0	8,0	0	0	12,4	13,4	0	5,6	10,8	12,6	12,0	11,0	9,5
1975	29,6	16,6	18,8	22,2	0	13,8	0	10,2	14,2	23,8	0	20,4	14,1
1976	0,0		21,0	14,0	11,4		0,0	10,2	15,0	16,4	43,6	14,6	14,6
1977	18,6				28,6	0,0	13,8	6,0	12,8	0,0	12,2	23,0	12,8
1978	0,0		9,8		0,0	11,4	19,4	0,0	12,2	7,0	0,0	11,0	7,1
1979	0,0	28,0		9,6	9,8	0,0	0,0	28,6	11,2	9,2	17,0	15,0	11,7
1980	10,0	33,4	6,6	7,6	11,8	0,0	0,0	8,4	10,6	18,6			10,7
2000	15,0	24,8	0,0	0,0	16,8	13,0		8,6	9,6	10,8	12,6	28,4	12,7
2001	23,6	47,0	0,0	21,8		15,6	0,0	10,6	8,2	20,4	12,6	17,2	16,1
2002	36,0	0,0			9,6				11,0	12,8	0,0	10,8	11,5
2003	23,6	12,2	0,0	0,0	0,0	15,8	0,0	0,0	14,0	14,2	0,0	20,6	8,4
2004	0,0	0,0	0,0	27,8	13,8	4,6		0,0		18,8	11,4	41,4	11,8
2005	40,2	0,0		16,2	20,4	17,6	19,2		3,2	12,0	0,0	18,8	14,8
2006		0,0	9,8	0,0		0,0				14,8	17,6	21,0	9,0
Total	306,2	236,0	178,8	189,0	185,2	154,4	97,6	125,4	206,6	284,6	209,8	300,6	206,2
Media	17,0	14,8	11,9	11,8	10,9	9,1	7,0	7,8	12,2	15,0	12,3	16,7	12,2
C.V.													
(%)	69,7	98,6	94,1	85,3	70,9	74,2	120,8	93,2	43,7	43,9	86,3	56,7	78,1

7A. Probabilidad de ocurrencia de los valores mensuales del índice EI₃₀ en el Departamento Alto Paraná

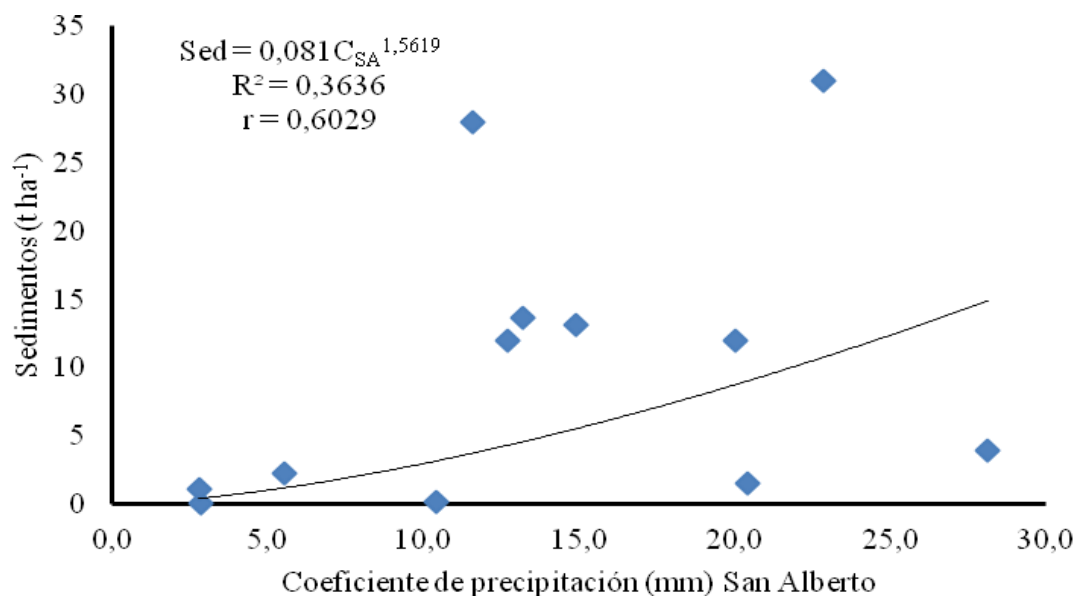
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Número de orden	Probabilidad
3446,29	3100,21	3005,59	2650,93	2944,49	1422,39	512,02	827,63	1182,77	2361,41	2543,41	3583,41	1	5,00
2571,44	1608,35	2286,86	1724,99	2770,62	1135,06	500,72	730,22	629,26	2341,08	1108,06	2570,84	2	10,00
2529,80	1104,81	1375,08	1237,14	2764,94	915,41	289,80	638,61	574,19	1880,38	1075,80	2024,39	3	14,99
2306,35	909,09	1127,34	959,13	2257,89	747,62	208,81	490,27	456,42	1598,47	827,33	1941,42	4	20,00
1703,16	884,93	1120,17	790,08	1177,62	549,40	194,70	417,41	439,91	1460,73	747,86	1691,15	5	25,00
1694,49	869,25	826,70	743,66	1073,93	406,46	164,47	270,02	420,60	1292,78	681,72	1259,96	6	30,03
1560,41	795,61	787,90	657,58	590,00	393,68	137,65	175,18	399,72	1104,04	579,04	964,48	7	34,97
1542,11	596,57	666,77	590,23	585,53	388,20	127,36	137,32	377,55	1065,42	562,83	926,78	8	40,00
970,46	466,47	475,84	344,67	572,17	361,94	101,35	119,24	327,50	1042,24	517,44	737,96	9	45,05
869,95	448,05	265,83	286,49	429,18	327,66	100,78	116,49	230,63	719,90	424,51	723,59	10	50,00
739,62	355,00	231,84	239,88	344,57	316,01	77,88	91,98	227,16	601,81	409,82	641,35	11	54,95
411,21	277,01	164,63	222,10	339,17	171,40	56,47	87,50	221,96	592,58	374,56	559,32	12	59,88
407,89	132,57	102,60	167,33	213,62	154,57	38,07	72,64	196,34	554,75	302,89	551,41	13	64,94
405,40	91,31	67,17	95,79	131,72	117,37	27,56	62,02	180,88	495,89	208,03	264,53	14	69,93
353,88	54,24	46,63	81,09	62,26	100,75		26,94	164,99	421,55	181,96	159,19	15	75,19

8A Probabilidad de ocurrencia de los valores mensuales del índice KE>25 en el Departamento Alto Paraná

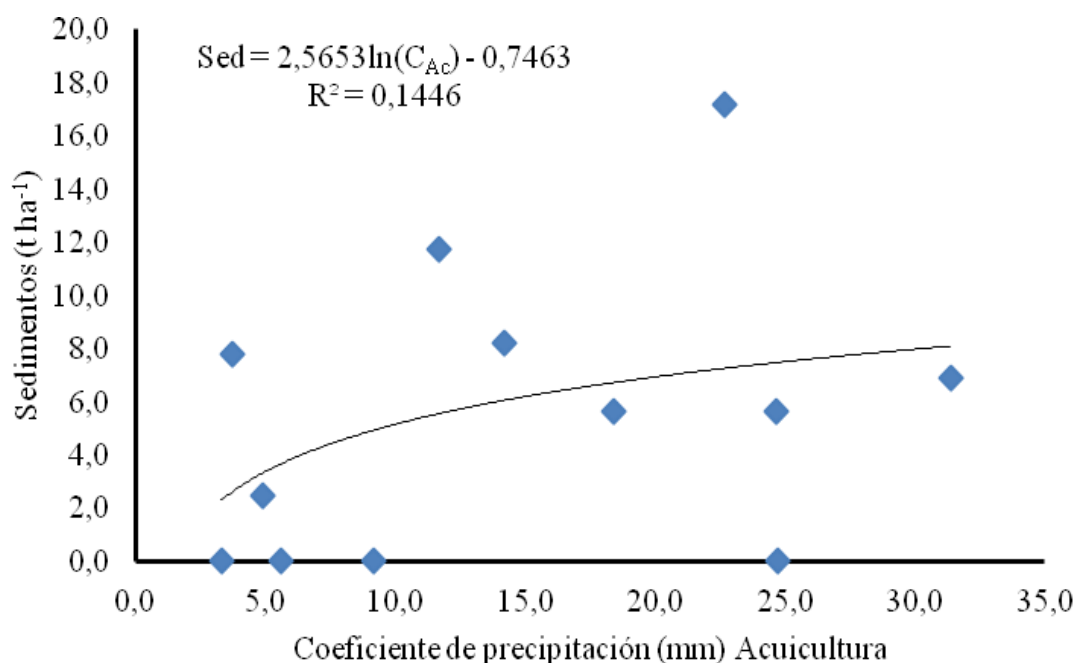
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Número de orden	Probabilidad
54,37	35,69	36,80	30,04	43,23	15,84	8,70	13,60	90,64	41,11	31,66	50,59	1	5,00
38,78	28,56	24,47	18,58	41,22	13,16	6,83	9,86	27,88	30,01	21,48	37,90	2	10,00
36,39	20,39	21,70	14,96	30,32	11,38	6,04	9,43	12,25	27,81	19,62	31,42	3	14,99
34,47	18,53	16,07	12,89	29,21	9,54	3,31	9,15	9,87	23,45	15,70	25,23	4	20,00
32,01	13,22	13,19	11,31	17,89	7,10	3,25	6,48	6,03	21,63	12,68	22,54	5	25,00
27,33	12,20	11,01	11,23	14,40	6,34	3,15	5,96	3,30	20,59	9,88	21,92	6	30,03
27,17	11,86	10,67	10,11	13,53	6,16	2,98	2,37	3,10	20,14	9,88	20,78	7	34,97
27,13	11,63	7,77	5,51	8,47	5,95	2,77	1,18	2,92	14,11	7,87	14,35	8	40,00
16,01	10,86	7,54	3,97	7,54	5,24	2,44	1,04	2,74	10,71	7,77	13,83	9	45,05
14,61	5,42	5,39	3,83	5,84	3,69	0,00	0,71	2,70	10,58	5,41	12,53	10	50,00
12,10	5,08	4,95	3,80	5,21	3,66	0,00	0,00	2,09	10,10	5,18	11,23	11	54,95
8,31	3,59	3,49	1,24	4,68	3,12	0,00	0,00	1,74	9,97	4,49	7,98	12	59,88
8,01	3,33	2,94	1,19	4,27	2,06	0,00	0,00	1,15	9,94	3,68	7,90	13	64,94
6,84	2,15	0,97	0,00	3,42	1,95	0,00	0,00	0,88	8,92	2,48	5,78	14	69,93
6,52	1,04	0,00	0,00	2,83	1,65		0,00	0,74	7,98	2,24	3,93	15	75,19



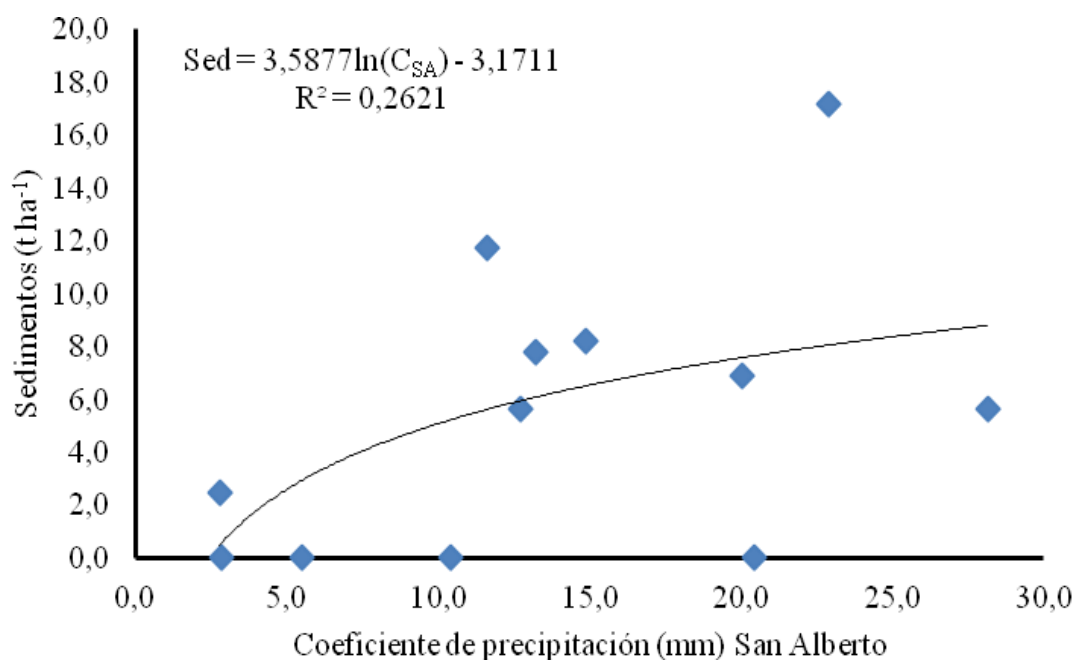
- 9A. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en sistema convencional y el coeficiente de precipitación calculado con datos de la estación de Acuicultura, Itaipú Binacional (CAc).



- 10A. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en sistema convencional y el coeficiente de precipitación calculado con datos de la estación de San Alberto, Itaipú Binacional (CSA).



11A. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en el sistema de siembra directa y el coeficiente de precipitación calculado con datos de la estación de Acucultura, Itaipú Binacional (CAc).



12A. Regresión entre sedimentos de suelo (Sed) en el sistema de siembra directa y el coeficiente de precipitación calculado con datos de la estación de San Alberto, Itaipú Binacional (CSA).