



**UNIVERSIDAD DE TALCA  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE EROSIVIDAD PLUVIAL (R) DE  
LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELO, PARA DOS  
ESTACIONES PLUVIOGRÁFICAS DE LA VII REGIÓN DEL  
MAULE.**



**JUAN RAMÓN FARFÁN ZÚÑIGA.**

**Memoria para optar al título de INGENIERO FORESTAL**

**Profesor Guía : Dr. Ing. ROBERTO PIZARRO TAPIA.**

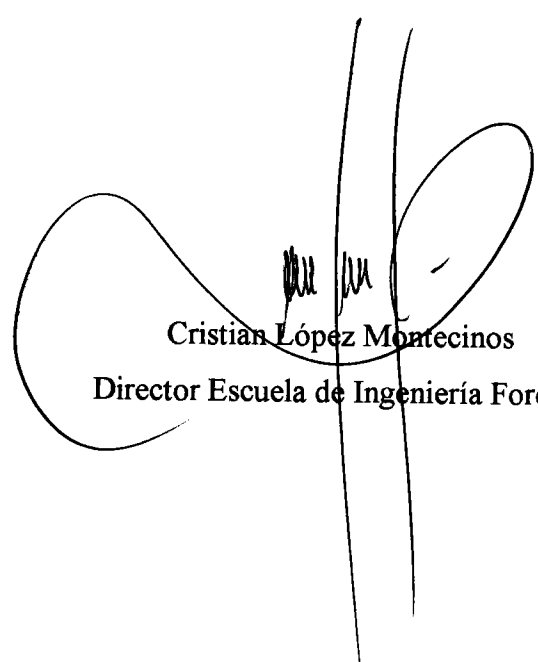
**TALCA – CHILE  
2002**



**UNIVERSIDAD DE TALCA  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

El alumno Sr. *JUAN RAMÓN FARFÁN ZÚÑIGA*, ha realizado la Memoria de Título: “ *DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE EROSIVIDAD PLUVIAL (R) DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELO, PARA DOS ESTACIONES PLUVIOGRÁFICAS DE LA VII REGIÓN DEL MAULE*”, como uno de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Forestal de la Universidad de Talca, teniendo como profesor guía al Dr. Ing. Roberto Pizarro Tapia.

La comisión de calificación de la memoria, constituida por los profesores, *Dr. Ing. Roberto Pizarro Tapia y Dr. Carlos Mena Frau*, la han calificado con nota 6,7 (en letras) seis coma siete.



Cristian López Montecinos  
Director Escuela de Ingeniería Forestal

## **DEDICATORIA**

*Para el amor más grande de mi vida,  
mi hija,....., Valeria.*

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todas las personas e instituciones que entregaron valioso apoyo, tanto técnico como humano, en la elaboración de ésta memoria, especialmente a:

A mi profesor guía Dr. Ingeniero Forestal Roberto Pizarro Tapia, que gracias a su constante apoyo y disponer parte de su valioso tiempo en mí, logré finalizar esta investigación.

Al profesor PhD. Esteban Flores Díaz, quien aportó con sus conocimientos en materias relacionadas con la estadística.

A los Sres. Juan Bastías, Claudio Ramírez T. y Salvador Alegría, personal técnico de la Dirección General de Aguas (D.G.A., VII Región), por la facilitación de la información necesaria para esta investigación. Por la misma razón, agradezco al Sr. Patricio González C. de la Facultad de Cs. Agrarias de la Universidad de Talca.

A los Ingenieros Forestales Marco Yáñez, Francisco Berríos y al futuro Ing. Forestal Víctor Bobadilla, por entregarme su amistad durante todos los años de estudiante en la Universidad, como así también, durante el periodo que demoró esta investigación y, estoy seguro que esta amistad perdurará en el tiempo.

Finalmente, agradezco a mis padres, hermanos, que en todo momento y especialmente en los momentos más difíciles, me brindaron apoyo y cariño, pilares fundamentales para cumplir con el sueño de ser un Ingeniero Forestal, sueño que lo veía bastante lejano.

Juan F.

## ÍNDICE

	Página
<b>RESUMEN.</b> .....	x
<b>SUMMARY.</b> .....	xi
<b>1.- INTRODUCCIÓN.</b> .....	1
<b>2.- OBJETIVOS.</b> .....	3
2.1.- Objetivo General. ....	3
2.2.- Objetivo Específico. ....	3
<b>3.- ANTECEDENTES GENERALES.</b> .....	4
3.1.- Antecedentes de las Estaciones Pluviográficas en Estudio. ....	5
3.1.1.- Estación pluviográfica de la Universidad de Talca. ....	5
3.1.2.- Estación pluviográfica Embalse Bullileo. ....	6
<b>4.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.</b> .....	7
4.1.- Concepto de Erosión y Métodos de Evaluación. ....	7
4.1.1.- Mecanismos y factores que intervienen en la erosión hídrica. ....	7
4.1.1.1.- Mecanismos .....	7
<i>a) Acción de la precipitación</i> .....	8
<i>b) Acción de la escorrentía</i> .....	8
4.1.1.2.- Factores. ....	9
<i>a) Clima</i> .....	9
<i>b) Relieve</i> .....	9
<i>c) Suelo</i> .....	10
<i>d) Vegetación</i> .....	11
4.2.- Formas de Erosión Hídrica. ....	12
4.2.1.- Erosión laminar. ....	12
4.2.2.- Erosión por surcos o en regueros. ....	13
4.2.3.- Erosión en barrancos o cárcavas. ....	13

4.3.- Erosión de Suelos en Chile. ....	14
4.3.1.- Estudios sobre estimación de erosión en Chile. ....	15
4.4.- Modelos de Evaluación de la Erosión Hídrica. ....	16
4.4.1.- Modelos cualitativos	18
4.4.2.- Modelos cuantitativos. ....	19
4.4.2.1.- Modelos de evaluación directa. ....	19
4.4.2.2.- Modelos de evaluación indirecta. ....	20
i.- Modelos físicos. ....	20
ii.- Modelos conceptuales. ....	21
iii.- Modelos paramétricos. ....	21
♦ La ecuación universal de pérdidas de suelo. ....	21
<b>5.- METODOLOGÍA.</b> ....	27
5.1.- Fases de Trabajo. ....	27
5.1.1.- Revisión bibliográfica. ....	27
5.1.2.- Obtención de la información. ....	27
5.1.3.- Selección y cálculo de las intensidades. ....	29
5.1.4.- Determinación del índice de erosividad pluvial R. ....	30
5.1.5.- Método alternativo para la estimación del índice de erosividad pluvial. ....	31
5.1.6.- Diferenciación en meses secos y húmedos. ....	33
5.1.7.- Análisis estadístico. ....	34
5.1.7.1.- Las variables indicadoras. ....	34
5.1.7.2.- Medidas de bondad de ajuste. ....	35
5.1.7.3.- Análisis de regresión. ....	36
i.- Supuesto de normalidad. ....	36
• Test de Kolmogorov – Smirnov. ....	37
• Probabilidad normal de los residuos. ....	37
ii.- Supuesto de homocedasticidad. ....	38
iii.- Supuesto de no autocorrelación. ....	38
• Prueba de Durbin – Watson. ....	39
• Gráfica de los residuos v/s tiempo. ....	40
5.1.7.4.- Corrección de modelos. ....	41

5.2.- Materiales y Equipos .....	42
<b>6.- RESULTADOS.</b> .....	43
6.1.- Resultados de los cálculos del índice de erosividad pluvial de la USLE e índice de Fournier. ....	43
6.2.- Obtención de modelos y análisis estadístico. ....	52
6.2.1.- Ajuste de modelos para meses secos. ....	52
6.2.1.1.- Análisis de los supuestos del modelo de regresión. ....	55
<i>a) Supuesto de normalidad.</i> ....	55
<i>b) Supuesto de homocedasticidad.</i> ....	56
<i>c) Supuesto de no autocorrelación.</i> ....	56
6.2.2.- Ajuste del modelo para meses húmedos. ....	58
6.2.2.1.- Análisis de los supuestos del modelo de regresión. ....	60
<i>a) Supuesto de normalidad.</i> ....	60
<i>b) Supuesto de homocedasticidad.</i> ....	61
<i>c) Supuesto de no autocorrelación.</i> ....	62
6.2.2.2.- Corrección del modelo. ....	63
<b>7.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.</b> .....	65
7.1.- Obtención de los registros de precipitaciones. ....	65
7.2.- Determinación del índice de erosividad pluvial por el método tradicional y del índice de Fournier. ....	68
7.3.- Ajuste de modelos R v/s $\bar{I}Fm$ . ....	69
7.3.1.- Ajuste del modelo para valores de precipitación considerada seca. ....	69
7.3.2.- Ajuste del modelo para datos de meses húmedos. ....	71
7.4.- Comparación entre el Factor R calculado en su forma tradicional el factor R modelado. ....	73
<b>8.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b> .....	76
8.1.- Conclusiones. ....	76
8.2.- Recomendaciones. ....	78
<b>9.- BIBLIOGRAFÍA.</b> .....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
TABLA 1 : Zonas de decisión de la prueba de Durbin – Watson. ....	39
TABLA 2 : Valores mensuales obtenidos del índice de erosividad R e índice de Fournier de Talca. ....	44
TABLA 3 : Valores mensuales obtenidos del índice de erosividad R e índice de Fournier de Bullileo. ....	45
TABLA 4 : Rango de valores mensuales calculados del índice R e índice de Fournier. ....	47
TABLA 5 : Resultados mensuales del índice de erosividad pluvial e índice de Fournier, asociado con su precipitación para los meses secos de Talca. ....	49
TABLA 6 : Resultados mensuales del índice de erosividad pluvial e índice de Fournier, asociado con su precipitación para los meses húmedos de Talca. ....	49
TABLA 7 : Resultados mensuales del índice de erosividad pluvial e índice de Fournier, asociado con su precipitación para los meses secos de Bullileo. ....	50
TABLA 8 : Resultados mensuales del índice de erosividad pluvial e índice de Fournier, asociado con su precipitación para los meses húmedos de Bullileo. ....	50
TABLA 9 : Análisis de regresión. ....	53
TABLA 10: Análisis de varianza. ....	54
TABLA 11: Test de normalidad. ....	55
TABLA 12: Test para la autocorrelación. ....	57
TABLA 13: Análisis de regresión. ....	59
TABLA 14: Análisis de varianza. ....	59
TABLA 15: Test de normalidad. ....	60
TABLA 16: Test de autocorrelación. ....	62
TABLA 17: Coeficientes de regresión del modelo original. ....	64
TABLA 18: Test de autocorrelación. ....	64



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1 : VII Región del Maule y la ubicación de las estaciones pluviográficas en estudio. ....	6
FIGURA 2 : Proceso de la erosión hídrica. ....	12
FIGURA 3 : Banda de Pluviógrafo. ....	28
FIGURA 4 : Probabilidad normal de los residuos. ....	37
FIGURA 5 : Gráfico de autocorrelación de residuos. ....	41
FIGURA 6 : Gráfico de dispersión de los datos de las estaciones en estudio. ....	46
FIGURA 7 : Gráfico de dispersión de los datos de meses secos. ....	51
FIGURA 8 : Gráfico de dispersión de los datos de meses húmedos. ....	52
FIGURA 9 : Gráfico probabilidad normal de los residuos. ....	55
FIGURA 10: Gráfico residuos estandarizados v/s valores estimados. ....	56
FIGURA 11: Gráfico de autocorrelación de residuos. ....	56
FIGURA 12: Gráfico probabilidad normal de los residuos. ....	60
FIGURA 13: Gráfico residuos estandarizados v/s valores predichos. ....	61
FIGURA 14: Gráfico de autocorrelación de residuos. ....	62
FIGURA 15: Registro de las precipitaciones anuales en la estación de Talca. ....	66
FIGURA 16: Registro de las precipitaciones anuales en la estación de Bullileo. ....	66
FIGURA 17: Esquema del modelo ajustado para los meses secos. ....	70
FIGURA 18: Esquema del modelo ajustado para los mese húmedos. ....	72
FIGURA 19: Gráfico de comparación del factor R mensual calculado por el método tradicional y el factor R modelado, para los meses secos de Talca. ....	73
FIGURA 20: Gráfico de comparación del factor R mensual calculado por el método tradicional y el factor R modelado, para los meses secos de Bullileo. ....	73
FIGURA 21: Gráfico de comparación del factor R mensual calculado por el método tradicional y el factor R modelado, para los meses húmedos de Talca. ....	74
FIGURA 22: Gráfico de comparación del factor R mensual calculado por el método tradicional y el factor R modelado, para los meses húmedos de Bullileo....	74

## APÉNDICES

	Página
APÉNDICE I : Análisis de regresión: Modelo R v/s IFm para meses secos. ....	85
APÉNDICE II : Análisis de regresión: Modelo R v/s IFm para meses húmedos. ....	89
APÉNDICE III: Comparación de modelos alternativos. ....	96

## ANEXOS

ANEXO I : Determinación del índice de Fournier mensual. ....	100
ANEXO II : Determinación de la mediana. ....	101
ANEXO III : Posibilidades de comportamiento de una variable cualitativa con dos clases. ....	102
ANEXO IV : Patrones generales del comportamiento de los residuos. ....	103
ANEXO V : Medida correctiva para la autocorrelación. ....	104
ANEXO VI : Registro de precipitaciones de pluviógrafos y pluviómetros de la estación de la Universidad de Talca y Embalse de Bullileo. ....	106
ANEXO VII : Valores máximos de intensidad en 30 minutos (cm/h), obtenidas en los meses de los años considerados. ....	110

## RESUMEN

Los problemas de los procesos erosivos, son considerados como uno de los más significativos en el sector silvoagropecuario y están presentes en Chile desde años. Sin embargo, los conocimientos referentes a este problema y los estudios que se han realizado al respecto, son escasos.

En función de lo expuesto, esta investigación abordó el problema de la erosión, estudiando y calculando el factor de erosividad pluvial o factor R de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo, para dos estaciones pluviográficas de la VII Región de Chile, seleccionando una estación del valle central (Talca) y otra del sector andino (Embalse de Bullileo). Adicionalmente, se pretendió generar una función de regresión ( $R = f(IF)$ ), para estimar el índice R a través del índice propuesto por Fournier, el cual se obtiene por medio de los registros pluviométricos, facilitando de esta forma, la estimación del factor R y prescindiendo de los pluviógrafos.

Para la estimación del factor R por medio del IF, este último se modificó en valores mensuales (IFm), separados en meses secos y húmedos. Luego, se ajustaron modelos de regresión con inclusión de variables indicadoras de ubicación geográfica, obteniéndose un modelo para los datos de meses secos y otro para los meses húmedos. Por otra parte, los valores de R presentaron grandes diferencias entre las estaciones; así por ejemplo, el valor más alto calculado de forma tradicional fue de 214,45 ( $J \cdot cm / (m^2 \cdot hora)$ ) para la estación de Talca y de 293,82 ( $J \cdot cm / (m^2 \cdot hora)$ ) para la estación de Bullileo.

Finalmente, los modelos que se proponen utilizar, presentaron una relación lineal entre las variables dependiente e independiente incluidas en el modelo, presentando elevados coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y bajos errores estándar (E.E.E.), obteniéndose para el modelo de meses húmedos un  $R^2$  de 94,02% y un error estándar de 0,277; en tanto, para el modelo de meses secos, se obtuvo un  $R^2$  de 90,53% y un error estándar de 0,389.

## SUMMARY

The erosive processes are considered one of the most relevant problems in the agroforestry. Although, they have existed in Chile for a long time, both information and research available is very little.

According to the above, this research deals with the erosive problem and analyzing the pluvial erosive factor or factor R of Universal Soil Loss Equation for two rain – gaging stations in the VII Region of Chile, choosing one station from the central valley (Talca) and the other one from the andean sector (Bullileo Dam). Also, it was intended to generate a regression function ( $R = f(IF)$ ), so as to calculate R index by means of the index suggested by Fournier, which is obtained using rain – gaging recordings, this making the estimation of factor R easier.

To calculate factor R by means of the IF, this one was modified in monthly values (IFm), separated in dry and humid months. Then, these regression models were adapted with the inclusion of indicating variables of geographical location, and a model for dry and humid month data was obtained. On the other hand, R values showed big differences between the stations, for instance, the highest value calculated in a traditional way was 214,45 ( $J*cm/(m^2*hour)$ ) for the station in Talca and 293,82 ( $J*cm/(m^2*hour)$ ) for the station in Bullileo.

Finally, the models that suggest to utilize, showed a linear relationship between dependent and independent variables included in the model showing a high determination coefficient ( $R^2$ ) and low standard errors, an  $R^2$  of 94,02% and a standard error of 0,277 were obtained for the model of humid months; whilst an  $R^2$  of 90,53% and a standard error of 0,389 were got for the model of dry months.

## 1.- INTRODUCCIÓN

Los recursos naturales, entre ellos el suelo, son imprescindibles para la permanencia y sobrevivencia del hombre en la tierra. Es una obligación del hombre evitar el deterioro de los recursos y ello no implica dejar de usarlos, sino que después de estudiar sus cualidades y tratarlos según sus limitaciones, conseguir los mejores aprovechamientos (Suárez, 1980).

En cuanto al recurso suelo, éste puede ser removido y deteriorado por la acción de agentes externos, principalmente el agua. Por esto, a través del tiempo se ha estudiado y elaborado una serie de métodos para estimar las pérdidas de tan valioso recurso.

El Forest Service y el Soil Conservation Service de Estados Unidos, son los principales organismos que continúan con las investigaciones sobre tan trascendental problema, lo que en la actualidad les permite disponer de modelos de evaluación de las pérdidas de suelo para ser utilizados dentro de ciertos límites de aplicación.

Algunos de estos modelos son simples ecuaciones que calculan el promedio anual de erosión en la desembocadura de una cuenca. Hay otros más complejos que simulan la erosión diaria en lugar de la anual, y que pueden aplicarse continuamente para calcular la erosión promedio en el largo plazo y las probabilidades de sus distribuciones. Sin embargo, estos métodos, principalmente los empíricos, si no se calibran ni validan adecuadamente para las condiciones locales, son de poca utilidad (Wischmeier, 1978).

Dentro de los modelos de evaluación, es quizás la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE), la que ha tenido mayor aceptación y difusión en todos los países con problemas de erosión.

La hipótesis de esta ecuación, está centrada en considerar a las precipitaciones como el principal agente activo de la erosión superficial, desde el desprendimiento por salpicadura hasta la contribución de la misma a la escorrentía.

Se establece así, que las pérdidas anuales de suelo son directamente proporcionales al índice de erosividad de las lluvias, y ello relacionado con la energía cinética de cada aguacero y su intensidad máxima. Las mismas condiciones de erosividad de las lluvias pueden producir erosiones diferentes según las características del suelo sobre el que actúan, relacionadas éstas con su textura, la estructura, el contenido de materia orgánica y la permeabilidad.

De acuerdo a lo expuesto, la presente memoria pretende contribuir al uso de modelos de estimación de pérdidas de suelo. Por ello, se trabajará con el índice de erosividad pluvial o factor R de la USLE, factor que se relacionará con el índice de Fournier, para generar una función de regresión ( $R = f(IF)$ ) que permita facilitar su estimación.

## **2.- OBJETIVOS.**

### **2.1.- Objetivo General.**

- Contribuir a la utilización de modelos de estimación de erosión, como el de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE) en la VII Región, a través del estudio del índice de erosión pluvial R.

### **2.2.- Objetivo Específico.**

- Determinar el índice de erosión pluvial R, para las estaciones pluviográficas Universidad de Talca y Embalse de Bullileo de la VII Región de Chile, en diversos años de estudio.

### 3.- ANTECEDENTES GENERALES.

Este estudio se realizó en dos estaciones pluviográficas emplazadas en la VII Región del Maule. La superficie total de la Región del Maule es de 30.000 km<sup>2</sup>, de los cuales el 42% tiene aptitud forestal, el 24% es agropecuaria, el 33% es alta cordillera y cauce de ríos, siendo lagos y áreas urbanas, el 1% restante.

El relieve de la VII Región se caracteriza porque la cordillera andina tiene un sector anterior o precordillera, en donde los cursos de agua corren encajonados, denominado la montaña. En general, en esta Región la Cordillera de los Andes está disminuida en altitud. En cuanto al valle central, éste ofrece amplias áreas planas y con suaves ondulaciones. A su vez, la Cordillera de la Costa va perdiendo altura y está muy cortada por los valles fluviales, la planicie costera se encuentra muy poco extendida, cayendo en ella de forma abrupta la Cordillera de la Costa (Dirección General de Aguas, 1977).

En cuanto a las precipitaciones en la Región, se encuentra una media anual de 1.471 mm, variando entre medias anuales de 700 mm en la costa, 800 mm en el valle y 2500 mm en el sector andino. En el valle central, el 83 % de la precipitación total anual se produce entre los meses de Mayo y Septiembre, siendo los meses de mayor pluviosidad Junio y Julio (MIDEPLAN, 1998).

La Región del Maule, también se caracteriza por poseer marcadas asociaciones vegetacionales, entre las que destacan la formación de estepa con *Acacia caven* y la presencia del bosque esclerófilo, definidas por las condiciones de clima, relieve, exposición y altitud. Por ello, las prácticas agrícolas se restringen a los sectores del valle, en los que predominan los cultivos agrícolas de secano. En general, el tipo de intervención ejercida en los recursos, ha generado un fenómeno erosivo en toda la Región (MIDEPLAN, 1998).



En cuanto a los recursos hídricos de la VII Región, se puede señalar que la mayor parte de los cauces presenta un régimen pluvial, y en consecuencia las crecidas ocurren durante el invierno. Sin embargo, también se encuentran cauces de régimen mixto, como el río Maule, que nace en la Cordillera de los Andes y que por las características de ésta, alta y maciza, determina un régimen con crecidas pluviales en invierno y nivales en primavera.

En esta Región, se determinó como el principal problema ambiental la erosión hídrica, seguido por la degradación biológica. Como problemas secundarios, están la mala aplicación de la capacidad de uso de los suelos (cultivos en fuertes pendientes), la deforestación, la degradación química y la contaminación química (INIA, 2001).

Los problemas erosivos que presentan las distintas zonas, se deben principalmente a prácticas inadecuadas en el recurso suelo y deficiencias en el uso de los recursos de vegetación. Entre los más importantes se encuentran la sobreextracción para producción de leña, y el silvopastoreo con sobrecarga animal. Cuando se agrega la variable clima, se agravan las condiciones de estabilidad del recurso suelo (MIDEPLAN, 1998).

Finalmente, hay que destacar que debido al uso intensivo de los recursos naturales como consecuencia del aumento poblacional, es necesario continuar investigando, estudiando y evaluando la serie de trastornos que sufren los recursos naturales.

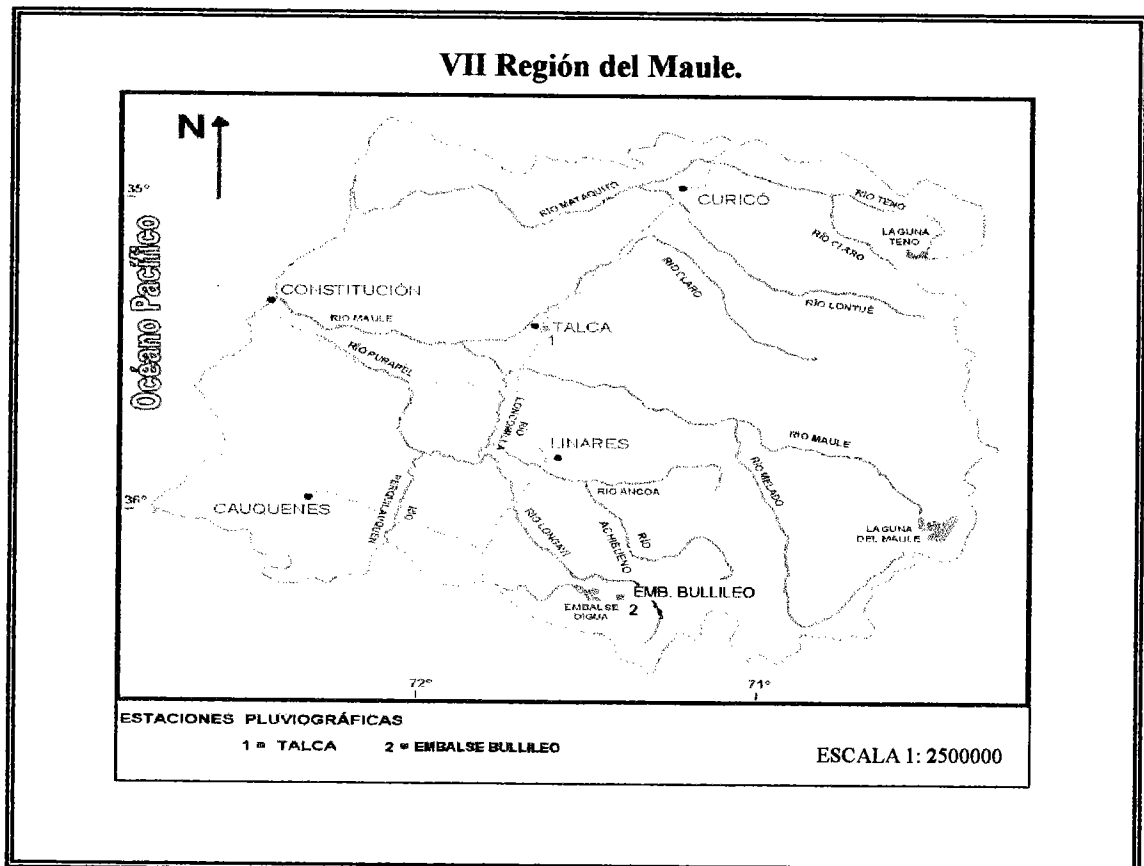
### **3.1.- Antecedentes de las Estaciones Pluviográficas en Estudio.**

#### **3.1.1.- Estación pluviográfica Universidad de Talca.**

La estación se encuentra en el patio agroclimatológico perteneciente al Servicio Integrado de Agroclimatología y Riego (SIAR), de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Talca (Campus Lircay). Esta estación se encuentra a 110,5 m.s.n.m., y sus coordenadas geográficas son 35° 23' 37" de latitud Sur y 71° 38' 00" de longitud Oeste.

### 3.1.2.- Estación pluviográfica Embalse Bullileo.

Esta estación se encuentra a 50 km al Oriente de la ciudad de Parral. Está ubicada en el campamento del Embalse Bullileo de la Dirección de Obras Hidráulicas a 640 m.s.n.m., y las coordenadas geográficas son  $36^{\circ} 17' 00''$  de latitud Sur y  $71^{\circ} 25' 00''$  de longitud Oeste, (Dirección General de Aguas, 1977).



**FIGURA 1:** VII Región del Maule y la ubicación de las estaciones pluviográficas en estudio.

**Fuente:** Estudios hidrológicos de la Región del Maule (2002).

## **4.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.**

### **4.1.- Concepto de Erosión y Métodos de Evaluación.**

La erosión es el desgaste de la superficie terrestre por la acción de diversos agentes externos como el agua, el viento, las variaciones de temperatura y la vegetación (Mintegui *et al*, 1990).

Young (1989) citado por García (1999), define a la erosión como una de las formas de degradación de los suelos, comprendiendo el deterioro físico, el químico y de las propiedades biológicas del mismo.

Para Mintegui *et al* (1990), la erosión causada por la acción del agua como agente externo o erosión hídrica, es el proceso de disgregación y transporte de partículas del suelo por acción del agua. El ciclo culmina con los depósitos de los materiales transportados por la corriente en áreas de sedimentación, cuando la capacidad de arrastre de las aguas, se reduce hasta el punto de no permitir la continuación en el flujo de las partículas terrosas previamente incorporadas al mismo.

#### **4.1.1.- Mecanismos y factores que intervienen en la erosión hídrica.**

##### **4.1.1.1.- Mecanismos**

Según Suárez (1980), si se omite la erosión eólica, toda remoción de suelo exige la presencia de agua, ya sea superficialmente (partículas de suelo arrastradas aisladamente), o en la profundidad de su perfil (suelo arrastrado en masa). Con respecto al ataque superficial, su mecanismo conlleva dos acciones: Acción de la Precipitación y acción de la escorrentía (García, 1999).

*a) Acción de la precipitación.*

Según García (1999), la gota de lluvia cuando cae a través de la atmósfera, sufre cambios en su tamaño, aumentando o disminuyendo por condensación o evaporación. Desciende por la acción de la gravedad y, en ausencia de obstáculos, golpea el suelo con considerable fuerza, disgregando las partículas de suelo y proyectándolas en el aire.

Esta precipitación puede evaporarse, infiltrarse o quedar en la superficie, que estando en terrenos en pendientes escurre, cuando se supera la capacidad de infiltración (Stallings, 1962).

Ellison (1947) citado por FAO (1994), señala que el impacto provocado por las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo y por el propio humedecimiento de éste, se manifiesta en la disgregación de las partículas superficiales, ocasionando también transporte de partículas por aspersión.

*b) Acción de la Escorrentía.*

Como consecuencia de la disgregación, se produce un sello superficial que disminuye sustancialmente la capacidad de infiltración del suelo. En el momento en que la precipitación pasa a ser mayor que la tasa de infiltración de agua en el suelo, se produce la retención y detención superficial del agua y, posteriormente, el escurrimiento superficial del agua que no infiltra (FAO, 1994).

López y Mintegui (1990), señalan que la formación del escurrido superficial dependerá del régimen de las precipitaciones y de las características hidrológicas del suelo. Si estas características permiten en todo momento la infiltración de una cantidad de agua igual o superior a la que aporta la precipitación, no se producirá ninguna corriente superficial; en caso contrario, se formará una lámina superficial de agua que escurrirá ladera abajo, en función de la pendiente del terreno.

#### 4.1.1.2.- Factores.

##### a) *Clima*

El factor climático que más influye en la erosión es la precipitación. De su cantidad, intensidad y distribución, depende el volumen de flujo que se desliza en capa uniforme sobre la tierra, llevando en suspensión las sustancias minerales (Suárez, 1980).

La frecuencia de los aguaceros ejerce influencia en el fenómeno erosivo, debido a sus repercusiones en el estado de humedad del suelo en el tiempo (García, 1999). Por esta razón, si los intervalos entre periodos de lluvia son cortos, el contenido de humedad de los suelos es elevado al iniciarse un nuevo aguacero y éste puede ocasionar escorrentías, aunque la intensidad sea baja. Por el contrario, si los intervalos son largos, el suelo prácticamente se llegará a secar, retardándose la formación de escorrentías superficiales, e incluso, puede que no lleguen a existir si la intensidad no es muy alta.

Suárez (1980), define el aguacero como la cantidad de lluvia que cae en forma continua en un periodo más o menos largo, individualizado a través de sus diversas características de intensidad, duración y frecuencia. Además, señala que de estas tres características, la intensidad del aguacero es el factor pluviométrico más importante que afecta la escorrentía y la erosión, aunque ejerce una mayor influencia sobre el segundo fenómeno.

##### b) *Relieve*

Tanto la longitud como la pendiente de la ladera, influyen considerablemente en las tasas de erosión de un suelo (Horton 1945, citado por González del Tánago, 1991).

De acuerdo a Peralta (1976), el agua que cae sobre el suelo y escurre por su superficie, no condiciona por sí sola el grado de erosión, sino que se encuentra fuertemente

influenciado por la pendiente, la cual actúa por medio del largo de ella, lo que determina una mayor acumulación de agua escurriéndose por la misma en el grado de inclinación de ésta, lo cual condiciona la velocidad de escurrimiento de las aguas.

Respecto a la longitud del declive, los fenómenos erosivos se manifiestan en distinto grado en la ubicación de la ladera. En la zona alta, prácticamente no hay erosión; la erosión de mayor intensidad es en la parte media. En la parte mas baja de la ladera, en que por lo general disminuye la pendiente, ocurre el proceso de sedimentación (Meyer *et. al*, 1975 citado por González del Tánago, 1991).

El tamaño y cantidad de material que el agua puede arrastrar o llevar en suspensión, depende de la velocidad con que ésta fluye, la cual, a su vez, es una resultante de la longitud y el grado de pendiente del terreno (Suárez, 1980).

### *c) Suelo*

Los factores que contribuyen a la erosión, no producen los mismos efectos en todos los suelos. Las condiciones físicas y químicas de los terrenos, al impartirles mayor o menor resistencia a la acción de las aguas, tipifican y singularizan el comportamiento de cada suelo expuesto a condiciones similares de pendiente, lluvia y cubierta vegetal.

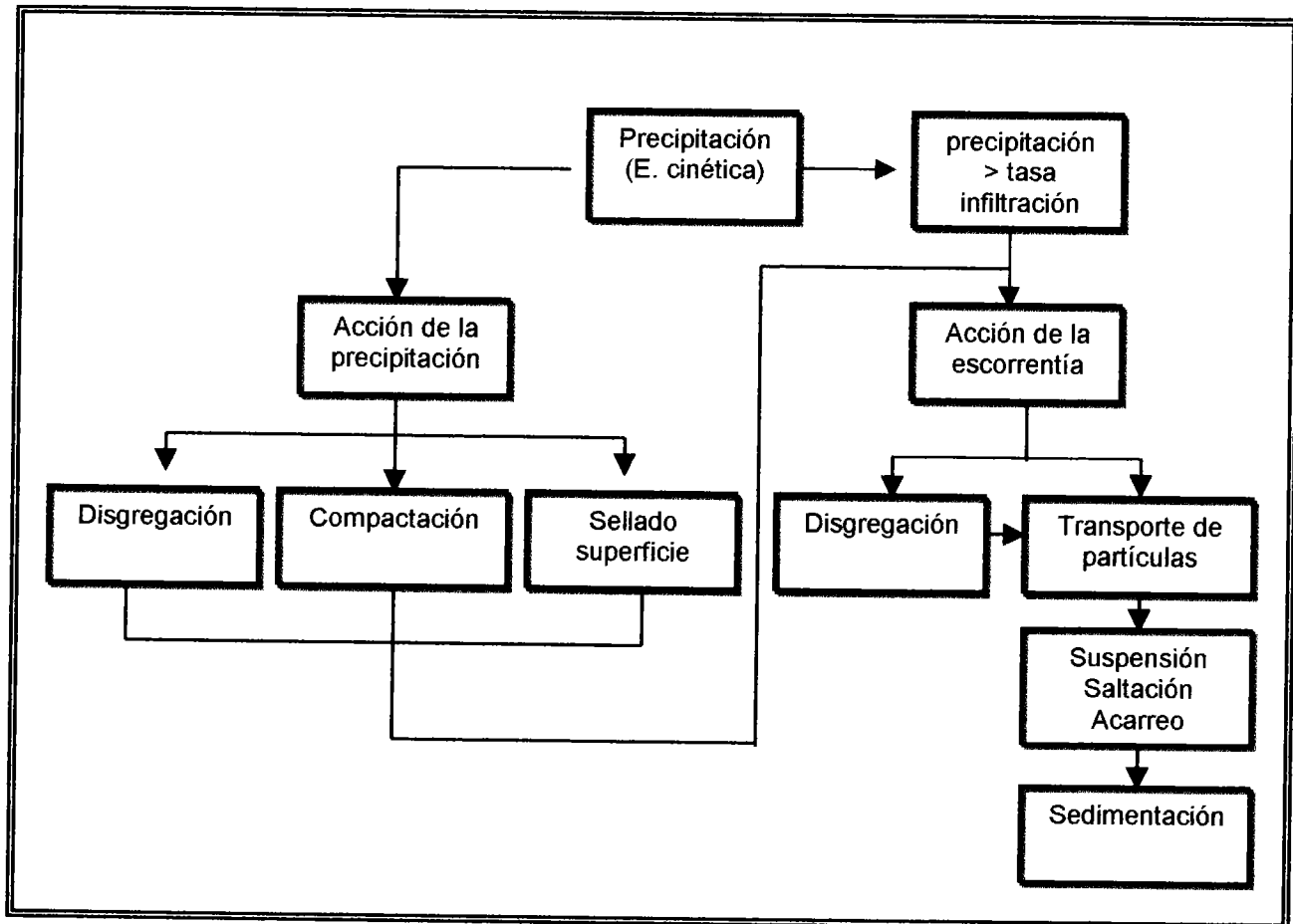
Las propiedades físicas, químicas y la composición granulométrica influyen en la capacidad de infiltración y la resistencia del mismo al desprendimiento y transporte por la escorrentía. La cantidad de tierra desplazada por la percusión de las gotas de lluvia, es tanto más grande cuanto más susceptibles sean las partículas a disgregarse (García, 1999).

d) *Vegetación*

La cubierta vegetal del suelo que lo protege contra la energía cinética de la lluvia o la escorrentía superficial, influye considerablemente en la erosión. Muchos estudios han demostrado que la relación no es lineal, produciéndose incluso una reducción sustancial de la erosión, cuando el suelo está protegido por una cubierta vegetal de densidad relativamente baja (FAO, 1997).

García (1999), señala que la presencia de una buena capa de vegetación sirve para proteger la superficie del suelo del impacto del agua, sea de la lluvia o de la escorrentía, debido a que:

- ✓ Intercepta y absorbe la energía de las gotas de la lluvia por las hojas y los residuos (hojarasca) de las plantas.
- ✓ Incrementa la capacidad de infiltración y almacenamiento del agua de lluvia debido al mejoramiento de la estructura y porosidad del suelo por las raíces y los residuos de las plantas.
- ✓ Reduce la velocidad del agua de la escorrentía por el colchón de los residuos de las plantas. En zonas arboladas los obstáculos que se oponen al escurrimiento, debido a los fustes de los árboles y tallos de los arbustos, reducen las velocidades del escurrido.



**FIGURA 2:** Proceso de erosión hídrica.  
Fuente: Elaboración propia, en base a Cuitiño (1999).

## 4.2.- Formas de Erosión Hídrica.

### 4.2.1.- Erosión laminar.

Consiste en la remoción de capas delgadas y más o menos uniformes de suelo sobre toda un área. Es la forma menos notable del flagelo y, por lo mismo, la más peligrosa (Suárez, 1980). La existencia de esta forma de erosión, crea una situación propicia para la formación de surcos y erosiones más profundas (García, 1999).



Según García (1999), la erosión laminar resulta de la disgregación de los elementos terrosos por el impacto de las gotas de lluvia y por la acción del escurrido. La formación de un flujo superficial homogéneo en el espacio, transporta las partículas de tierra previamente disgregadas. La erosión laminar, causa grandes aportaciones de sedimentos a los cursos de agua y además de una importante pérdida de fertilidad de los terrenos, al afectar las partículas de tierras más finas. Se puede identificar mediante los siguientes síntomas:

- Existencia de plantas con el sistema radicular al descubierto.
- Presencia de montículos de suelo.
- Invasión de especies vegetales específicas de suelos degradados.
- Abundancia de piedras en la superficie del suelo de naturaleza litológica análoga a la que se encuentra en el interior.

#### **4.2.2.- Erosión por surcos o en regueros.**

Ocurre cuando por pequeñas irregularidades en la pendiente del terreno, la escorrentía se concentra en algunos sitios hasta adquirir volumen y velocidad suficientes para hacer cortes y formar canalículos que se manifiestan en el terreno orientados perpendicular a las curvas de nivel (Suárez, 1980).

#### **4.2.3.- Erosión en barrancos o cárcavas.**

Se presenta generalmente cuando hay una gran concentración de la escorrentía en determinadas zonas del terreno y se permite que año tras año vayan ampliándose los surcos formados por la acción de esas corrientes de gran volumen y velocidad (Suárez, 1980).

La forma del barranco evoluciona según la consistencia relativa que ofrezcan los diferentes estratos del suelo y subsuelo (García,1999).

#### **4.3.- Erosión de suelos en Chile.**

Debido a la conformación geográfica, y el régimen pluviométrico que tiene Chile, la erosión hídrica, es una de las formas más importantes de degradación del suelo. El hecho de que un gran porcentaje de las lluvias precipiten en invierno, cuando el suelo está descubierto, unido a las malas prácticas de cultivo, provoca importantes daños erosivos (INIA, 2001).

La distribución de las tierras erosionadas en el país no es regular, siendo posible encontrar áreas escasamente erosionadas, así como sectores en los cuales las pérdidas físicas de suelo, como de capacidad productiva, son prácticamente irrecuperables (CONAMA, 1994).

Francke (1996), señala que entre los problemas ambientales de Chile, los procesos erosivos, constituyen desde el punto de vista ambiental y probablemente en términos socioeconómicos, los de mayor relevancia en el sector silvoagropecuario.

CONAMA (1994), señala que los problemas más importantes de degradación por erosión del recurso suelo en el sector silvoagropecuario, se encuentran en la zona altiplánica, cordones y sierras andinas en el Norte chico; en la Cordillera de la Costa, entre Valparaíso y Concepción, en la zona centro sur de la precordillera andina, lomajes del llano central al sur del río Ñuble y en la estepa patagónica.

De acuerdo a Álvarez (1986), es necesario estimar una dinámica erosiva tanto para prevenir un deterioro por un uso que se proyecta realizar, como para definir el tipo y la intensidad de los tratamientos necesarios para la restauración hidrológica de una cuenca.

#### 4.3.1.- Estudios sobre estimación de erosión en Chile.

Infante (1985), citado por Mancilla (1996), utilizó parcelas de escurrimiento para evaluar la erosión hídrica en la provincia de Valdivia, X Región. Los valores de pérdidas de suelo fueron de 1,6 ton/ha para una superficie sin cobertura vegetal, 0,13 ton/ha para superficie cubierta con vegetación natural, 0,075 ton/ha cuando la superficie está cubierta por pino joven y 0,07 ton/ha, con superficie cubierta con pino adulto, con un 30 % de pendiente.

Mancilla (1995), citado por Mancilla (1996), en un estudio en el fundo “Los Barros”, VII Región, emplea parcelas de escurrimiento de 5 m<sup>2</sup>, y determina valores de pérdidas de suelo bajo diversas cubiertas arbóreas, las cuales fueron de 0,17 ton/ha/año para una cubierta con *Pinus radiata* D. Don de 13 años; 0,96 ton/ha/año para *Pinus radiata* D. Don de 23 años y 0,68 ton/ha/año para renoval de roble de 15 a 25 años.

Álvarez (1986), utilizando la USLE, determinó que las pérdidas de suelo en una cuenca abastecedora de agua potable al pueblo de Florida VIII región, donde se taló un bosque de pino para aumentar el caudal, con quema de deshechos y con sobrepastoreo posterior, era del orden de 158,1 ton/ha/año en promedio, para tres años de observaciones.

Álvarez (1989), citado por Carrasco (1994), utilizando la USLE, obtiene pérdidas del orden de 26,2 ton/ha/año, 69,1 ton/ha/año y 121,9 ton/ha/año en terrenos de la serie Nahuelbuta, quemados, con pendientes del 20%, 40% y 60% respectivamente y para una longitud de ladera de 100 metros.

Pizarro (1988), utiliza la metodología de Fournier y Djorovic respectivamente, para determinar pérdidas de suelos con datos de la cuenca de Monte Patria, IV Región, para el año 1984. La pérdida de suelo utilizando la metodología de Fournier fue de 80,97 ton/ha/año (valor promedio para varios años de una serie de precipitaciones) y de 9,01 ton/ha/año utilizando Djorovic. La gran diferencia entre los valores obtenidos se atribuye a

que el método de Fournier sobrestima los valores de pérdidas, en tanto que el método de Djorovic se acerca más a la realidad. El estudio indica además, que es necesario realizar investigaciones que permitan calibrar estos modelos a las distintas condiciones físicas para obtener estimaciones de mayor confiabilidad.

Cuitiño (1999), utilizó clavos de erosión, para cuantificar la erosión hídrica (evaluación cuantitativa) en suelos desnudos de la precordillera andina y valle central de la VII Región. Para el sector precordillerano (Predio Picazo), estima una erosión neta en el orden de 31,6 ton/ha. En cuanto al sector del valle central (Predio Panguilemo), estima una erosión neta de 26,4 ton/ha.

Díaz (1986), determinó el índice de erosión pluvial para la cuenca el Olivar, V Región, para el periodo comprendido entre los años 1974 a 1983; el factor de erosión pluvial R anual resultante fue de 60,16 ( $J \cdot \text{cm}/(\text{m}^2 \cdot \text{hora})$ ).

Por lo señalado anteriormente, se concluye que es necesario aumentar y mejorar los estudios referentes a la problemática de la erosión, calibrando o validando los métodos de predicción a las condiciones del país o implementando modelos propios, incluyendo una unión de criterios en las metodologías utilizadas para este fin.

#### **4.4.- Modelos de Evaluación de la Erosión Hídrica.**

Según García (1999), hay tres grandes bloques de estudio de la erosión: la modelización, los referidos a escalas de tiempo geológico y los referidos al estudio del fenómeno, sus factores, formas y técnicas de control.

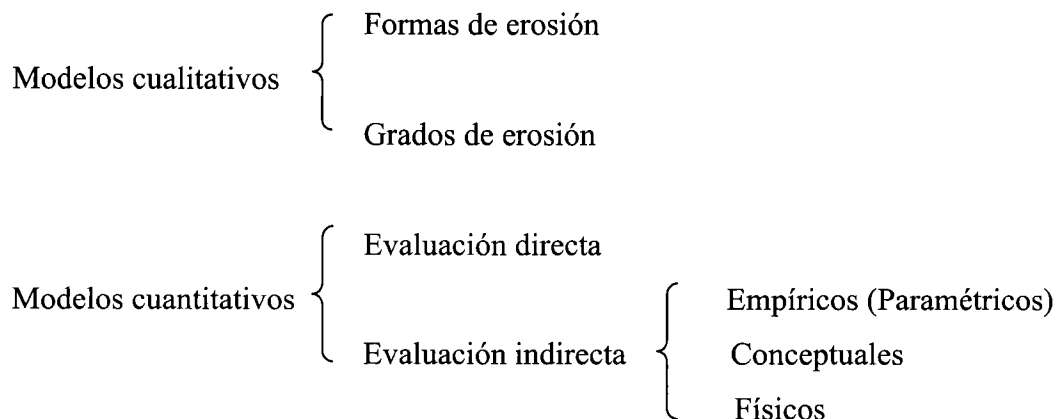
Por su capacidad de aplicación a diferentes áreas, el uso de modelos es la metodología menos costosa para el estudio de la erosión, y puede ser de extrema utilidad para evaluar el impacto de las técnicas de conservación de suelos y aguas (Bork, 1991; citado por FAO, 1994).

La modelización de los procesos erosivos se basa en la obtención de algoritmos matemáticos que describan la disgregación, el transporte y la deposición de los materiales en la superficie (García,1999).

Según Lal, R. (1996), citado por García (1999), hay tres razones básicas para la modelización de los procesos de erosión:

- a) Se pueden utilizar como herramientas de predicción en la evaluación de las pérdidas de suelo, en la planificación de la conservación de suelos, en los proyectos de planificación, en inventarios de zonas erosionadas, etc.
- b) Los modelos matemáticos con base física, a través de distintos soportes informáticos, pueden predecir dónde y cuando ocurre la erosión, por lo tanto, ayudan al planificador en la tarea de reducir la erosión y,
- c) Se pueden utilizar como meras herramientas que ayuden a comprender los procesos erosivos y sus interacciones, estableciendo las prioridades para futuras investigaciones.

Según García (1999), en cuanto a los tipos de modelos, se puede establecer la siguiente clasificación:



#### 4.4.1.- Modelos cualitativos.

Este tipo de modelos tiene por objetivo la estimación de la erosión actual, acudiendo directamente a las laderas, reconociendo las distintas formas de erosión y de sedimentación y estimando el grado de erosión mediante la ponderación de los factores de los que depende (MOPU, 1984).

En este tipo de métodos una herramienta fundamental la constituye la cartografía de las unidades homogéneas, en función de los parámetros principales que controlan el fenómeno erosivo (suelo, vegetación, topografía, etc.) y la atribución de categorías, niveles o clases en los que la subjetividad juega un papel importante (García, 1999).

Morgan y Nalepa (1982) citados por García (1999), señalan que la fotografía aérea métrica en blanco y negro proporciona muy buenos resultados como fuente de información básica, como tipo de vegetación, prácticas de conservación de suelos, análisis temporal del cambio de cultivos y de forma más general, la elaboración de cartas de erosión.

En este mismo contexto, la fotografía infrarrojo color así como las imágenes enviadas por satélites artificiales, son otras herramientas de gran valor para el estudio cualitativo de la erosión (García, 1999). Este autor también señala, que debido a la gran cantidad de información que se maneja y su puesta al día, se hace necesario el empleo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como una herramienta idónea en la evaluación cualitativa de la erosión.

#### **4.4.2.- Modelos cuantitativos.**

En este tipo de modelos, como anteriormente se mostró en el esquema, se diferencian los de evaluación directa y los de evaluación indirecta, donde éstos últimos son los de mayor aplicación en la actualidad (García, 1999).

##### **4.4.2.1.- Modelos de evaluación directa.**

En cuanto a los modelos de evaluación directa, los más conocidos son las parcelas de escurrimiento y las parcelas con clavos de erosión. Las parcelas de escurrimiento involucran la captación del caudal líquido y sólido, pero son difíciles de implementar por costos y tecnología. Las parcelas con clavos de erosión son sencillas de aplicar y presentan un alto grado de precisión (Cuitiño, 1999).

#### 4.4.2.2.- Modelos de evaluación indirecta.

Se dividen en tres tipos:

##### i.- Modelos físicos

Para García (1999), estos modelos representan una síntesis de los componentes individuales que afectan a la erosión, incluyendo las complejas interacciones de los diversos factores que intervienen, así como su variabilidad espacial y temporal.

Uno de los modelos que se puede citar de este tipo es el Water Erosion Prediction Project (WEPP); este modelo tiene como objetivo general, crear una nueva generación de tecnología para predecir la erosión del suelo por el agua mediante el uso de ordenadores. Trata de analizar el problema de la erosión desde un punto de vista físico y descriptivo matemáticamente, y para ello parte del planteamiento inicial propuesto por Meyer y Wischmeier (1969), donde se diferencia la acción de la gota de lluvia y la acción de la escorrentía, su capacidad de remoción del suelo y su capacidad de transporte (factores activos de la erosión); y por otra parte, las características del suelo en cuanto a su vulnerabilidad a ser disgregado, removido y a ser transportado (factores pasivos de la erosión) (Tragsa, 1994).

El WEPP, actualiza las características de plantas y suelos que son importantes para el proceso de erosión en base diaria. Cuando se predice que ocurrirá escurrimiento, el modelo computa desprendimiento de suelo, transporte y deposición en puntos espaciados frecuentemente a lo largo del perfil de la pendiente y también en canales y pequeños embalses, dependiendo de la versión que se use (Jones *et al*, citado por FAO, 1994).

FAO (1994), señala que hay tres versiones de modelos WEPP: una versión de perfil de pendiente, una versión de cuenca, y una versión de red de celdas.



La versión de perfil está diseñada para reemplazar a la USLE, con la capacidad añadida de estimar la deposición de sedimento en una pendiente. La versión de cuencas está diseñada para simular una cuenca; incluye la versión de perfil para estimar el transporte de sedimento hacia canales, y computa el transporte, deposición y desprendimiento en pequeños canales. Por último, la versión de red de celdas, calcula la carga de sedimento desde el área en que ha sido dividida dentro de la red de celdas. La versión de perfil opera en cada una de estas celdas y, con la versión de red de celdas, representa el transporte y la deposición en el sistema cauce dentro del área de interés (Laflen *et al*, 1991). Este mismo autor, señala que el modelo WEPP ha sido fuertemente criticado, por ser de difícil aplicación en las nuevas técnicas de cultivo y manejo.

## **ii.- Modelos conceptuales**

Se basan en la integración de modelos hidrológicos, modelos de erosión y modelos de transporte de sedimentos, con el fin de obtener la emisión de sedimentos a la salida de una cuenca hidrológica (García, 1999).

## **iii.- Modelos paramétricos**

Se basan en la lógica inductiva y generalmente se aplican en aquellas condiciones en las que han sido calibrados (García, 1999). Estos modelos son poco útiles si no son adecuadamente calibrados y validados para las condiciones locales, particularmente los métodos más empíricos como la USLE (Wischmeier *et al*, 1978).

### ➤ **La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE).**

La ecuación universal de pérdidas de suelo, es un modelo estadístico, que consiste en una regresión múltiple de los cinco factores más importantes que intervienen en el proceso erosivo: el clima, el suelo, la pendiente, el uso del suelo y las prácticas de conservación. Estos factores representan las variables independientes de la regresión. La

multiplicación lineal de éstos, arroja una tasa de pérdidas de suelo anual en un área determinada, que generalmente se expresa en ton/ha/año, y que constituye la variable dependiente de la regresión (FAO, 1994).

La USLE, fue desarrollada en el departamento agrícola de los Estados Unidos (USDA) a mediados de la década del 50, siendo la ecuación más usada para determinar la pérdida media anual del suelo, dependiendo del régimen pluviométrico, de las características del suelo, de la morfología del terreno, de la cubierta vegetal y de las prácticas conservacionistas (Manfredini, 1998).

Dada la aparente facilidad de aplicación de esta ecuación, se propuso la ampliación de su utilización a pequeñas cuencas que tuvieran unas condiciones relativamente homogéneas de clima, suelo, relieve y vegetación, haciendo extrapolable la información procedente de las parcelas agrícolas a dichas cuencas ( Williams *et al*, 1977). No obstante, la progresiva ampliación del ámbito de aplicación de la USLE, ha llevado a que en muchas ocasiones, esta ecuación no se haya aplicado adecuadamente (Wischmeier, 1978).

Sucesivos trabajos y ampliaciones de las series de datos experimentales, dieron lugar a la formulación de la USLE en su última versión, sobre la que posteriormente a su vez se han hecho modificaciones respecto a la forma de evaluación de algunos de sus parámetros (Wischmeier *et al*, 1978). Entre estos cambios, se encuentra la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada (MUSLE), establecida por Williams en 1975, y la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada (RUSLE), a la cual se han realizado correcciones a determinadas carencias presentes en el modelo original (Lane *et al*, 1989; citado por García, 1999).

La MUSLE, fue adaptada a pequeñas cuencas con el fin de predecir los sedimentos aportadas por las mismas, para un aguacero único (Manfredini, 1998).

Por otra parte, el modelo RUSLE se ha aplicado en algunos lugares de Canadá y ha tenido usos significativos en los Estados Unidos, especialmente en Mississippi (Keith *et al*, 1998). Para el uso de la RUSLE en Canadá ha tenido que adaptarse a las diversas condiciones encontradas en varias regiones agrícolas de este país (Pared *et al*, 2002).

La característica más notable de los cambios que ha sufrido la USLE, es la informatización. De esta manera, cada factor queda determinado recurriendo a las bases de datos integradas en el programa informático en el que se apoya (USDA, 2001).

A pesar de la serie de mejoras que ha sufrido la USLE, siempre habrá un lugar para usar esta ecuación en su función original, o sea, proporcionar información para orientar la planificación del uso de la tierra, debido a su simplicidad y facilidad de aplicación (FAO, 1997).

La expresión de la ecuación universal de pérdidas de suelos viene dada por:

$$A = R * K * LS * C * P.$$

Donde:

A: representa el valor promedio de las pérdidas de suelo anuales (ton/ha año).

R: es una medida de las fuerzas erosivas de las precipitaciones ( $J * cm / (m^2 * hora)$ ).

K: es el factor de erosionabilidad del suelo ( $ton * m^2 * hora / (ha * J * cm)$ ), es decir, una cifra que refleja la susceptibilidad de un tipo de suelo a la erosión, o sea, la recíproca de la resistencia del suelo a la erosión.

LS: es el factor topográfico que combina el factor longitud de pendiente (L) y el factor pendiente (S) y comparan la pérdida de suelo con la de un campo de una longitud y pendiente estándar.

C: es un factor de 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, una relación que compara la pérdida de suelo con la de un campo al que no se aplica ninguna práctica de conservación.

Los factores de relieve, de cubierta vegetal y el de prácticas de conservación, son relaciones adimensionales, que permiten comparar el lugar que se está estudiando con condiciones estándar de la base de datos. Las condiciones estándar se refieren a las de una parcela de 22,1 metros de longitud de declive y 9% de pendiente, mantenida en barbecho continuo y laboreada siguiendo la línea de máxima pendiente (Manfredini, 1998).

La determinación de un índice que describa el efecto erosivo de las precipitaciones, constituye unos de los mayores problemas para el uso de la USLE. Este problema ha sido abordado durante años por distintos autores (Jordán *et al*, 2000).

Es así como, Wischmeier, el año 1959 recogía las experiencias realizadas por Laws y Ellison relativas a velocidades de caída e impactos de las gotas de lluvia y establece el índice de erosión pluvial, conocido también como factor R (García, 1999).

Según González del Tánago (1991), el índice de erosión pluvial R recoge la influencia que sobre la erosión tiene la energía cinética liberada por los aguaceros, (disgregando las partículas del suelo y compactando su superficie) y su intensidad máxima (determinando la aparición de escorrentía superficial cuando se supera la capacidad de infiltración). La energía cinética de la lluvia es función del tamaño dominante de las gotas de agua, que a su vez está relacionado con la intensidad de la lluvia.

Un aspecto importante del factor R es su distribución a lo largo del año, que puede expresarse en porcentajes acumulados del valor de R anual, para cada mes. Con esta distribución, se pueden detectar los periodos de mayor riesgo de erosión en cuanto a las precipitaciones, en los que es conveniente lograr que la vegetación presente su máxima cobertura o desarrollo sobre el suelo, estableciendo la rotación de cultivos, el manejo de la vegetación permanente o la planificación de obras de aprovechamientos, etc.

De todos los factores que la USLE contempla, quizás el de erosividad R, ateniéndose a los datos de pluviógrafos disponibles, es el que puede calcularse con mayor precisión (González del Tánago, 1991). No obstante, es un parámetro difícil de estimar a escala de detalle, debido a la falta de una base de datos amplia de los registros pluviométricos, suficientemente densa o antigua (Jordán *et al*, 2000).

Según Jordán *et al* (2000), diversos autores han intentado relacionar el factor R con parámetros más fáciles de obtener y calcular. Con este propósito, Fournier (1960) estableció el índice de agresividad climática o Índice de Fournier (IF), que muestra una alta correlación con la cantidad de sedimentos arrastrados por la escorrentía.

El cálculo del IF se realiza a partir de los datos pluviométricos de estaciones meteorológicas representativas, según la siguiente ecuación:

$$IF = \frac{(P_{\max})^2}{P_m}$$

Donde:

IF : Índice de Fournier.

$P_{\max}$  : Precipitación correspondiente al mes más lluvioso del año i (mm).

$P_m$  : Precipitación media anual (mm).

Sin embargo, para emplear el IF como indicador de la erosividad pluvial deben tenerse algunas restricciones. Así, entre otros aspectos, es necesario considerar que en zonas cuyo régimen pluvial presenta más de una máxima mensual de precipitación, o donde los valores pluviométricos son en general elevados, el IF sólo considera el mes de mayor precipitación, despreciando los valores del resto de los meses (Jordán *et al*, 2000).

De lo expuesto anteriormente, Arnoldus (1978) citado por Jordán *et al* (2000), propuso una corrección del IF, en la que se consideran no sólo la precipitación mensual del mes más húmedo, sino también la del resto de los meses. Esta corrección o índice modificado de Fournier, se calcula de la siguiente forma:

$$\text{IMF}_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} (P_{ij})^2}{P_m}$$

Donde:

IMF : Índice modificado de Fournier.

$P_{ij}$  : Precipitación mensual del mes  $i$  (mm), del año  $j$ .

$P_m$  : Precipitación media anual.

Renard *et al* (1993), citados por García (1999), en Estados Unidos presentaron las ecuaciones que relacionan el índice R con las precipitaciones anuales y el índice Fournier ( $R = 0,0048P^{1,61}$  y  $R = 0,074IF^{1,85}$ ) para distintas zonas climáticas. Estas ecuaciones presentaron altos coeficientes de determinación (0,81), sin embargo, presentan errores estándar altos, por lo que es conveniente mejorar la estimación.

Finalmente, Jordán *et al* (2000), señalan que diversos autores han comprobado en algunos países, que el IMF se correlaciona mucho mejor que el índice de Fournier con el valor del índice de erosividad pluvial de la USLE.

## **5.- METODOLOGÍA.**

La metodología a emplear en este estudio fue dividida en dos partes. La primera contempla el método que se utilizó para el cumplimiento de los objetivos planteados y en la que se distinguen 8 fases de trabajo. Los materiales, equipos y programas computacionales que se utilizaron en el estudio, se mencionan en la segunda parte.

### **5.1.- Fases de Trabajo.**

#### **5.1.1.- Revisión bibliográfica.**

La revisión bibliográfica contempló la recopilación de información referente al tema, basándose en textos especializados en hidrología y en uso y conservación de suelos. Además, como complemento, se utilizó información recolectada de Internet.

Es importante mencionar que para el capítulo 6, fue necesario apoyarse de información extraída de textos especializados de estadística.

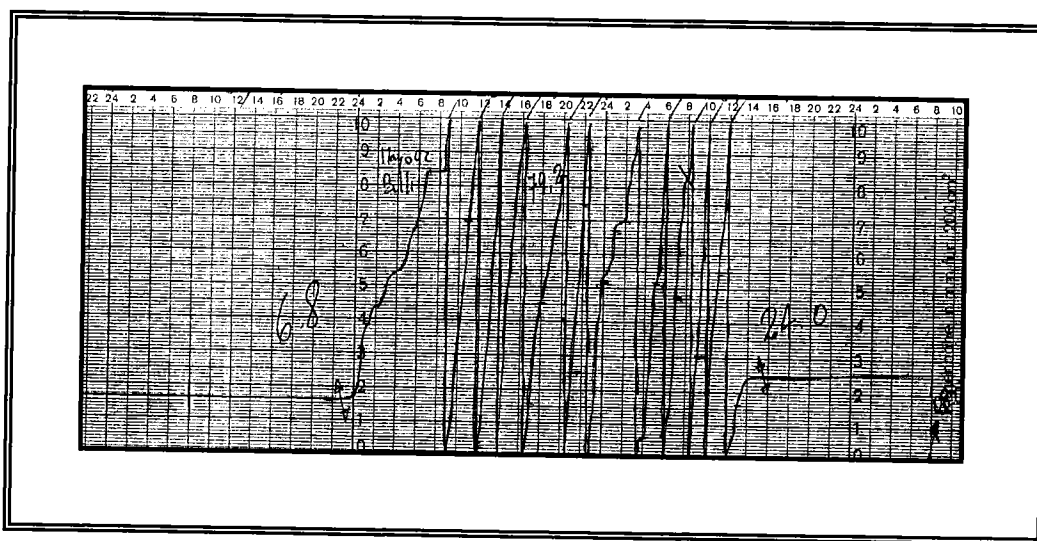
#### **5.1.2.- Obtención de la información.**

La información necesaria para la elaboración de esta memoria fue aportada por la Dirección General de Aguas de Talca, y por la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Talca. La información corresponde a las bandas pluviográficas y a los datos pluviométricos, con los registros de las precipitaciones horarias y diarias, para las estaciones pluviográficas de la Universidad de Talca y Embalse Bullileo de la Séptima Región.

Para la elección de las estaciones, se tomó como criterio la cantidad y periodicidad de los datos y además la ubicación e importancia de la estación en la Región. Se consideró para este caso trabajar con 12 años de registro para la estación de Talca y de 16 años de registro para la estación de Bullileo.

Las bandas de pluviógrafo consisten en un papel que posee el instrumento, en el cual se registran las precipitaciones por medio de una plumilla inscriptora (ver figura 3).

El movimiento de la plumilla, se transmite por una varilla unida al flotador del pluviógrafo, que se levanta cuando la lluvia fluye al interior del recipiente que contiene al flotador. Combinando el movimiento de la plumilla con el movimiento uniforme del papel, resulta una curva, cuya inclinación depende de la intensidad instantánea de la lluvia. Después de una determinada cantidad de precipitación recibida, la plumilla llega al borde superior del diagrama, el cual va adosado a un tambor de relojería. Luego, el recipiente se vacía rápidamente a través de un sifón convenientemente dispuesto, la plumilla baja y el juego puede empezar de nuevo. Cada caída del flotador queda registrado en el diagrama con una interrupción vertical.



**FIGURA 3:** Banda de Pluviógrafo.



### 5.1.3.- Selección y cálculo de las intensidades.

A través del análisis de las bandas de registro de los pluviógrafos, se determinaron las alturas de precipitación, desplazándose en intervalos de tiempo de una hora; luego se tomó cada uno de estos valores y se dividieron por su duración (1 hora), obteniéndose así, las intensidades en cm/ hora. De igual forma se realizó esto para la obtención de la máxima intensidad en 30 minutos, es decir, los intervalos de tiempo de desplazamiento en la banda fueron cada media hora, seleccionándose la máxima intensidad, que se utilizó para la determinación del factor R de cada aguacero, por el método planteado en la USLE.

De acuerdo a López (2001)<sup>1</sup>, para la elección de las intensidades y aguaceros de una serie de datos disponibles, se pueden aplicar diferentes criterios. Para el cálculo del factor R de este estudio, se consideraron los siguientes criterios:

- ✓ Se utilizaron en el cálculo del factor R las intensidades de precipitación igual y superiores a 1,0 mm/h.
- ✓ Se consideró como tiempo mínimo 1 hora de precipitación, para ser considerada como aguacero.
- ✓ Cuando se detectaron tiempos aceptados como aguacero, se eliminaron aquellas precipitaciones poco concentradas (precipitaciones menores a 1,0 mm).
- ✓ Una vez detenidas las precipitaciones (consideradas como aguacero), y transcurrido un lapso de 24 horas sin precipitar, la precipitación siguiente se consideró como otro aguacero.

---

<sup>1</sup> López Cadenas de Llano Filiberto. Profesor Emérito E.T.S. de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid, España.

#### 5.1.4.- Determinación del índice de erosividad pluvial R.

Con la determinación de las intensidades, tanto para cada hora como para la intensidad máxima en 30 minutos, se pudo obtener el índice de erosividad de la lluvia de la ecuación universal de pérdidas de suelo.

Este índice, se obtuvo calculando la energía cinética de cada aguacero que se calcula por la siguiente expresión:

$$E = 210,2 + 89 \log_{10} I$$

Siendo:

E : Energía cinética del aguacero (joule\*m<sup>-2</sup>\*cm<sup>-1</sup>).

I : Intensidad de la lluvia en el periodo considerado (cm\*hora<sup>-1</sup>).

El índice de erosividad pluvial en tanto, está definido por:

$$R = \left[ \frac{\sum_{j=1}^n (210,2 + 89 * \log_{10} I_j) * (I_j * T_j) * I_{30}}{100} \right]$$

Donde:

R : Es el índice de erosión pluvial (joule\*m<sup>-2</sup>\*cm\*hora<sup>-1</sup>).

T<sub>j</sub> : Periodo de tiempo en horas para intervalos homogéneos de lluvia durante el aguacero.

I<sub>30</sub> : Máxima intensidad de lluvia durante el aguacero (cm\*hora<sup>-1</sup>).

j : Intervalos homogéneos del aguacero.

n : Número de intervalos.

En esta investigación, se trabajó con valores del índice R a nivel mensual. Para esto, se calculó el valor de R de cada aguacero en un mes; posteriormente se calculó el R de ese mes, como la suma de los R de cada aguacero ocurridos en el mes. Se repitió este cálculo para todos los meses de los años considerados. El factor R anual, es la suma de todos los R mensuales ocurridos en el año; posteriormente, a través de la media aritmética de los R anuales, se obtiene el factor R medio anual del periodo de años considerado para cada estación.

#### **5.1.5.- Método alternativo para la obtención del índice de erosión pluvial R.**

Como se citó al final del capítulo anterior, se ha intentado relacionar el factor R con parámetros más fáciles de estimar, como lo es el índice de Fournier, que se expresa de la siguiente forma:

$$IF = \frac{(P_{\max})^2}{P_m}$$

Donde:

IF: Índice de Fournier.

$P_{\max}$ : Precipitación correspondiente al mes más lluvioso del año  $i$  (mm).

$P_m$ : Representa la precipitación media anual (mm).

En esta misma línea de investigación, Arnoldus (1978), propone una corrección al IF, en el que comprueba que existe una mayor correlación del factor R con el índice modificado de Fournier que con el índice de Fournier tradicional. Este índice modificado viene dado por la siguiente expresión:

$$\text{IMF}_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} (P_{ij})^2}{P_m}$$

Donde:

IMF: Índice modificado de Fournier.

$P_{ij}$ : Precipitación correspondiente al mes  $i$  (mm) del año  $j$ .

$P_m$ : Representa la precipitación media anual (mm).

Por el hecho de trabajar con dos estaciones se obtuvo un bajo número (28) de IF e IMF respectivamente, para el número de años considerado. Según Flores (2002)<sup>2</sup>, para efectuar un modelo de regresión y mejorar la estimación de los parámetros poblacionales, es conveniente utilizar una base de datos amplia. Así también, para detallar más la información y ver el comportamiento mensual, los índices medidos anualmente se modificaron a mensuales (ver anexo I), mediante la siguiente fórmula:

$$\text{IFm} = \frac{(P_i)^2}{P_m}$$

Donde:

IFm: Índice de Fournier a nivel mensual.

$P_i$ : Precipitación correspondiente al mes  $i$  (mm).

$P_m$ : Representa la precipitación media anual (mm).

Con el índice de Fournier mensual, se generaron funciones que relacionan el factor R con este índice. Así, se pudo evaluar y ajustar un modelo de regresión ( $R = f(\text{IFm})$ ), adecuado para las dos estaciones en estudio.

La obtención de un modelo de regresión convenientemente ajustado, que relacione los dos factores señalados en el párrafo anterior, facilita la estimación del factor R con

respecto a su forma de cálculo tradicional y, al mismo tiempo, se prescinde del uso de datos pluviográficos de dificultosa lectura.

### 5.1.6.- Diferenciación en meses secos y húmedos.

Otro aspecto metodológico utilizado, consistió en diferenciar la información recolectada en meses húmedos y meses secos. En primera instancia, se pensó en diferenciar la información separándolos a través de la media, pero debido a la presencia de valores extremos (valores de precipitación muy altos), este método de centralización, no dice mucho con respecto a la tendencia central.

Montgomery (1996), señala que ante la presencia de valores extremos, el mejor método de centralización es la mediana, ya que ésta no tiene mucha influencia sobre tales valores. De acuerdo a lo anterior, se separó la información a través de la mediana, en donde el 50% de los valores más bajos de precipitación corresponde a meses secos y el 50% de los valores mayores se consideró como húmedos (ver anexo II). Hay que destacar que esta diferenciación se realizó a las dos estaciones por separado.

La mediana para un conjunto de datos se define de la siguiente forma:

$$\text{Si } n \text{ es par} \Rightarrow \text{Mediana} = [X_{(n/2)} + X_{((n/2) + 1)}]/2$$

$$\text{Si } n \text{ es impar} \Rightarrow \text{Mediana} = X_{((n + 1)/2)}$$

Donde:

$X_{n/2}$ : Es la  $n/2$  – ésima observación central de una muestra de tamaño  $n$ , siendo  $n$  un número par.

$X_{((n + 1)/2)}$ : Es la parte media de una muestra de tamaño  $n$ , cuando  $n$  es impar.

---

<sup>2</sup> Flores D. Esteban. PhD. Profesor del Departamento de Economía y Finanzas de la Facultad de Cs. Empresariales de la Universidad de Talca.

### 5.1.7.- Análisis estadístico

A través de diagramas de dispersión (R v/s IFm) y con los datos ya diferenciados, se pudo conocer el comportamiento de las variables involucradas en este estudio. De acuerdo a la gran diferencia en el comportamiento de los datos, proporcionados por las estaciones de Talca y Bullileo, se decidió junto al equipo de trabajo utilizar variables indicadoras.

#### 5.1.7.1.- Las variables indicadoras

En el análisis de regresión las variables cuantitativas son las más conocidas, pero además se pueden incluir en el análisis, variables que no pueden ser medibles, como por ejemplo zonas geográficas, el sitio, la exposición, etc. Estas variables son llamadas indicadoras, dicotómicas o cualitativas. Estas variables asumen el valor uno (1) cuando la observación cumple con la característica y, el valor (0), cuando no la cumple (Cid, 1990).

El uso de las variables indicadoras, tiene como ventaja el unir distintas regresiones para cada cualidad en una sola regresión. Además, esta técnica de unir la información, incrementa los grados de libertad para la estimación de los parámetros poblacionales y, por lo tanto, mejora la estimación relativa de las estimaciones (Gujarati, 1992).

Una regresión con una variable cuantitativa y una cualitativa con dos clases o categorías, queda expresado por el siguiente modelo:

$$R = \alpha_0 + \alpha_1 * I + \beta_0 * IFm + \beta_1 * IFm * I$$

Donde:

- R = Variable dependiente
- $\alpha_0$  = Coeficiente de intercepción
- $\alpha_1$  = Coeficiente de intercepción diferencial
- $\beta_0$  = Coeficiente de pendiente
- $\beta_1$  = Coeficiente de pendiente diferencial
- IFm = Variable explicativa
- I = Variable indicadora  
(0, categoría base; 1, segunda categoría)

El modelo anterior, puede presentar cuatro diferentes situaciones, dependiendo si los coeficientes diferenciales toman valores distintos de cero (ver Anexo III).

En este estudio, se utilizó como variable indicadora la ubicación geográfica, considerando arbitrariamente como categoría base (0) a la estación de Talca, y con la otra categoría (1), se asoció a la Estación de Bullileo. Así, se obtuvieron 2 modelos de regresión, uno para los meses secos y otro para los meses húmedos, y de esta forma, se pudo encontrar la relación existente entre el factor R y los registros mensuales del índice de Fournier.

#### **5.1.7.2.- Medidas de bondad de ajuste**

Mediante el Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), se determinó la bondad del ajuste a cada función de regresión modelada. Este coeficiente representa el porcentaje de variación de los datos reales que es explicado por el modelo. Para la elección del modelo, se basó en que éste tuviese un  $R^2$  alto y un bajo error estándar de la estimación (E.E.E.) y, que además cumpla con los supuestos de los estimadores de mínimos cuadrados.

### 5.1.7.3.- Análisis de regresión.

En cuanto a los coeficientes del modelo de regresión, las dójimas de hipótesis utilizadas para éstos, correspondieron a las siguientes:

- Dójima de hipótesis para las pendientes

H0: Pendiente = 0

Ha: Pendiente  $\neq$  0

- Dójima de hipótesis para los interceptos

H0: Intercepto = 0

Ha: Intercepto  $>$  0

Con nivel significancia  $\alpha = 0,05$

Por otra parte, al modelo escogido, se le evaluaron las hipótesis asociadas a los parámetros del modelo y los supuestos básicos del método de mínimos cuadrados. Esto es Normalidad, Homocedasticidad y no Autocorrelación. Estas evaluaciones comprendieron un análisis gráfico y un análisis matemático.

#### i.- Supuesto de Normalidad.

Para determinar si se cumple o no el supuesto de normalidad, se utilizaron las pruebas del Test de Kolmogorov – Smirnov y el Gráfico de Probabilidad normal de los residuos.



- **Test de Kolmogorov – Smirnov.**

El test de Kolmogorov – Smirnov, está basado en un estadístico que mide la desviación de la frecuencia acumulada con relación a la frecuencia teórica acumulada. Este test es válido únicamente para distribuciones continuas (Peña, 1995).

La hipótesis a docimar es la siguiente:

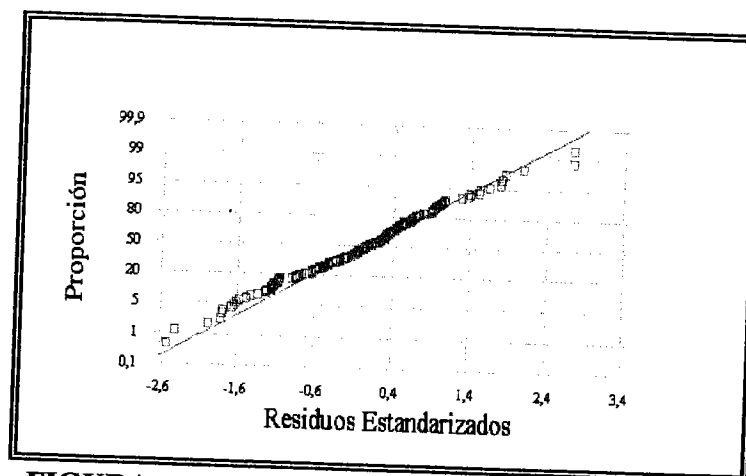
Ho: El ajuste cumple la condición de normalidad.

Ha: El ajuste no cumple la condición de normalidad.

Si el valor  $p > 0,05$  se acepta Ho, de lo contrario se acepta Ha.

- **Probabilidad normal de los residuos.**

Para verificar la normalidad de los residuos, es usual utilizar gráficos. Para este estudio se utilizó un gráfico de probabilidad de los residuos. Se prefirió utilizar esta gráfica, puesto que se visualiza mejor la distribución de los residuos (Montgomery *et al*, 1996). En la gráfica, los residuos deberían estar dispuestos homogéneamente sobre la recta para no rechazar la hipótesis nula, de modo que se asemeje a la Figura 4 (Vallejos, 1999).



**FIGURA 4:** Probabilidad normal de los residuos.

## **ii.- Supuesto de Homocedasticidad.**

El segundo supuesto a analizar del modelo clásico de regresión lineal, es de que las perturbaciones de la función de regresión poblacional sean homocedásticas, es decir, todas tienen la misma varianza (Gujarati, 1992). El análisis que se realizó para detectar la heterocedasticidad fue un método gráfico, en donde se graficaron los residuos estimados *v/s* el valor estimado de la variable dependiente.

Estando en presencia de heterocedasticidad, los estimadores de MCO, continúan siendo lineales, insesgados y consistentes, pero dejan de ser eficientes, es decir, no tienen varianza mínima, por lo que resulta no ser el mejor estimador (Gujarati, 1992).

Los gráficos utilizados (Residuos estimados *v/s* variable dependiente) para detectar la heterocedasticidad de los residuos, generalmente, tienen un aspecto similar a los cuatro patrones generales (ver anexo IV). El patrón “*a*” representa la situación ideal, mientras que los patrones “*b*, *c* y *d*” representan una desestabilización o heterocedasticidad de las varianzas de los residuos.

## **iii.- Supuesto de no Autocorrelación.**

El tercer supuesto a analizar del modelo de regresión lineal, es que no existe autocorrelación o relación serial entre las perturbaciones que entran en la función de regresión poblacional, es decir, no debe existir una correlación entre las perturbaciones de una serie de observaciones ordenadas en el tiempo. Este supuesto se evaluó a través del test *d* de Durbin - Watson, y por medio de una gráfica de los residuos *v/s* el tiempo.

- **Prueba de Durbin – Watson.**

La prueba  $d$  de Durbin – Watson, es una de las más utilizadas para detectar la presencia de autocorrelación. Este método da origen a tres regiones de decisión: una región de rechazo, una región de aceptación de la hipótesis nula y una región de indiferencia, en donde el método no es capaz de determinar la cantidad de evidencia en contra de la hipótesis alternativa.

El valor  $d$  viene dado por la siguiente expresión:

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (e_{t-1} - e_t)^2}{\sum_{t=2}^n (e_t)^2}$$

Donde:

$d$ : Valor de Durbin – Watson.

$e_t$ : Valores de los residuos observados.

$n$ : Número total de observaciones.

**TABLA 1:** Zonas de decisión de la prueba de Durbin – Watson.

Hipótesis Nula	Decisión	Si
No existe autocorrelación positiva	Rechazar	$0 < d < d_L$
No existe autocorrelación positiva	No hay decisión	$d_L \leq d \leq d_U$
No existe autocorrelación negativa	Rechazar	$4 - d_U < d < 4$
No existe correlación negativa	No hay decisión	$4 - d_U \leq d \leq 4 - d_L$
No existe autocorrelación positiva o negativa	No rechazar	$d_U < d < 4 - d_U$

$d$ : valor de Durbin – Watson;  $d_L$ : valor crítico inferior;  $d_U$ : valor crítico superior. ( Gujarati, 1992).

Según Gujarati (1992), la prueba  $d$  de Durbin – Watson tiene una gran desventaja cuando se cae en la zona de indecisión, en donde no se puede concluir si existe autocorrelación o no. El mismo autor sugiere que en el caso que el valor  $d$  estimado se encuentre en la zona de indecisión, se deben probar los siguientes test de hipótesis:

- ✓ **Si el valor estimado  $d < d_u$  ; rechazar  $H_0$  al nivel  $\alpha$**

$H_0: \rho = 0$  ; no hay autocorrelación positiva.

$H_a: \rho > 0$  ; hay autocorrelación positiva.

- ✓ **Si el valor estimado  $(4 - d) < d_u$  rechazar  $H_0$  al nivel  $\alpha$**

$H_0: \rho = 0$  ; no hay autocorrelación negativa.

$H_a: \rho < 0$  ; hay autocorrelación negativa.

- ✓ **Si el valor estimado  $d < d_u$  o  $(4 - d) < d_u$  ; rechazar  $H_0$  al nivel  $2\alpha$**

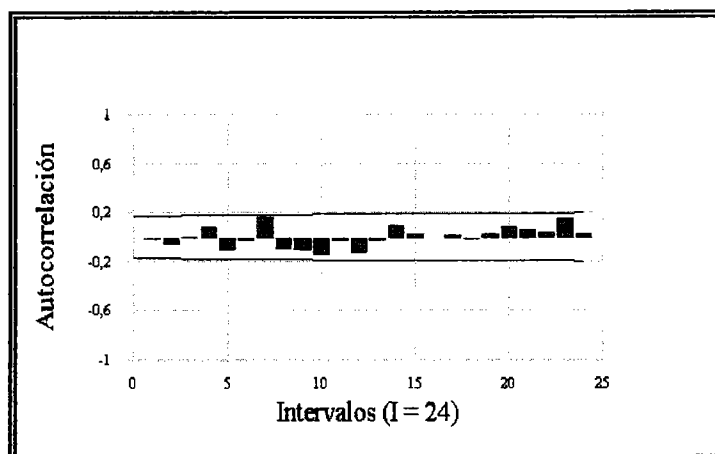
$H_0: \rho = 0$  ; no hay autocorrelación positiva o negativa.

$H_a: \rho \neq 0$  ; hay autocorrelación positiva o negativa.

Nota:  $\rho = 1 - (d/2)$ ; Gujarati, (1992);  $\alpha = 0,05$ .

- ***Gráfica de los residuos v/s tiempo.***

Esta prueba se basa en el análisis de una serie de tiempo, por medio de una gráfica entre los residuos obtenidos del ajuste de un modelo, y el tiempo. La figura 5 indica que existe un intervalo de confianza representado por una línea punteada, donde el número de frecuencias de los residuos está dado por “I” intervalos ( $I = 24$ ). La existencia de dos o más frecuencias fuera del intervalo, revela la presencia de autocorrelación, de lo contrario, no existe correlación serial en el modelo.



**FIGURA 5:** Gráfico de autocorrelación de residuos.

#### 5.1.7.4.- Corrección de Modelos.

Los modelos de regresión lineal que presentan problemas de heterocedasticidad, se pueden corregir a través de una transformación de raíz cuadrática o una transformación logarítmica de los datos. La elección de cualquier otra opción, dependerá de la naturaleza de la heterocedasticidad.

El efecto de la transformación de raíz cuadrática, es comprimir los valores altos y expandir los valores bajos; similar es el efecto de la aplicación de logaritmos a las variables, ya que estos comprimen las escalas en las que se miden las variables, reduciendo así, una diferencia de 10 veces, a una de 2 veces.

Cuando se detecta autocorrelación en los modelos de regresión, un método comúnmente usado por su eficiencia para superar este problema, es el método  $\rho$ , de no mucha complejidad, que está basado en el estadístico de Durbin – Watson (ver anexo V). Por esta razón, es el método a emplear en los modelos con autocorrelación.

## 5.2.-Materiales y equipos

Los materiales y equipos necesarios para la elaboración de esta memoria fueron los siguientes:

- Bandas pluviográficas y registros pluviométricos de las estaciones pluviográficas de Talca y del Embalse Bullileo, pertenecientes a la Universidad de Talca y a la Dirección General de Aguas de Talca respectivamente.
- Equipos computacionales ( P.C., impresora y scanner).
- Programas computacionales para el procesamiento de datos, análisis estadístico y desarrollo escrito del estudio.
  - Planilla electrónica: Microsoft Excel 2000.
  - Procesador de Texto: Microsoft Word 2000.
  - Software estadístico: Statgraphics Plus versión 1.4 para windows.

## **6.- RESULTADOS**

### **6.1.- Resultados mensuales de los cálculos del índice de erosividad pluvial de la USLE e índice de Fournier.**

En las tablas 2 y 3 que se presentan más adelante, muestran los valores mensuales obtenidos del índice de erosividad pluvial (R) y del índice de Fournier, para las dos estaciones pluviométricas en estudio.

Los valores mensuales del índice de erosividad pluvial, presentaron gran diferencia por estación y entre las estaciones. La diferencia presentada por estación se debió fundamentalmente a la concentración de las precipitaciones en los meses de invierno (Junio, Julio, Agosto), en donde fueron mayores las intensidades tanto de 1 hora como la máxima en 1/2 hora, elevando así, en mayor proporción el valor del factor R con respecto a los valores de los meses estivales.

Por otra parte, la diferencia presentada entre las dos estaciones en estudio, se debió al mayor monto de las precipitaciones ocurridas en la estación del sector andino (Emb. Bullileo), presentando por lo general, factores R mayores con respecto a la estación ubicada en el valle central (U. de Talca).

**TABLA 2:** Valores mensuales obtenidos del índice de erosividad R ( $j * m^{-2} * cm * h^{-1}$ ) e índice de Fournier de Talca.

<b>Año/Mes</b>	<b>R</b>	<b>IFm</b>	<b>Año/Mes</b>	<b>R</b>	<b>IFm</b>	<b>Año/Mes</b>	<b>R</b>	<b>IFm</b>
(90) Enero	-		(94) Enero	-	-	(98) Enero	-	-
Febrero	-		Febrero	-	-	Febrero	-	-
Marzo	19,17	11,44	Marzo	-	-	Marzo	-	-
Abril	1,40	1,02	Abril	8,93	13,96	Abril	0,83	0,55
Mayo	2,94	2,48	Mayo	3,34	4,35	Mayo	4,65	5,62
Junio	1,01	0,80	Junio	13,85	20,74	Junio	8,28	5,62
Julio	3,72	6,28	Julio	31,77	37,23	Julio	-	-
Agosto	0,79	0,37	Agosto	0,59	0,26	Agosto	2,43	0,29
Septiembre	18,55	21,77	Septiembre	2,95	2,21	Septiembre	5,66	4,00
Octubre	2,88	0,92	Octubre	1,11	0,38	Octubre	-	-
Noviembre	2,15	0,54	Noviembre	-	-	Noviembre	-	-
Diciembre	-	-	Diciembre	0,14	0,1	Diciembre	0,27	0,05
(91) Enero	-	-	(95) Enero	-	-	(99) Enero	-	-
Febrero	-	-	Febrero	-	-	Febrero	-	-
Marzo	-	-	Marzo	-	-	Marzo	0,87	0,07
Abril	1,13	0,74	Abril	10,11	8,51	Abril	0,35	0,42
Mayo	59,08	78,10	Mayo	1,82	1,36	Mayo	4,28	4,23
Junio	28,87	39,83	Junio	7,99	14,23	Junio	35,08	43,11
Julio	14,70	28,17	Julio	145,76	135,2	Julio	5,17	4,74
Agosto	2,41	0,76	Agosto	7,30	11,08	Agosto	4,78	11,89
Septiembre	7,51	5,52	Septiembre	1,49	0,41	Septiembre	32,38	59,51
Octubre	4,22	2,46	Octubre	1,21	0,92	Octubre	0,8	0,06
Noviembre	-	-	Noviembre	-	-	Noviembre	-	-
Diciembre	4,15	3,74	Diciembre	-	-	Diciembre	-	-
(92) Enero	-	-	(96) Enero	-	-	(00) Enero	-	-
Febrero	-	-	Febrero	1,10	0,29	Febrero	1,36	0,97
Marzo	3,00	1,65	Marzo	-	-	Marzo	-	-
Abril	2,59	5,14	Abril	2,56	2,17	Abril	0,12	0,12
Mayo	214,45	206,6	Mayo	4,21	3,10	Mayo	1,63	1,3
Junio	165,08	161,6	Junio	5,54	6,93	Junio	205,17	274,5
Julio	1,09	1,41	Julio	4,44	5,81	Julio	1,07	0,13
Agosto	11,87	14,99	Agosto	15,07	21,73	Agosto	2,13	0,79
Septiembre	5,34	4,33	Septiembre	-	-	Septiembre	29,86	49,32
Octubre	0,18	0,22	Octubre	0,86	0,05	Octubre	1,32	0,10
Noviembre	0,36	0,24	Noviembre	0,74	0,18	Noviembre	-	-
Diciembre	-	-	Diciembre	-	-	Diciembre	-	-
(93) Enero	-	-	(97) Enero	0,48	0,03	(01) Enero	0,67	1,03
Febrero	-	-	Febrero	-	-	Febrero	-	-
Marzo	-	-	Marzo	-	-	Marzo	-	-
Abril	8,08	4,56	Abril	3,83	3,26	Abril	4,76	3,19
Mayo	23,88	38,08	Mayo	6,67	9,42	Mayo	30,97	67,70
Junio	11,76	25,11	Junio	134,03	178,78	Junio	11,72	11,11
Julio	7,55	11,49	Julio	4,76	5,91	Julio	80,73	134,2
Agosto	2,15	3,75	Agosto	5,21	10,27	Agosto	13,14	31,08
Septiembre	1,23	0,61	Septiembre	9,97	18,59	Septiembre	1,14	0,27
Octubre	0,83	0,46	Octubre	15,64	29,27	Octubre	0,29	0,11
Noviembre	1,14	0,28	Noviembre	2,65	2,15	Noviembre	-	-
Diciembre	1,04	0,03	Diciembre	-	-	Diciembre	-	-

(-): mes sin presencia de lluvias.



**TABLA 3:** Valores mensuales obtenidos del índice de erosividad  $R (j * m^{-2} * cm * h^{-1})$  e índice de Fournier de Bullileo.

Año/Mes	R	IFm	Año/Mes	R	IFm	Año/Mes	R	IFm
(82) Enero	4,61	1,06	(86) Enero	-	-	(90) Enero	1,85	0,22
Febrero	12,77	2,02	Febrero	-	-	Febrero	3,42	0,29
Marzo	3,67	0,92	Marzo	4,64	1,68	Marzo	16,50	7,40
Abril	11,66	0,87	Abril	37,87	30,86	Abril	20,41	10,52
Mayo	53,86	64,61	Mayo	177,99	241,7	Mayo	33,73	22,66
Junio	177,28	264,4	Junio	186,71	226,8	Junio	31,83	10,74
Julio	91,05	137,6	Julio	37,55	26,48	Julio	32,92	21,09
Agosto	46,35	63,84	Agosto	35,36	34,50	Agosto	17,56	7,14
Septiembre	71,59	101,6	Septiembre	1,62	0,86	Septiembre	88,57	84,87
Octubre	45,22	56,6	Octubre	8,39	6,26	Octubre	9,94	1,79
Noviembre	4,27	1,41	Noviembre	31,57	45,91	Noviembre	12,74	3,06
Diciembre	-	-	Diciembre	-	-	Diciembre	-	-
(83) Enero	3,99	1,34	(87) Enero	-	-	(91) Enero	1,58	0,16
Febrero	-	-	Febrero	-	-	Febrero	-	-
Marzo	-	-	Marzo	18,90	3,85	Marzo	-	-
Abril	9,49	4,38	Abril	2,32	0,79	Abril	24,30	11,06
Mayo	30,30	26,43	Mayo	30,78	13,28	Mayo	276,92	326,90
Junio	123,31	99,77	Junio	22,29	16,24	Junio	49,16	55,23
Julio	96,25	80,24	Julio	244,62	236,4	Julio	38,01	55,72
Agosto	28,44	16,10	Agosto	52,01	35,27	Agosto	15,06	3,00
Septiembre	21,01	10,50	Septiembre	41,82	34,60	Septiembre	36,65	25,70
Octubre	2,95	1,01	Octubre	39,93	22,99	Octubre	15,0	12,14
Noviembre	-	-	Noviembre	-	-	Noviembre	4,9	0,91
Diciembre	-	-	Diciembre	5,66	2,24	Diciembre	23,73	11,03
(84) Enero	-	-	(88) Enero	1,83	0,15	(92) Enero	-	-
Febrero	4,79	1,13	Febrero	-	-	Febrero	1,25	0,11
Marzo	1,60	0,23	Marzo	5,18	3,06	Marzo	11,32	11,95
Abril	4,05	1,40	Abril	13,36	3,58	Abril	33,95	21,67
Mayo	131,14	158,7	Mayo	17,73	6,59	Mayo	230,31	288,80
Junio	30,86	57,16	Junio	158,45	165,7	Junio	159,63	191,90
Julio	208,65	251,0	Julio	46,32	33,31	Julio	28,94	15,70
Agosto	31,80	24,22	Agosto	84,44	83,19	Agosto	19,93	9,82
Septiembre	35,48	42,29	Septiembre	6,32	3,58	Septiembre	18,41	10,97
Octubre	30,10	12,85	Octubre	11,53	3,4	Octubre	17,55	13,53
Noviembre	1,45	0,13	Noviembre	1,73	0,21	Noviembre	3,99	0,98
Diciembre	-	-	Diciembre	1,66	0,17	Diciembre	1,48	0,13
(85) Enero	1,79	0,14	(89) Enero	-	-	(93) Enero	-	-
Febrero	-	-	Febrero	-	-	Febrero	-	-
Marzo	3,76	0,52	Marzo	-	-	Marzo	-	-
Abril	30,24	15,89	Abril	-	-	Abril	20,03	12,5
Mayo	77,70	68,95	Mayo	3,19	2,81	Mayo	133,20	156,00
Junio	26,07	16,19	Junio	60,63	37,4	Junio	293,82	378,00
Julio	115,49	91,37	Julio	92,06	59,22	Julio	48,38	32,58
Agosto	9,45	2,2	Agosto	64,54	53,47	Agosto	44,53	36,60
Septiembre	28,25	13,87	Septiembre	6,84	2,06	Septiembre	11,33	4,45
Octubre	47,76	34,06	Octubre	5,73	0,94	Octubre	18,97	11,63
Noviembre	10,92	3,4	Noviembre	-	-	Noviembre	5,89	1,05
Diciembre	-	-	Diciembre	5,66	2,24	Diciembre	11,77	3,46

(-): mes sin presencia de lluvias.

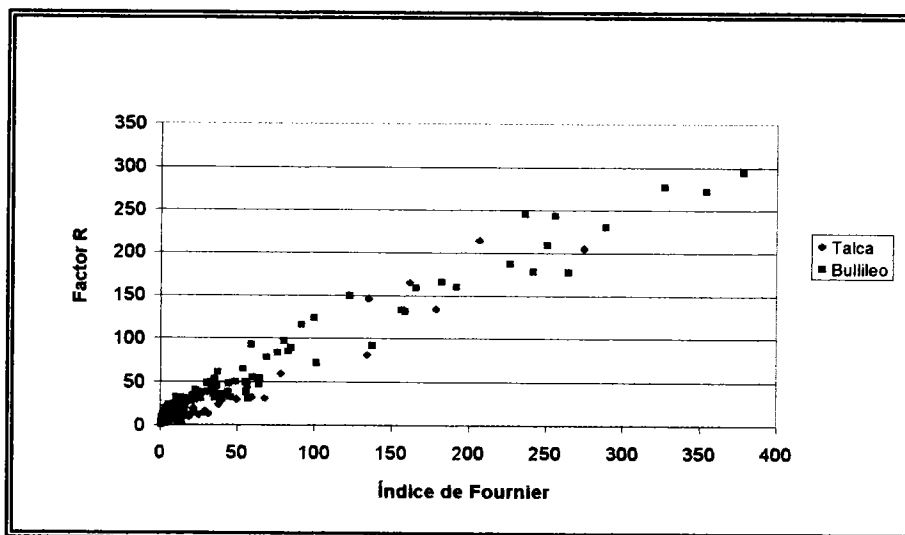
Continuación.

**TABLA 3:** Valores mensuales obtenidos del índice de erosividad  $R$  ( $j * m^{-2} * cm * h^{-1}$ ) e índice de Fournier de Bullileo.

Año/Mes	R	IFm	Año/Mes	R	IFm	Año/Mes	R	IFm
(94) Enero	-	-	Mayo	22,74	5,38	Septiembre	3,29	0,94
Febrero	1,13	0,10	Junio	243,33	255,7	Octubre	2,15	0,47
Marzo	-	-	Julio	165,30	182,4	Noviembre	7,34	1,45
Abril	27,48	20,24	Agosto	47,80	44,42	Diciembre	1,37	0,16
Mayo	19,77	10,72	Septiembre	11,55	5,39	(97) Enero	1,22	0,10
Junio	82,74	76,19	Octubre	14,86	6,74	Febrero	8,27	0,73
Julio	148,99	122,8	Noviembre	-	-	Marzo	-	-
Agosto	9,80	3,26	Diciembre	-	-	Abril	54,34	59,96
Septiembre	28,2	18,36	(96) Enero	1,12	0,12	Mayo	36,94	25,08
Octubre	16,63	6,33	Febrero	8,65	1,37	Junio	272,02	353,9
Noviembre	1,20	0,15	Marzo	6,45	0,85	Julio	37,57	44,13
Diciembre	8,97	1,84	Abril	18,30	7,70	Agosto	14,62	15,70
(95) Enero	-	-	Mayo	24,16	9,46	Septiembre	35,16	37,32
Febrero	-	-	Junio	31,05	35,76	Octubre	49,47	48,76
Marzo	-	-	Julio	5,30	2,79	Noviembre	11,55	2,59
Abril	28,69	22,55	Agosto	47,78	30,33	Diciembre	3,71	1,19

(-): mes sin presencia de lluvias.

De las tablas anteriormente presentadas, se puede señalar que, la mayor proporción de los valores de índices  $R$  y Fournier, se encuentran en los rangos de 0 a 50, siendo de éstos, el 91,75% del total de los datos proporcionados por la estación de Talca y el 80,65% del total de los datos proporcionados por la estación de Bullileo. Esto además, se puede apreciar en la parte inferior izquierda del gráfico de dispersión presentado en la figura 6.



**FIGURA 6:** Gráfico de dispersión de los valores mensuales ( $R$  v/s  $IFm$ ).

De acuerdo a los registros de precipitaciones dadas por los pluviógrafos y pluviómetros, el rango de valores (máximos y mínimos) que se obtuvo del índice R e índice de Fournier mensuales para ambas estaciones, se presenta en la tabla 4.

**TABLA 4:** Rango de valores mensuales calculados del índice R e índice de Fournier.

<b>Rango de los índices</b>	<b>Est. Univ. De Talca</b>	<b>Est. Emb. Bullileo</b>
<b>Factor R menor</b>	0,14	1,12
<b>Factor R mayor</b>	214,45	293,82
<b>I. Fournier menor</b>	0,03	0,10
<b>I. Fournier mayor</b>	274,5	378,0

Por último, es conveniente resaltar, que de acuerdo a los resultados obtenidos, hay dos tendencias generales:

Hay una gran diferencia entre los valores menores y mayores entre una misma estación y, en general, los factores calculados para la estación de Bullileo, son más altos que los calculados para la estación de Talca. Esto debido a que los factores R e IFm, dependen de las intensidades y monto de las precipitaciones, produciéndose las mayores en Bullileo.

Con las tendencias antes expuestas, se puede concluir que la mejor opción para ajustar un modelo de regresión que relacione el factor R y el índice de Fournier, es a través de una separación de datos, con el fin de homogeneizar cada conjunto de datos. Esto es, diferenciar la información de acuerdo a la cantidad de precipitación que registraron los pluviómetros. Por esta razón, se encontraron meses secos y meses húmedos, que se diferenciaron de la siguiente forma:

- ✓ Datos de meses secos y húmedos para Talca.
- ✓ Datos de meses secos y húmedos para Bullileo.

Esta separación de la información se efectuó a través de la mediana, que ante la presencia de valores extremos, es la medida de centralización más significativa para la mayor parte de las observaciones. La aplicación de la mediana arrojó los siguientes resultados:

- Número de datos (n) proporcionados por la estación de Talca: 97

$$\begin{aligned} \text{Si } n \text{ es impar } \Rightarrow \text{Mediana} &= X_{((n+1)/2)} \\ &= (98)/2 \\ &= 49 \end{aligned}$$

Los datos de precipitación proporcionados por la estación de Talca, arrojan una mediana igual a 49. El valor que se encuentra en ese punto es el número 47. Se consideraron como meses secos los valores que están bajo la mediana (48 valores), más el valor que se encuentra en la mediana; los 48 valores restantes, ubicados sobre la mediana, se consideraron como meses húmedos. Esto se calculó automáticamente a través del programa Excel.

- Número de datos (n) proporcionados por la estación de Bullileo: 155

$$\begin{aligned} \text{Si } n \text{ es impar } \Rightarrow \text{Mediana} &= X_{((n+1)/2)} \\ &= (156)/2 \\ &= 78 \end{aligned}$$

Los datos de precipitación, proporcionados por la estación de Bullileo, arrojan una mediana igual a 78, y el valor de esta observación central es 152,6. Se consideraron como meses secos los 77 primeros valores que están bajo la mediana, más el valor de la observación (152,6) ubicado en la mediana, por lo que las 77 observaciones restantes, ubicadas sobre la mediana, se consideraron como meses húmedos.

Los resultados obtenidos después de la separación de la información, se presentan en las tablas que se muestran a continuación:

**TABLA 5:** Resultados mensuales del índice de erosividad pluvial e índice de Fournier, asociado con su precipitación en mm, para los meses secos de Talca.

PP	IFm	R	PP	IFm	R	PP	IFm	R	PP	IFm	R
24,6	1,02	1,40	11,8	0,24	0,36	35,8	2,17	2,56	23,9	0,97	1,36
38,3	2,48	2,94	19,0	0,61	1,23	42,8	3,10	4,21	8,4	0,12	0,12
21,8	0,80	1,01	16,5	0,46	0,83	5,6	0,05	0,86	27,7	1,30	1,63
14,7	0,37	0,79	12,8	0,28	1,14	10,3	0,18	0,74	8,8	0,13	1,07
23,3	0,92	2,88	4,4	0,03	1,04	4,1	0,03	0,48	21,6	0,79	2,13
17,8	0,54	2,15	12,5	0,26	0,59	43,9	3,26	3,83	7,6	0,10	1,32
20,9	0,74	1,13	36,1	2,21	2,95	35,6	2,15	2,65	24,7	1,03	0,67
21,2	0,76	2,41	14,5	0,36	1,11	18,1	0,55	0,83	43,4	3,19	4,76
38,1	2,46	4,22	7,8	0,10	0,14	13,0	0,29	2,43	12,7	0,27	1,14
47,0	3,74	4,15	28,3	1,36	1,82	5,7	0,05	0,27	8,2	0,11	0,29
31,2	1,65	3,00	15,6	0,41	1,49	6,5	0,07	0,87			
28,9	1,41	1,09	23,3	0,92	1,21	15,7	0,42	0,35			
11,3	0,22	0,18	13,1	0,29	1,10	6,1	0,06	0,80			

**TABLA 6 :** Resultados mensuales del índice de erosividad pluvial e índice de Fournier asociado con su precipitación en mm, para los meses húmedos de Talca.

PP	IFm	R	PP	IFm	R	PP	IFm	R	PP	IFm	R
82,2	11,44	19,17	51,9	4,56	8,08	80,9	11,08	7,3	48,6	4,00	5,66
60,9	6,28	3,72	150,0	38,08	23,88	64,0	6,93	5,54	50,0	4,23	4,28
113,4	21,77	18,55	121,8	25,11	11,76	58,6	5,81	4,44	159,6	43,11	35,08
214,8	78,10	59,08	82,4	11,49	7,55	113,3	21,73	15,07	52,9	4,74	5,17
153,4	39,83	28,87	47,1	3,75	2,15	74,6	9,42	6,67	83,8	11,89	4,78
129	28,17	14,69	90,8	13,96	8,93	325,0	178,8	134,0	187,5	59,51	32,38
57,1	5,52	7,51	50,7	4,35	3,34	59,1	5,91	4,76	402,7	274,5	205,17
55,1	5,14	2,59	110,7	20,74	13,85	77,9	10,27	5,21	170,7	49,32	29,86
349,4	206,6	214,45	148,3	37,23	31,77	104,8	18,59	9,97	200,0	67,70	30,97
309,0	161,6	165,08	70,9	8,51	10,11	131,5	29,27	15,64	81,0	11,11	11,72
94,1	14,99	11,87	91,7	14,23	7,99	57,6	5,62	4,65	281,6	134,2	80,73
50,6	4,33	5,34	282,6	135,2	145,76	57,6	5,62	8,28	135,5	31,08	13,14

**TABLA 7:** Resultados mensuales del índice de erosividad pluvial e índice de Fournier asociado con su precipitación en mm, para los meses secos de Bullileo.

PP	IFm	R	PP	IFm	R	PP	IFm	R	PP	IFm	R
47,3	1,06	4,61	90,0	3,85	18,9	61,4	1,79	9,94	62,2	1,84	8,97
65,2	2,02	12,77	40,9	0,79	2,32	80,2	3,06	12,74	106,4	5,38	22,74
42,9	0,87	3,67	17,5	0,15	1,83	18,2	0,16	1,58	106,5	5,39	11,55
87,7	3,65	11,66	80,2	3,06	5,18	152,6	11,06	24,30	119,1	6,74	14,86
54,5	1,41	4,27	86,8	3,58	13,36	79,5	3,00	15,06	16,0	0,12	1,12
53,2	1,34	3,99	117,8	6,59	17,73	43,7	0,91	4,90	53,8	1,37	8,65
96,0	4,38	9,49	86,8	3,58	6,32	152,4	11,03	23,73	42,4	0,85	6,45
148,7	10,50	21,01	84,6	3,40	11,53	14,9	0,11	1,25	127,3	7,70	18,3
46,2	1,01	2,95	20,9	0,21	1,73	143,8	9,82	19,93	141,1	9,46	24,16
48,8	1,13	4,79	18,9	0,17	1,66	152,0	10,97	18,41	76,6	2,79	5,30
21,9	0,23	1,60	76,9	2,81	3,19	45,4	0,98	3,99	44,4	0,94	3,29
54,2	1,40	4,05	65,8	2,06	6,84	16,5	0,13	1,48	31,3	0,47	2,15
16,6	0,13	1,45	44,4	0,94	5,73	96,8	4,45	11,33	55,3	1,45	7,34
17,2	0,14	1,79	68,7	2,24	5,66	47,1	1,05	5,89	18,5	0,16	1,37
33,1	0,52	3,76	21,6	0,22	1,85	85,3	3,46	11,77	14,4	0,10	1,22
68,1	2,20	9,45	24,5	0,29	3,42	14,5	0,10	1,13	39,3	0,73	8,27
84,6	3,40	10,92	124,8	7,40	16,5	150,2	10,72	19,77	73,9	2,59	11,55
59,4	1,68	4,64	148,8	10,52	20,41	82,9	3,26	9,80	50,0	1,19	3,71
42,5	0,86	1,62	150,4	10,74	31,83	115,4	6,33	16,63			
114,8	6,26	8,39	122,6	7,14	17,56	17,8	0,15	1,20			

**TABLA 8:** Resultados mensuales del índice de erosividad pluvial e índice de Fournier asociado con su precipitación en mm, para los meses húmedos de Bullileo.

PP	IFm	R	PP	IFm	R	PP	IFm	R	PP	IFm	R
368,8	64,61	53,86	170,9	13,87	28,25	218,4	22,66	33,73	206,4	20,24	27,48
746,1	264,41	177,28	267,8	34,06	47,76	210,7	21,09	32,92	400,5	76,19	82,74
538,3	137,64	91,05	254,9	30,86	37,87	422,7	84,87	88,57	508,4	122,77	149,00
366,6	63,84	46,35	713,4	241,74	177,99	829,6	326,91	276,92	196,6	18,36	28,20
462,4	101,56	71,59	691,0	226,80	186,71	341,0	55,23	49,16	217,9	22,55	28,69
345,2	56,60	45,22	236,1	26,48	37,55	342,5	55,72	38,01	733,7	255,70	243,3
235,9	26,43	30,30	269,5	34,50	35,36	232,6	25,70	36,65	619,6	182,35	165,30
458,3	99,77	123,30	310,9	45,91	31,57	159,9	12,14	15,00	305,8	44,42	47,80
411,0	80,24	96,25	167,2	13,28	30,78	158,6	11,95	11,32	274,4	35,76	31,05
184,1	16,10	28,44	184,9	16,24	22,29	213,6	21,67	33,95	252,7	30,33	47,78
578,1	158,74	131,1	705,5	236,42	244,60	779,7	288,76	230,31	355,3	59,96	54,34
346,9	57,16	30,86	272,5	35,27	52,01	635,6	191,89	159,63	229,8	25,08	36,94
726,9	250,98	208,65	269,9	34,60	41,82	181,8	15,70	28,94	863,2	353,92	272,02
225,8	24,22	31,80	220,0	22,99	39,93	168,8	13,53	17,55	304,8	44,13	37,57
298,4	42,29	35,48	590,6	165,68	158,45	162,2	12,50	20,03	181,8	15,70	14,62
164,5	12,85	30,10	264,8	33,31	46,32	573,1	156,01	133,20	280,3	37,32	35,16
182,9	15,89	30,24	418,5	83,19	84,44	892,1	378,02	293,82	320,4	48,76	49,47
381,0	68,95	77,70	280,6	37,40	60,63	261,9	32,58	48,38			
184,6	16,19	26,07	353,1	59,22	92,06	277,6	36,60	44,53			
438,6	91,37	115,50	335,5	53,47	64,54	156,5	11,63	18,97			

Luego de diferenciar y separar los datos por meses secos y húmedos (tablas 5, 6, 7 y 8), éstos se graficaron para ver la tendencia en ambos sectores, obteniéndose así, un gráfico de dispersión de datos secos y otro de datos húmedos.

En los gráficos de las figuras 7 y 8, se pueden apreciar las diferencias de las tendencias en los datos por sector, tanto en los meses secos como en los húmedos. Esto hace pensar que no se obtendrían buenos ajustes en una función de regresión simple tradicional, debido a que no son comparables en magnitud los valores encontrados para cada estación. Asimismo, y a pesar de que en ambos casos la dispersión de los datos presentan una tendencia lineal creciente, sus pendientes son claramente diferentes en cada zona. De acuerdo a esto, y basado en lo expuesto en la metodología, se aplicaron modelos de regresión que incluyeran variables indicadoras (de ubicación geográfica); de esta forma, se une y analiza la información de ambas estaciones, en una sola regresión. Así, se generaron dos modelos de regresión, uno para los meses secos y otro para los meses húmedos.

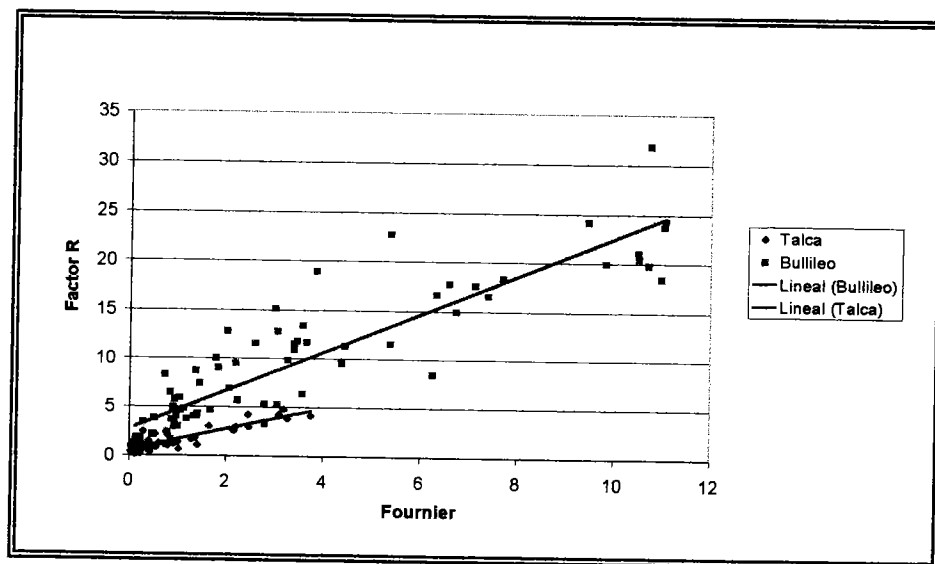
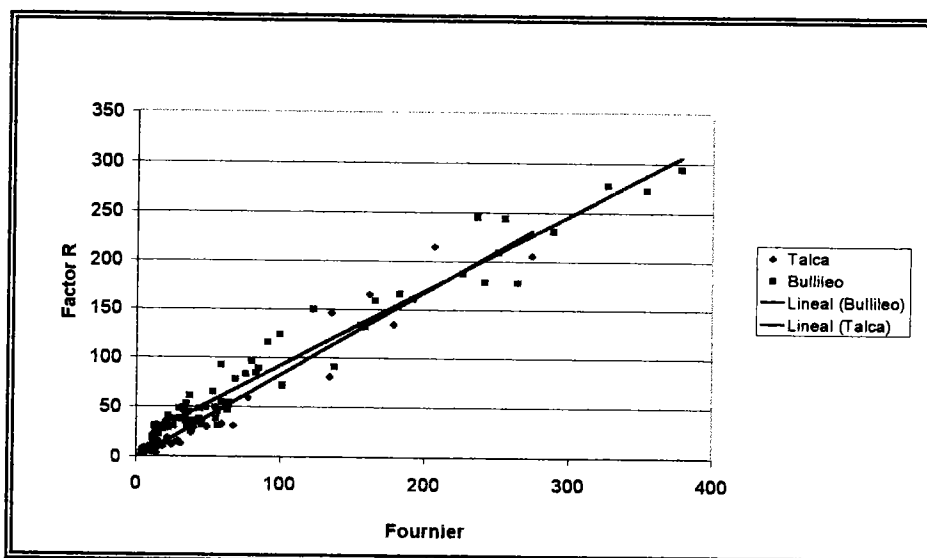


FIGURA 7: Gráfico de dispersión de los datos de meses secos.



**FIGURA 8:** Gráfico de dispersión de los datos de meses húmedos

## 6.2.- Obtención de Modelos y Análisis Estadístico.

De los modelos ajustados para los datos proporcionados por ambas estaciones, se seleccionó el modelo que presentó el mayor  $R^2$  y un bajo error estándar, además que cumpliera con los supuestos básicos de una regresión lineal.

### 6.2.1.- Ajuste del Modelo Para Meses Secos.

El modelo para los periodos de meses secos que presentó el mayor  $R^2$ , resultó ser el modelo lineal, con una variable cuantitativa y una cualitativa con dos clases, que se expresa de la siguiente forma:

$$R = \alpha_0 + \alpha_1 * I + \beta_0 * IFm + \beta_1 * IFm * I$$

Donde:



R = Índice de Erosividad Pluvial mensual, asociado a los meses con precipitaciones consideradas como secos.

IFm = Índice de Fournier mensual, asociado a los meses con precipitaciones consideradas como secos.

$\alpha_i$  = Coeficientes de regresión (interceptos).

$\beta_i$  = Coeficientes de regresión (pendientes).

I = Variable indicadora de ubicación geográfica.

0, Estación Pluviográfica de Talca.

1, Estación Pluviográfica de Bullileo.

A través del análisis efectuado al modelo presentado, se pudo constatar que éste presentaba problemas de normalidad y heterocedasticidad de los residuos (ver apéndice I). Este problema se solucionó aplicando raíz cuadrática a las variables originales en estudio. Por ello, el modelo de regresión de mejor ajuste resultó ser el siguiente:

$$\sqrt{R} = 0,513244 + 0,36122 * I + 0,795429 * \sqrt{IFm} + 0,427359 * \sqrt{IFm} * I$$

n = 127 datos

Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) = 90,53 %

Error Estándar de la Estimación = 0,389496

Estadístico Durbin – Watson = 1,98829

**TABLA 9:** Análisis de regresión; nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ .

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico - t	Valor p
Constante $\alpha_0$	0,513344	0,109863	4,67165	0,0000
Constante $\alpha_1$	0,36122	0,139311	2,5929	0,0107
Pendiente $\beta_0$	0,795429	0,114601	6,94084	0,0000
Pendiente $\beta_1$	0,427359	0,124349	3,43678	0,0008

TABLA 10: Análisis de varianza.

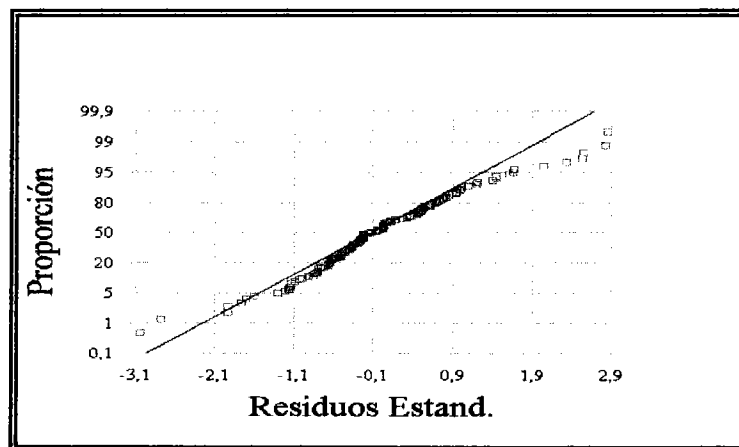
Fuente	S.C.	G.l.	C.M.	F	Valor p
<b>Modelo</b>	178,343	3	59,4476	391,86	0,0000
<b>Error</b>	18,6599	123	0,151707		
<b>Total</b>	197,003	126			

El análisis de varianza (ver tabla 10), verifica la tendencia lineal entre las variables. En cuanto a la tabla 9 presentada en la página anterior, se puede deducir lo siguiente:

- El valor p para el intercepto ( $\alpha_0$ ), fue de valor cero, por lo tanto, hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula (el valor p es menor a  $\alpha$ ), en favor de la hipótesis alternativa. Por ende, este intercepto es estadísticamente significativo en el modelo y su valor es 0,51344.
- Para el intercepto diferencial ( $\alpha_1$ ), se obtuvo un valor p menor al nivel de significancia  $\alpha$ , por lo que se rechaza la hipótesis nula en favor de la hipótesis alternativa. Así, se obtiene un intercepto diferencial estadísticamente significativo en el modelo y su valor es 0,36122.
- El valor p para la pendiente ( $\beta_0$ ) de este modelo, arrojó un valor igual a cero, por lo tanto, existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula (el valor p es menor a  $\alpha/2$ ) en favor de la hipótesis alternativa. Por esta razón, la pendiente ( $\beta_0$ ) es estadísticamente significativa para el modelo y su valor es 0,795429.
- Para la pendiente diferencial ( $\beta_1$ ), se obtuvo un valor p menor al nivel de significancia  $\alpha/2$ , por lo que se rechaza la hipótesis nula a favor de la hipótesis alternativa. Así, se obtiene una pendiente diferencial estadísticamente significativa para el modelo y su valor es 0,427359.

### 6.2.1.1.- Análisis de los Supuestos del modelo de regresión.

#### a.- Supuesto de Normalidad



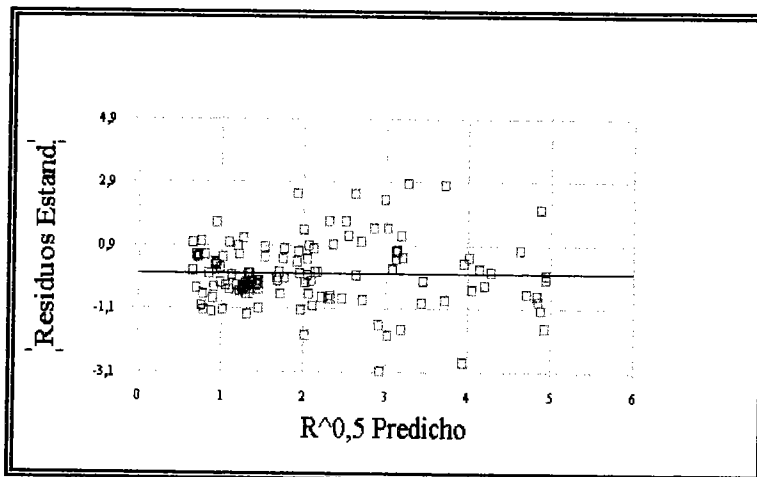
**FIGURA 9:** Gráfico probabilidad normal de los residuos.

**TABLA 11:** Test de normalidad.

Test Kolmogorov – Smirnov (95% de confianza)	
Estadístico Kolmogorov Estimado DPLUS	=0,0838321
Estadístico Kolmogorov Estimado DMINUS	= 0,0662005
Estadístico Total Estimado DN	= 0,0838321
Valor p Aproximado	= 0,336364

En la figura 9 se observa que la curva de la función de distribución acumulada de los residuos corresponde aproximadamente a una línea recta, por lo que existe evidencia de que el supuesto de normalidad se cumple. Lo anteriormente señalado se corrobora con el test de Kolmogorov - Smirnov que se muestra en la tabla 11, ya que el valor  $p$  (0,336364) es mayor a  $\alpha$  (0,05).

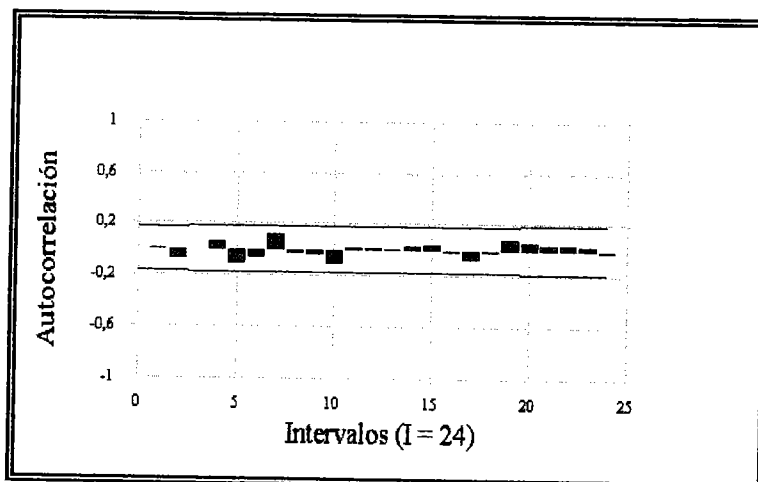
*b.- Supuesto de Homocedasticidad*



**FIGURA 10:** Gráfico residuos estandarizados v/s valores estimados.

La figura 10 de los residuos respecto a los valores estimados, muestra que no existe un patrón de comportamiento definido o sistemático en los residuos, por lo que no hay evidencia de heterocedasticidad.

*c.- Supuesto de No – Autocorrelación*



**FIGURA 11:** Gráfico de autocorrelación de residuos.

**TABLA 12:** Test para la autocorrelación.

Prueba de Durbin – Watson ( 95% de confianza)
$d = 1,98829$ ; $d_L = 1,675$ ; $d_u = 1,743$
$d_u < d < 4 - d_u$
$1,743 < 1,98829 < 2,257$

La figura 11 muestra un intervalo de confianza (línea punteada), para las frecuencias de residuos representados por 24 intervalos. Cuando existen frecuencias fuera de este intervalo, hay presencia de autocorrelación de los residuos. En este caso no hay frecuencias fuera del intervalo, por lo que no hay autocorrelación de los residuos. La aseveración anterior se refuerza con el test de Durbin – Watson expuesto en la tabla 12, donde el valor  $d$  se encuentra en la región de no rechazo, por lo que se concluye finalmente que no existe Autocorrelación positiva o negativa.

- Observaciones:
- Se cumple el supuesto de Normalidad.
  - Se cumple el supuesto de Homocedasticidad.
  - Se cumple el supuesto de no Autocorrelación.

Finalmente, para que el modelo entregue en forma inmediata el valor de R por cada IFm dado, éste puede quedar expresado de la siguiente forma:

$$R = [0,513244 + 0,36122 * I + \sqrt{IFm} * (0,795429 + 0,427359 * I)]^2$$

### 6.2.2.- Ajuste del Modelo Para Meses Húmedos.

Para la selección del modelo de mejor ajuste, se utilizó igual metodología a la empleada para la selección del modelo con datos de meses secos. Después de probar una serie de modelos, el que presentó el mayor  $R^2$  resultó también ser un modelo lineal, con una variable cuantitativa y una cualitativa con dos clases, que se expresa de la siguiente forma:

$$R = \alpha_0 + \alpha_1 * I + \beta_0 * IFm + \beta_1 * IFm * I$$

Donde:

R = Índice de Erosividad Pluvial mensual, asociados a los meses húmedos.

IFm = Índice de Fournier mensual, asociados a los meses húmedos.

$\alpha_i$  = Coeficientes de regresión (interceptos).

$\beta_i$  = Coeficientes de regresión (pendientes).

I = Variable indicadora de ubicación geográfica.

0, Estación Pluviográfica de Talca.

1, Estación Pluviográfica de Bullileo.

Por medio de análisis preliminares, se encontró que el modelo lineal expuesto con las variables originales, presentaba problemas de normalidad, heterocedasticidad y autocorrelación de los residuos (ver apéndice II). En primer lugar, se solucionó el problema de la heterocedasticidad, en el cual, el mejor método correctivo, resultó ser la aplicación de logaritmo natural a las variables en estudio. Por esta razón, el modelo que cumpliría con los supuestos de los mínimos cuadrados ordinarios sería el siguiente:

$$\ln(R) = -0,0664572 + 1,07523 * I + 0,929247 * \ln(IFm) - 0,157756 * \ln[(IFm)] * I$$

n = 125 datos

Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) = 94,16 %

Error Estándar de la Estimación = 0,286619

Estadístico Durbin – Watson = 1,71286

**TABLA 13:** Análisis de regresión; nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ .

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico - t	Valor - p
Constante $\alpha_0$	-0,0664572	0,108366	-0,613268	0,5409
Constante $\alpha_1$	1,07523	0,172314	6,23992	0,0000
Pendiente $\beta_0$	0,929247	0,0346069	26,8515	0,0000
Pendiente $\beta_1$	-0,157756	0,0480683	-3,28192	0,0013

**TABLA 14:** Análisis de varianza.

Fuente	S.C.	G.l.	C.M.	F	Valor - p
<b>Modelo</b>	160,342	3	53,4475	650,60	0,0000
<b>Error</b>	9,94022	121	0,0821506		
<b>Total</b>	170,283	124			

En la tabla 14 se verifica la tendencia lineal entre las variables y de acuerdo a la tabla 13, referente a los parámetros poblacionales, se puede inferir lo siguiente:

- El valor p para el intercepto ( $\alpha_0$ ) fue de 0,5409, por lo tanto, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula (el valor p es mayor a  $\alpha$ ), es decir, el intercepto  $\alpha_0$  no es significativo para el modelo de regresión. Por ello, se concluye que el intercepto del modelo para datos húmedos de la estación de Talca, pasa por el origen en el plano cartesiano.
- Para el intercepto diferencial ( $\alpha_1$ ), se obtuvo un valor p igual a cero, siendo así, menor al nivel de significancia  $\alpha$ , por lo que se rechaza la hipótesis nula en favor de la hipótesis alternativa. Así, se obtiene un intercepto diferencial estadísticamente significativo en el modelo y su valor es 1,07523.
- El valor p para la pendiente ( $\beta_0$ ) de este modelo, arrojó un valor igual a cero, por lo tanto, existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula (el valor p es menor a  $\alpha/2$ )

en favor de la hipótesis alternativa. Con ello, se puede afirmar que la pendiente ( $\beta_0$ ) es estadísticamente significativa para el modelo y su valor es 0,929247.

- Para la pendiente diferencial ( $\beta_1$ ), se obtuvo un valor p menor al nivel de significancia  $\alpha/2$ , por lo que se rechaza la hipótesis nula a favor de la hipótesis alternativa. De esta forma, se obtiene una pendiente diferencial estadísticamente significativa para el modelo siendo su valor de - 0,157756.

### 6.2.2.1.- Análisis de los Supuestos del modelo de regresión.

#### a.- Supuesto de Normalidad

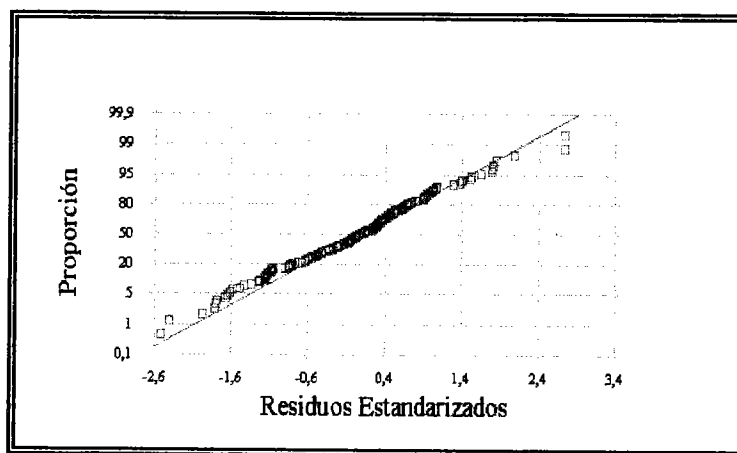


FIGURA 12: Gráfico probabilidad normal de los residuos.

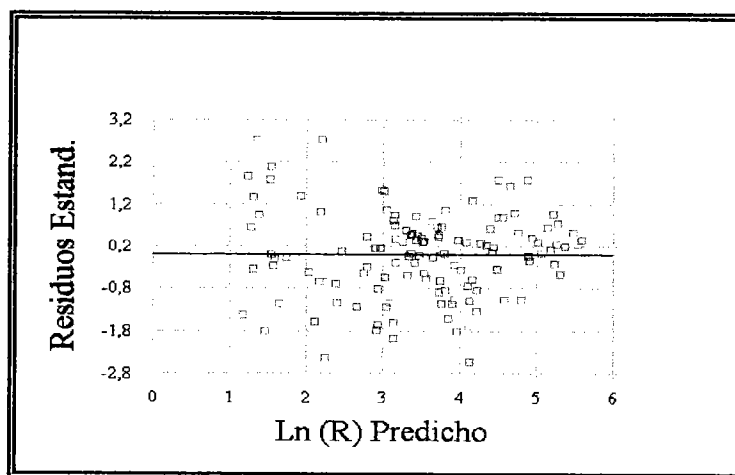
TABLA 15: Test de normalidad.

Test Kolmogorov – Smirnov (95% de confianza)	
Estadístico Kolmogorov	Estimado DPLUS = 0,0430859
Estadístico Kolmogorov	Estimado DMINUS = 0,0561685
Estadístico Total	Estimado DN = 0,0561685
Valor p Aproximado	= 0,825209



En la figura 12 se observa que la curva de la función de distribución acumulada de los residuos, se acerca bastante a una línea recta, por lo que existe evidencia de que el supuesto de normalidad se cumple. Lo anteriormente señalado se refuerza con el test de Kolmogorov - Smirnov expuesto en la tabla 15, ya que el valor  $p$  es mayor a  $\alpha$  (0,05).

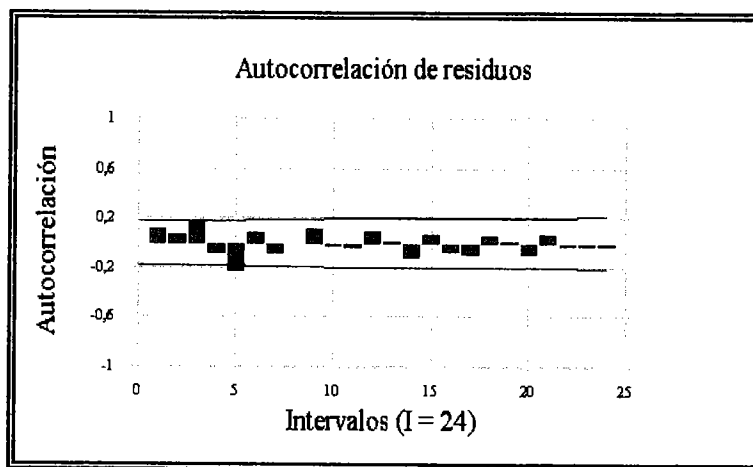
***b.- Supuesto de Homocedasticidad***



**FIGURA 13:** Gráfico residuos estandarizados v/s valores predichos.

La figura 13 de los residuos respecto a los valores estimados, muestra que no existe un patrón de comportamiento definido o sistemático en los residuos, por lo que no hay evidencia de heterocedasticidad.

c.- *Supuesto de No – Autocorrelación*



**FIGURA 14:** Gráfico de autocorrelación de residuos.

**TABLA 16:** Test de autocorrelación.

Prueba de Durbin – Watson (95% de confianza)
$d = 1,71286$ ; $d_L = 1,673$ ; $d_u = 1,738$
$d_L \leq d \leq d_u$
$1,675 \leq 1,71286 \leq 1,738$

En la figura 14 se puede apreciar que una frecuencia de los residuos está levemente fuera del intervalo, por lo que se estaría, en presencia de autocorrelación. Al aplicar el test de Durbin - Watson, que entrega un valor de  $d$  igual a 1,71286 (ver tabla 16), se observa que éste se encuentra entre  $d_L$  y  $d_u$ ; de esta forma, no se puede decidir si existe autocorrelación o no (zona de indecisión de la autocorrelación positiva). De acuerdo a lo planteado en el punto (5.1.7.3) de la metodología, fue necesario probar el test de hipótesis que se expone a continuación, denominado prueba  $d$  modificada y que permite resolver estas situaciones de indecisión.

$H_0 \rho = 0$  no hay autocorrelación positiva.

$H_a \rho > 0$  hay autocorrelación positiva.

Así, tras su aplicación se encontró que  $d < d_u$ , por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula en favor de la alternativa. Por consiguiente, se tiene que  $\rho$  es mayor a 0 y  $d < d_u$ . Así, se deduce entonces, que la autocorrelación presente en el modelo es positiva.

#### 6.2.2.2.- Corrección del modelo.

Dado que el modelo original tiene una correlación serial positiva de los residuos, fue necesario realizar una transformación de variables y corregir este problema a través del método  $\rho$  (ver Anexo V). Luego, el modelo corregido resultó ser el siguiente:

$$\ln(R^*_t) = -0,11283 + 0,968765 * I_t + 0,944807 * \ln(IFm_t) - 0,170782 * \ln[(IFm_t)] * I_t$$

$n = 124$  datos

Coefficiente de determinación ( $R^2$ ) = 94,02 %

Error Estándar de la Estimación = 0,27715

Estadístico Durbin – Watson = 1,97545

A partir del modelo de regresión corregido, se deben obtener los nuevos coeficientes de regresión del modelo original, esto es, los interceptos y las pendientes (ver tabla 17).

**TABLA 17:** Coeficientes de regresión del modelo original.

Parámetro	Fórmula	Valor
$\alpha_0^* = -0,11283$	$\alpha_0 = \alpha_0^*/(1 - \rho)$	$\alpha_0 = -0,1318$
$\alpha_1^* = 0,968765$	$\alpha_1 = \alpha_1^*/(1 - \rho)$	$\alpha_1 = 1,13173$
$\beta_0^* = 0,944807$	$\beta_0 = \beta_0^*$	$\beta_0 = 0,944807$
$\beta_1^* = -0,170782$	$\beta_1 = \beta_1^*$	$\beta_1 = -0,170782$

\* Parámetros del modelo transformado por el método  $\rho$ .

**TABLA 18:** Test de autocorrelación.

Prueba de Durbin – Watson (95% de confianza)
$d = 1,97545$ ; $d_L = 1,659$ ; $d_u = 1,728$
$d_u \leq d \leq 4 - d_u$
$1,728 \leq 1,97545 \leq 2,272$

Aplicando nuevamente el test de Durbin – Watson (ver tabla 18), se puede concluir que se ha corregido el supuesto de no autocorrelación. Por lo tanto, el modelo original cumple con todos los supuestos y los coeficientes del modelo de regresión estimados por los MCO, son eficientes. Este modelo queda establecido por:

$$\ln(R) = -0,13181 + 1,13173 * I + 0,944807 * \ln(IFm) - 0,170782 * \ln[(IFm)] * I$$

- Observaciones:
- Se cumple el supuesto de Normalidad.
  - Se cumple el supuesto de Homocedasticidad.
  - Se cumple el supuesto de no Autocorrelación.

Finalmente, aplicando exponencial al modelo y eliminando la constante  $\alpha_0$ , éste queda formulado por la siguiente expresión:

$$R = e^{(1,13173)*I} * IFm^{(0,944807-0,170782*I)}$$

## **7.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.**

### **7.1.- Obtención de los registros de precipitaciones.**

Para obtener el registro de las precipitaciones y llevar a cabo el estudio, fue necesario extraer de las estaciones los registros pluviográficos y pluviométricos proporcionados por los pluviógrafos y pluviómetros respectivamente.

En cuanto al pluviógrafo, en el proceso de lectura del registro de las bandas, se presentaron inconvenientes que de alguna forma dificultaron el cálculo horario de las precipitaciones. Específicamente, estos inconvenientes se relacionan con el instrumento de registro (Pluviógrafo), los cuales correspondieron a los siguientes:

- Falta de verticalidad en el registro.
- Hojas de registro con manchas de tinta, por efecto de la humedad.
- El lápiz marcador registraba información fuera del área de registro de la hoja.

Según la Dirección General de Aguas (2001)<sup>3</sup>, aparte de los errores propios en el registro de la información, el pluviómetro no presenta problemas importantes que hagan dudar de sus mediciones.

Por último, es conveniente señalar que la lectura de las bandas de pluviógrafo, resultó ser una labor tediosa y que requiere de mucho tiempo. Además, los inconvenientes del instrumento ya señalados, contribuyen a dificultar aún más la lectura de éstas. Por ello, fue un gran logro obtener modelos con buena bondad de ajuste, que de esta forma permitirían

---

<sup>3</sup> Dirección General de Aguas, Talca, VII Región.

prescindir del uso de los pluviógrafos, para dar paso al uso de los pluviómetros de fácil lectura para este tipo de estudio, donde es necesario gran cantidad de información.

Las figuras 15 y 16 que se muestran a continuación, representan los registros de las precipitaciones determinadas por los pluviógrafos y pluviómetros, para las dos estaciones utilizadas en esta investigación.

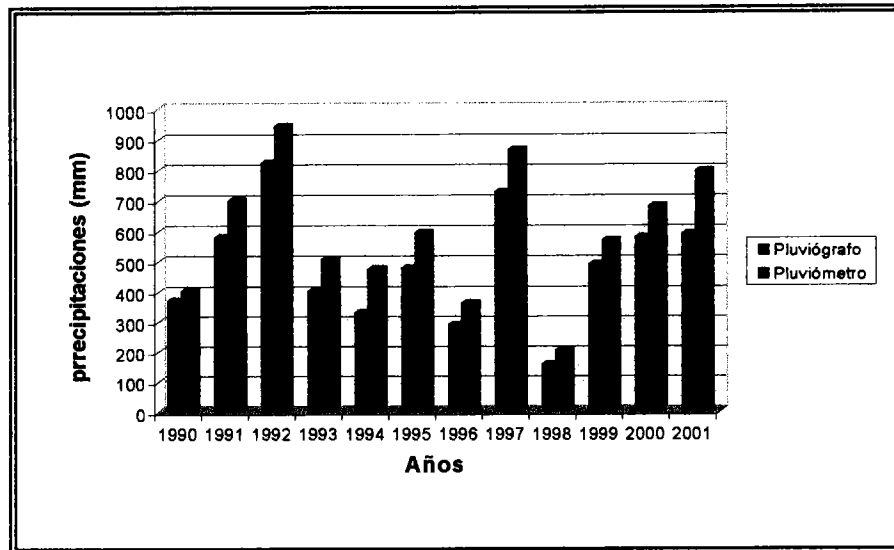


FIGURA 15: Registro de precipitaciones anuales en la estación de Talca.

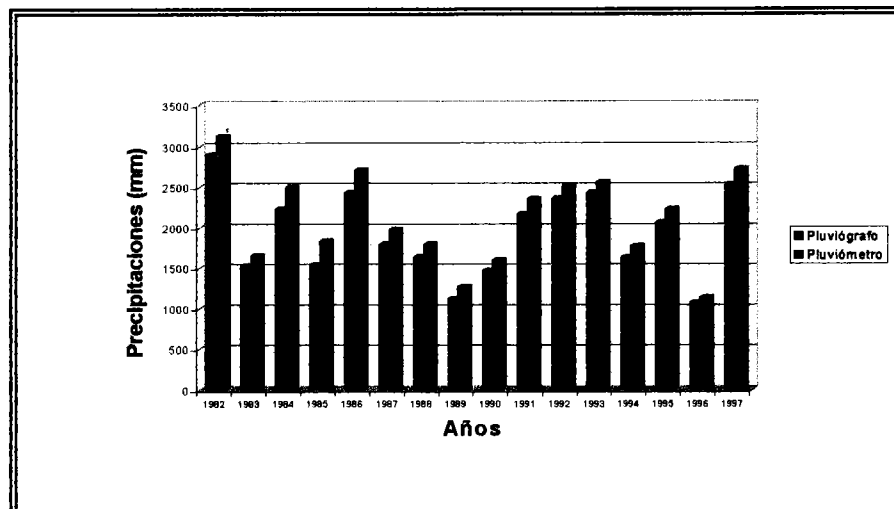


FIGURA 16: Registro de precipitaciones anuales en la estación de Bullileo.

De acuerdo a los gráficos, en general no se aprecia un comportamiento definido en las precipitaciones anuales. Sin embargo, es notoria la inferioridad del monto de las precipitaciones registradas en la estación de Talca, con respecto a las registradas en Bullileo.

El monto máximo de precipitaciones anual registrado en Talca, fue de 944,3 mm producidos el año 1992; por otra parte, el monto más bajo se produjo el año 1998 con 203,9 mm que correspondió a un año de sequía. Para la estación de Bullileo, el monto de precipitación anual más elevado se registró el año 82, con un monto de 3126,2 mm, y el monto menor fue de 1133,8 mm anuales, producidos el año 1996. Hay que destacar que el último año que se estudió para el sector de Bullileo, fue el año 1997.

Los promedios anuales de precipitaciones que se registraron a través de los pluviómetros para los años considerados, fue de 590,8 mm para la estación de Talca y de 2105,3 mm para la estación de Bullileo. Como se ve, los promedios anuales son muy dispares, donde la precipitación media anual de Bullileo es mayor en más de tres veces con respecto a la media anual de Talca. De lo anterior, se deduce que las medidas de acción para el control de la erosión, son totalmente diferentes entre un sector y otro.

De acuerdo a las tablas 2 y 3 presentadas en el capítulo 6, se puede señalar que las mayores precipitaciones, se concentraron principalmente en los meses de Mayo, Junio y Julio para ambas estaciones; los meses con menos registros, lógicamente, fueron los del periodo estival, vale decir en los meses de Diciembre, Enero y Febrero.

Por último, es importante señalar que en función de los registros de precipitaciones anuales, se encuentra que la oscilación es mayor en la estación de Talca, con respecto a Bullileo, encontrándose años de gran pluviosidad y otros años muy por debajo del promedio anual, como el año 1998 (ver figura 15). En la estación de Bullileo ocurre lo contrario, donde las precipitaciones máximas y mínimas anuales, se encuentran cercanas al promedio anual. Similar es lo que ocurre también a nivel mensual, donde es mayor la

diferencia de pluviosidad, entre el periodo de verano e invierno en la estación de Talca, con respecto a lo que ocurre en Bullileo.

## **7.2.- Determinación del Índice de Erosividad Pluvial por el método tradicional y del Índice de Fournier.**

Para la determinación del factor R en su forma tradicional, fue necesario utilizar los registros de precipitaciones proporcionadas por los pluviógrafos. Ello, porque es necesario contar con la precipitación horaria y la de 30 minutos, registro que no lo proporciona el pluviómetro que entrega un registro diario.

En función de los resultados obtenidos del factor R, presentados en las tablas 5,6,7 y 8 del capítulo 6, se puede señalar que el valor del índice R, depende directamente de la intensidad de la lluvia. Además, hay que agregar que la intensidad de la lluvia no depende del monto de las precipitaciones, sino que, del lapso de tiempo en que éstas se producen.

Los mayores valores mensuales del índice R e IFm se produjeron en periodos invernales obteniéndose para Talca un factor R de 214,45, producido en el mes de mayo de 1992, en tanto en Bullileo el mayor valor que se obtuvo fue de 293,82, obtenido en el mes de Junio de 1993; este valor es superior al obtenido en Talca en un 37,01 %. Por otra parte, los mayores valores del índice de Fournier mensuales fueron de 274,5 para Talca, produciéndose éste en el mes de Junio del año 2000, en tanto para Bullileo fue de 378, producido en el mes de Junio de 1993; siendo este valor mayor en un 37,7 % al obtenido en Talca.

Finalmente, es importante señalar que en la estación de Talca, no son frecuentes los valores altos (sólo 2 valores de R e IFm, sobre 200) tanto del índice R como de Fournier, con respecto a los encontrados en Bullileo.



### **7. 3.- Ajuste de modelos R v/s IFm.**

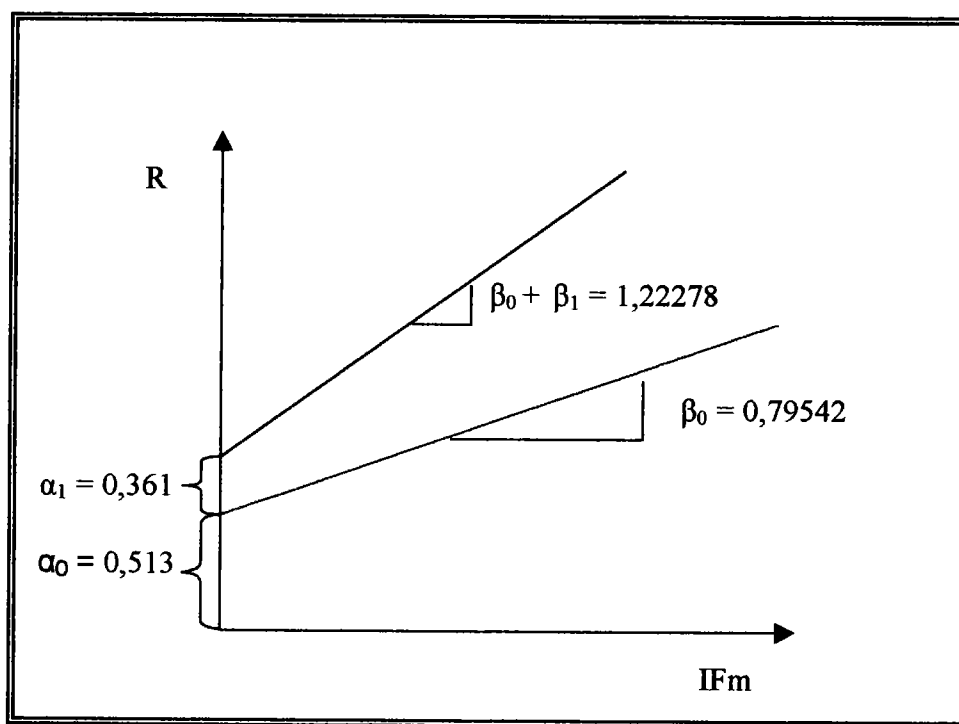
Como consecuencia del comportamiento de las precipitaciones y por ende de los dos factores (R y Fournier), esto es, gran oscilación ente los valores altos y bajos de precipitación, se tuvo que separar la información de acuerdo al monto de la precipitación. Por tal motivo, se encontró dos tipos de información: meses húmedos y meses secos.

En función de lo anterior, se modelaron dos regresiones, una para los meses secos y otra para los meses húmedos, que incluyeron variables indicadoras de ubicación geográfica. Se consideró arbitrariamente a la estación de Talca en los dos modelos como la categoría base (0) y a Bullileo con la segunda categoría (1). Hay que agregar, que se contaba con otra opción como variables indicadoras. Ésta era utilizar variables indicadoras de acuerdo al monto de la precipitación; por ello, las categorías serían meses secos y húmedos y con esto se encontraría un modelo para Talca y otro para Bullileo. Se descartó esta segunda posibilidad, porque la idea fue integrar y comparar la información existente entre los dos sectores, y esto lo permitía utilizando como categorías a las estaciones en estudio.

#### **7.3.1.- Ajuste del modelo para valores de precipitación considerada seca.**

El modelo que mejor ajustó a la serie de datos considerados como secos, resultó ser un modelo lineal. Sin embargo, para lograr el ajuste del modelo, hubo que efectuar una corrección o transformación a las variables originales, ya que el modelo presentó problemas de normalidad y de homocedasticidad . A través de la aplicación de raíz cuadrada, se pudo lograr la normalidad y además se consiguió estabilizar las varianzas, o sea lograr la homocedasticidad.

El modelo de regresión con variables indicadoras corresponde a una regresión disímil, esto es, interceptos y pendientes diferentes (ver anexo III). El intercepto de la recta ( $\alpha_0$ ) obtenido para los datos de Talca (color azul) fue de 0,51344; en tanto, el intercepto diferencial ( $\alpha_1$ ) fue de 0,36122, siendo el intercepto de la recta, para los datos de Bullileo (color verde) de 0,87466 ( $\alpha_0 + \alpha_1$ ). La pendiente de la recta ( $\beta_0$ ) obtenida para los datos de Talca fue de 0,79542; en tanto, la diferencial de pendiente ( $\beta_1$ ) fue de 0,427359, siendo la pendiente de la recta para los datos de Bullileo de 1,22278 ( $\beta_0 + \beta_1$ ). En la figura 17 se muestra y detalla el modelo ajustado en forma gráfica.



**FIGURA 17:** Esquema del modelo ajustado para los meses secos.

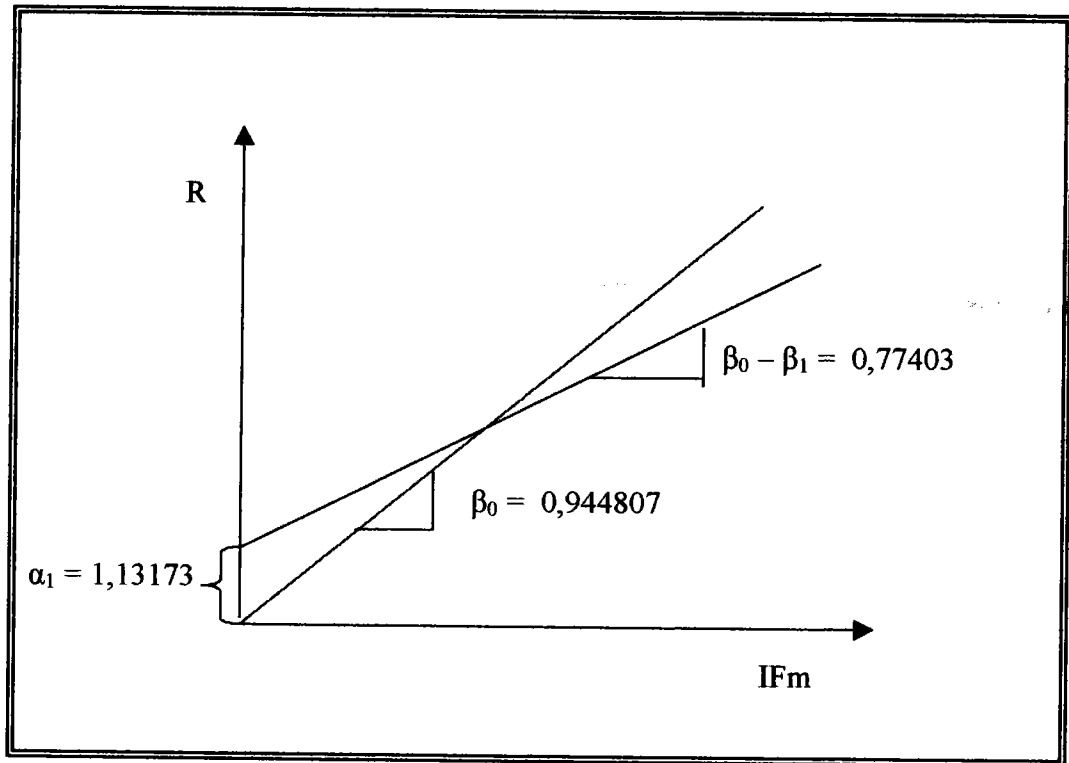
Por último, hay que señalar que el modelo presentó un alto coeficiente de determinación ( $R^2$ ), cuyo valor fue de 90,53%, en tanto el error estándar de la estimación fue bajo, siendo su valor de 0,389, con esto se concluye, que el modelo explica en gran proporción la variación real de los datos.

### **7.3.2.- Ajuste de modelos para datos de meses húmedos.**

El modelo de mejor ajuste para la serie de datos considerados como húmedos, resultó ser un modelo lineal. Sin embargo, para lograr el ajuste del modelo, hubo que efectuar una corrección o transformación a las variables originales, ya que el modelo presentó problemas de normalidad, de homocedasticidad y de autocorrelación. A través de la aplicación de logaritmo natural se corrigieron los problemas de normalidad y de homocedasticidad. El problema de autocorrelación se superó por medio del método  $\rho$ , basado en el estadístico de Durbin – Watson.

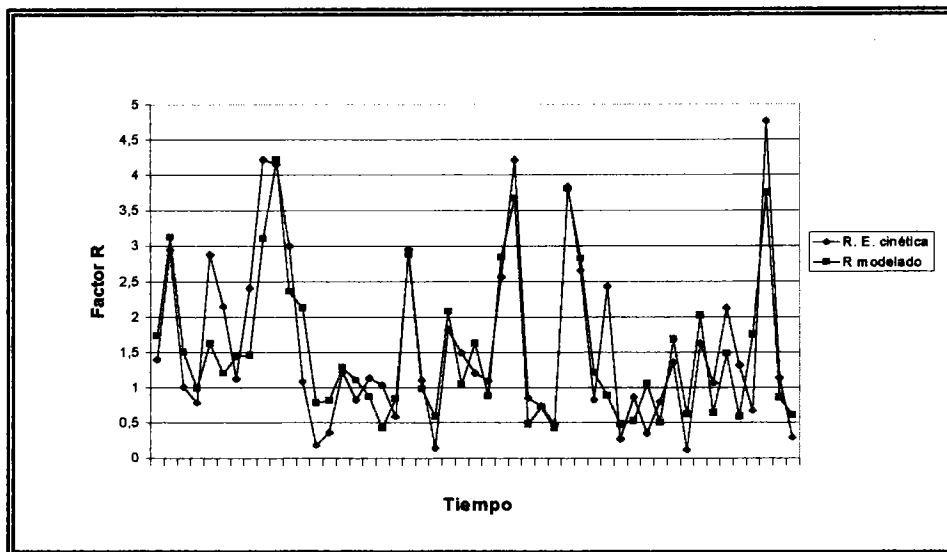
El modelo de regresión con variables indicadoras, corresponde a una regresión disímil, esto es, interceptos y pendientes diferentes. El intercepto de la recta ( $\alpha_0$ ) para los datos de Talca (color azul) no fue significativo para el modelo, por lo que se asumió como valor cero; en tanto, el intercepto diferencial ( $\alpha_1$ ) fue de 1,13173, siendo éste además, el intercepto de la recta (color verde) para los datos de Bullileo. La pendiente de la recta ( $\beta_0$ ) obtenida para los datos de Talca fue de 0,944807 en tanto, la diferencial de pendiente ( $\beta_1$ ) fue de - 0,170782, siendo la pendiente de la recta para los datos de Bullileo de 0,77403 ( $\beta_0 - \beta_1$ ). En la figura 18, se muestra gráficamente el modelo ajustado.

De acuerdo a los resultados obtenidos, hay que señalar que el modelo ajustado para los datos de meses húmedos, presentó un elevado coeficiente de determinación  $R^2$ , siendo éste de 94,02% y un bajo error estándar de la estimación, cuyo valor fue de 0,277. Así, se concluye que este modelo, explica de buena manera y en gran porcentaje la variación real de los datos.

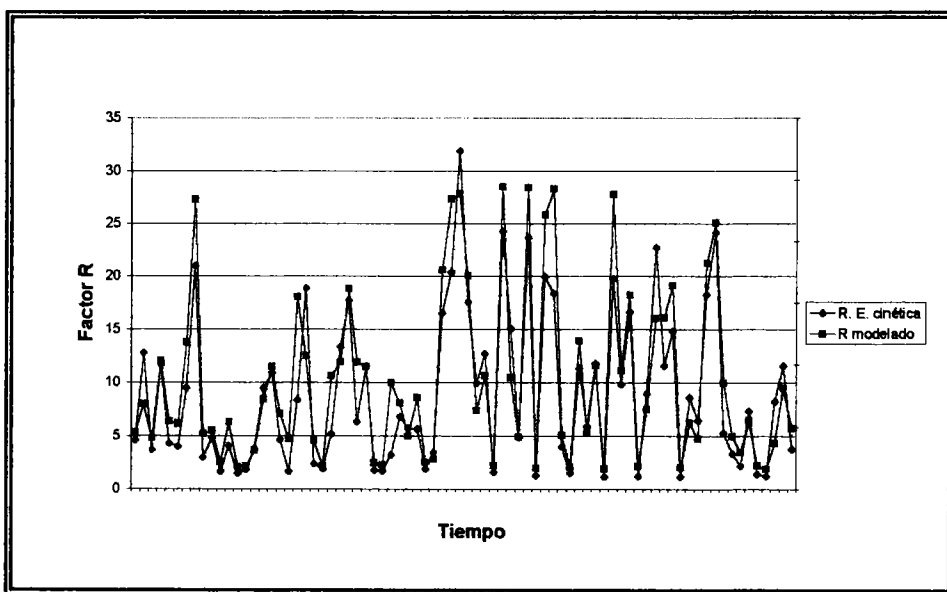


**FIGURA 18:** Esquema del modelo ajustado para los meses húmedos.

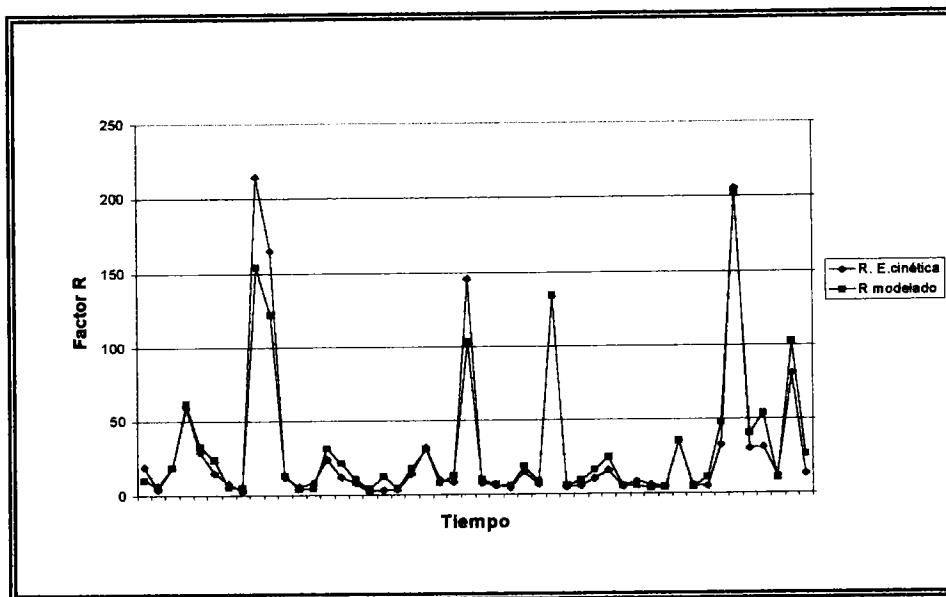
**7.4.-Comparación entre el factor R calculado en su forma tradicional y el factor R modelado.**



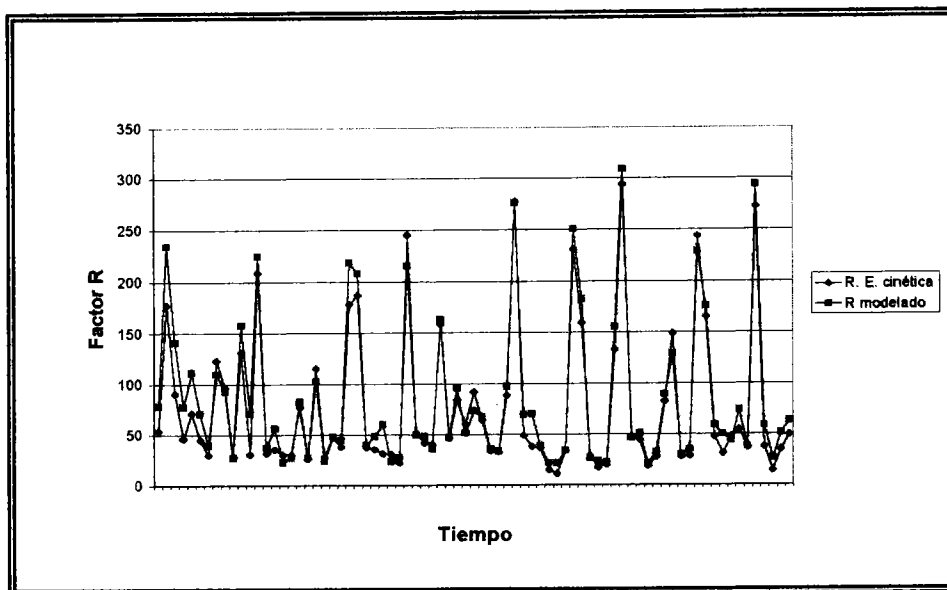
**FIGURA 19:** Gráfico de comparación del factor R mensual calculado por el método tradicional y el factor R modelado, para los meses secos de Talca.



**FIGURA 20:** Gráfico de comparación del factor R mensual calculado por el método tradicional y el factor R modelado, para los meses secos de Bullileo.



**FIGURA 21:** Gráfico de comparación del factor R mensual calculado por el método tradicional y el factor R modelado, para los meses húmedos de Talca.



**FIGURA 22:** Gráfico de comparación del factor R calculado por el método tradicional y el factor R modelado, para los meses húmedos de Bullileo.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los modelos, donde se obtuvieron altos coeficientes de determinación y además se cumplieron los supuestos de los estimadores de los mínimos cuadrados, se puede concluir que los modelos estiman adecuadamente el valor del factor R. Esto también es posible apreciarlo en las figuras precedentes, donde se observa una gran similitud entre el factor R de la USLE estimado en su forma tradicional y el factor R modelado.

Las diferencias mayores que se presentaron entre el R tradicional y el R modelado, pueden deberse al hecho de haber eliminado las precipitaciones bajo 1 mm/h y las poco concentradas, criterios que se señalaron en el capítulo 6. Por lo tanto, el factor R calculado a través de datos pluviográficos, sufre una disminución en su valor, no sufriendo el mismo efecto el R modelado, ya que para su cálculo a través del índice de Fournier, se utilizó la totalidad de la información obtenida de los registros pluviométricos.

Las ocasiones en que el R calculado a través de registros pluviográficos está sobre el R modelado, señala que son periodos de altas intensidades de precipitación, ya que como se había señalado anteriormente, el factor R determinado tradicionalmente, es muy sensible a la intensidad de la lluvia lo que hace subir en mayor porcentaje su valor en relación al R modelado que depende del monto de las precipitaciones y no de las intensidades para el cálculo del Índice de Fournier. En otras palabras, en estas intensidades el factor R es subestimado por el modelo.

Es importante destacar que en los periodos invernales, es cuando se presentaron los mayores valores de la capacidad erosiva de la lluvia o factor R; por ello, es conveniente lograr que en estos periodos la vegetación presente su máxima cobertura o desarrollo sobre el suelo, manejar adecuadamente la vegetación permanente, realizar prácticas de cultivos acorde a las condiciones del terreno, etc., de tal manera que se establezca una adecuada protección del recurso suelo.

## 8.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 8.1.- Conclusiones.

Después de obtener, discutir y analizar los resultados de esta investigación, realizada en dos estaciones pluviográficas de la VII Región del Maule, es posible concluir lo siguiente:

- ◆ Es factible desarrollar el cálculo del factor R a través del índice de Fournier, sin embargo, este debe adecuarse a las condiciones presentes en la zona de estudio. Asimismo, el tiempo y la dificultad de cálculo del factor R través de este índice, se reduce enormemente.
- ◆ Existen diferencias importantes entre Talca y Bullileo, para las intensidades de precipitaciones máximas. Así por ejemplo, el máximo valor en 30 minutos para la estación de Bullileo fue de 4,2 (cm/h) y para la estación de Talca el valor máximo fue de 2,4 (cm/h). Lo que implica, que ante un mismo monto de precipitación en Bullileo, se obtendrán valores de R mayores.
- ◆ Los valores obtenidos del factor R en la estación de Bullileo, son por lo general más elevados que los calculados en la estación de Talca. El factor R medio anual calculado en forma tradicional para Bullileo fue de 416,34; en tanto, para la estación de Talca se obtuvo un factor R medio anual de 131,52. Esto indica que el valor obtenido en Bullileo es mayor en más de tres veces al obtenido en Talca. Esto significa que la capacidad destructiva de las precipitaciones sobre el suelo en el sector andino, adquiere una gran relevancia, por lo tanto, en esa zona es donde se debe colocar una mayor atención y efectuar las prácticas y técnicas de control más adecuadas.



- ◆ EL factor R e índice de Fournier evidenciaron una alta correlación, por ello, es posible estimar la capacidad erosiva de las lluvias como una función del IF. Además, los modelos presentaron elevados coeficientes de determinación, bajos errores estándar de la estimación y cumplieron con los supuestos de regresión.
- ◆ Un valor elevado del factor R, no indica un aumento de la erosión, sino que éste indica un mayor riesgo de que se presente este problema, ya que se debe considerar la topografía, la cobertura vegetal, las características físicas del suelo y también las prácticas de cultivo que son los otros factores que componen la USLE.
- ◆ Los modelos presentaron inconvenientes para el cumplimiento de los supuestos de regresión. El inconveniente de heterocedasticidad se logró superar con la aplicación de raíz cuadrática y con una transformación logarítmica a las variables correspondiente a los datos de meses secos y húmedos respectivamente. El problema de autocorrelación presente en el modelo de los meses húmedos, se superó con la aplicación del método  $\rho$ .
- ◆ El uso de variables indicadoras en los modelos de regresión, es un buen método para superar los problemas que se presentan cuando se tienen series de datos disímiles. Por otra parte, con el uso de estas variables se disminuye el análisis, porque permiten reducir regresiones, ya que las distintas regresiones se unen en una sola.
- ◆ Finalmente, en función de los resultados obtenidos, los modelos que se proponen para estimar el factor R para las dos estaciones en estudio, son los siguientes:

- Para los meses secos

$$R = [0,513244 + 0,36122 * I + \sqrt{IFm} * (0,795429 + 0,427359 * I)]^2$$

- Para los meses húmedos

$$R = e^{(1,13173)*I} * IFm^{(0,944807-0,170782*I)}$$

## **8.2.- Recomendaciones.**

- ◆ Se sugiere ampliar esta investigación a nivel regional, integrando las restantes estaciones que en la actualidad posee la VII Región. Asimismo, sería conveniente aumentar la instalación de estaciones meteorológicas, tanto pluviométricas como pluviográficas, para obtener una base de datos más detallada y amplia.
- ◆ Cuando los modelos de regresión presenten problemas de heterocedasticidad, se recomienda aplicar una transformación de raíz cuadrática y/o logarítmica a las variables del modelo. No obstante, es necesario analizar atentamente los residuos (a través de gráficos), para ver la naturaleza del problema y aplicar la transformación más adecuada. Para superar los problemas de autocorrelación, se sugiere utilizar el método  $\rho$  basado en el estadístico de Durbin - Watson. Esta medida correctiva es relativamente fácil de realizar y eficiente.
- ◆ Se recomienda chequear periódicamente los instrumentos de registros de precipitaciones, lo que proporcionará una mayor seguridad y confiabilidad en los registros. En cuanto al pluviógrafo, se sugiere corregir la verticalidad que es el principal inconveniente que se presentó.
- ◆ Por último, se recomienda continuar con investigaciones sobre la problemática de los procesos erosivos, usando los diferentes métodos de evaluación que existen, adecuándose a las condiciones presentes en el país.

## 9.- BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ, F. 1986. Documento Técnico: Técnicas y Trabajos Usados en el Manejo de Cuencas Para Efectos de Producción de Agua Potable. Chile Forestal. N° 132. 7 p.
- CARRASCO, P. 1994. Evaluación de Pérdidas de Suelos por Erosión Hídrica bajo uso Agrícola y Forestal. Seminario: Erosión, Cultivos y Recuperación de Suelos. Santiago, Chile. 36 p.
- CID L.; MORA, A.; VALENZUELA, M. 1990. Inferencia Estadística. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias, Departamento de Matemáticas. 319 p.
- CONAMA. 1994. Propuesta; Plan Nacional de Conservación de Suelos. Santiago, Chile. 137 p.
- CUITIÑO, H. 1999. Tesis de Grado: Evaluación Cuantitativa de la Erosión Hídrica Superficial, en Suelos Desnudos de la Precordillera Andina y Valle Central de la VII Región. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales. 64 p.
- DÍAZ, R. 1986. Estudio del Índice R de Erosión Pluvial Para la Cuenca El Olivar, V Región. Gerencia Técnica. Programa Manejo de Cuencas, Corporación Nacional Forestal (Conaf). 6 p.
- D.G.A. 1977. Estudio red Meteorológica: Hoyas Rapel al Bío – Bío. Departamento de Hidrología. 211 p.
- FAO.1994. Suelos y Aguas 1. Erosión de Suelos en América Latina. Proyecto: Apoyo Para una Agricultura Sostenible Mediante Conservación y Rehabilitación de Tierras en América Latina. Santiago: 1° Edición. 219 p.

- FAO.1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. Boletín de suelos de la FAO N° 68. Roma, Italia. 147 p.
- FRANCKE, S. 1996. Documento Técnico: Elementos de Ordenación de Cuencas y Conservación de Suelos. Chile Forestal. N° 242. 8 p.
- GARCÍA, J. 1999. La Erosión Hídrica: Mecanismos y Modelos. Curso: Evaluación y Control de la Erosión. 49 p.
- GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M.1991. La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo. Pasado, Presente y Futuro. Rev. Ecología, 5, ICONA. 37 p.
- GUJARATI, D. 1992. Econometría. Segunda Edición. Editorial Mc Graw – Hill Latinoamericana. D.F. México. 597 p.
- INIA. 2001. Diagnóstico sobre el estado de degradación del recurso suelo en el país. Boletín INIA N° 15. Editores: Claudio Pérez C.; Jorge González U. INIA Chillán, Chile. 190 p.
- JORDÁN, A.; BELLINFANTE, N. 2000. Cartografía de la Erosividad de la Lluvia Estimada a Partir de Datos Pluviométricos Mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). Edafología . Volumen 7 – 3. 10 p.
- KEITH, Mc.; FOSTER, G.; CALVIN, M.; DE ORO, L. 1998. Application of revised universal soil loss equation (RUSLE) to Mississippi. [Http://.www.usda.gov/ttic/tektran/data/000005/87/0000058767.html](http://.www.usda.gov/ttic/tektran/data/000005/87/0000058767.html).
- LAFLEN, J.; LANE, J.; FOSTER, G. 1991. WEEP. A new generation of erosion prediction technology. J. Soil Water Conservation. 5 p.

- LÓPEZ, F.; MINTEGUI, J. 1990. Agrohidrología en la Planificación. Servicio Central del Gobierno Vasco. Primera edición. 306 p.
- MANCILLA, G. 1996. Documento Técnico: El proceso de Erosión en Chile: Alcances y Proposiciones. Conaf. Santiago, Chile. 6 p.
- MANFREDINI, F. 1998. Integrating universal soil loss equation an digital elevation model to evaluate soil erosion risk at the watershed level. [Http://.www. Desertification. it/asv/doc/Alghero WEB/Manfredini. htm](http://www.Desertification.it/asv/doc/AlgheroWEB/Manfredini.htm).
- MIDEPLAN. 1998. Cuencas Hidrográficas en Chile: Diagnóstico y proyectos. Santiago, Chile. 205 p.
- MINTEGUI, J.; DE SIMÓN, E.; GARCÍA, J.; ROBREDO, J. 1993. La Restauración Hidrológico Forestal, en las Cuencas Hidrográficas de la Vertiente Mediterránea. Informaciones técnicas. Junta de Andalucía. 325 p.
- MOPU. 1984. Metodología Para la Evaluación de la Erosión Hídrica. Dirección General del Medio Ambiente. Madrid. 149 p.
- MONTGOMERY, W.; RUNGER, G. 1996. Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería. Mc Graw – Hill Latinoamericana. D.F. México. 895 p.
- PARED, G.; COOTE, D.; PRINGLE, E.; SHELTON, I. 2002. Revised universal soil loss equation for application in Canadá. A handbook for estimating soil loss from water erosion. [Http://.www. res 2. Agr. Ca/ecorc/staff/huffman/ruslefac – e.htm](http://www.res2.Agr.Ca/ecorc/staff/huffman/ruslefac-e.htm).
- PEÑA, D. 1995. Estadística. Modelos y Métodos. Modelos Lineales y Series Temporales. Alianza Editorial. Madrid. España. 745 p.

- PERALTA, M. 1976. Uso, Clasificación y Conservación de Suelos. Santiago, Servicio Agrícola y ganadero. Departamento de Comunicaciones. Central de Divulgación Técnica, 337 p.
- PIZARRO, R. 1988. Elementos Técnicos de Hidrología II: Proyecto Regional Sobre Uso y Conservación de Recursos Hídricos en Áreas Rurales de América Latina y el Caribe. UNESCO – Oficina Regional de Ciencia y Tecnología. Conaf, IV Región. Chile. 109 p.
- SUÁREZ, F. 1980. Conservación de Suelos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José, Costa Rica. Editorial IICA. 3<sup>ra</sup> Edición. 312 p.
- STALLINGS, J. 1962. El Suelo su uso y Mejoramiento. México. Editorial Continental, S.A. 252 p.
- TRAGSA. 1998. Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de la Erosión. Unidad Temática 5. Madrid, Ediciones Mundiprensa. 902 p.
- USDA. 2001. Erosion prediction models. Revised universal soil loss equation (RUSLE). RUSLE 1,05. RUSLE is an erosion prediction model that predicts. [Http://.www. plants. Usda. Gov/ erosion. html](http://www.plants.usda.gov/erosion.html).
- VALLEJOS, O. 1999. Apuntes de Dasometría I. Escuela de Ingeniería Forestal. Universidad de Talca. Chile. 38 p.
- WILLIAMS, J. 1977. Applicability of the Universal Soil Los Equati6n (USLE) and Modified (USLE) to Hawaii. Soil Erosion and Conservation. Internacional Conference on Soil Erosion and Conservation. Hawaii. 13 p.

- WISCHMEIER, W; SMITH, D. 1978. Predicting Rainfall Erosión Losses – a Guide to Conservation. Department of Agriculture, U.S., Washington. Agriculture Handbook N° 537. 59 p.

# ***APÉNDICES***



## APÉNDICE I

➤ ANÁLISIS DE REGRESIÓN: MODELO R v/s IFm PARA MESES SECOS.

**ANÁLISIS DE REGRESIÓN: MODELO R v/s IFm PARA MESES SECOS.**

$$R = 0,603206 + 2,07594 * I + 1,0698 * (IFm) + 0,913139 * (IFm) * I$$

n = 127 datos

Coefficiente de determinación ( $R^2$ ) = 87,73 %

Error Estándar de la Estimación = 2,39642

Error Medio Absoluto = 1,56454

Estadístico Durbin – Watson = 2,05087

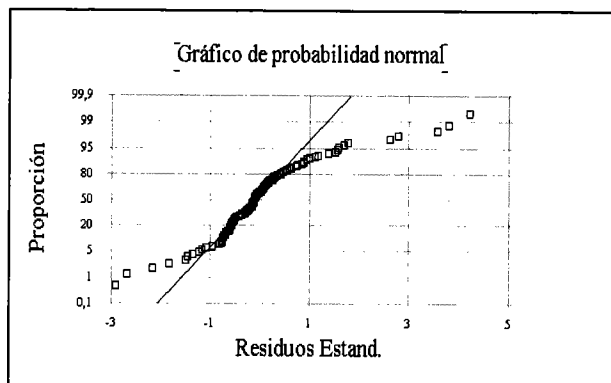
**TABLA 1:** Análisis de regresión.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico - t	Valor p
Constante $\alpha_0$	0,603206	0,468981	1,28621	0,2008
Constante $\alpha_1$	2,07594	0,599997	3,45992	0,0007
Pendiente $\beta_0$	1,0698	0,348795	3,06712	0,0027
Pendiente $\beta_1$	0,913139	0,35826	2,54882	0,0120

**TABLA 2:** Análisis de varianza

Fuente	S.C.	G.l.	C.M.	F	Valor p
<b>Modelo</b>	5049,49	3	1683,16	293,09	0,0000
<b>Error</b>	706,367	123	5,74282		
<b>Total</b>	5755,86	126			

*a.- Supuesto de Normalidad*

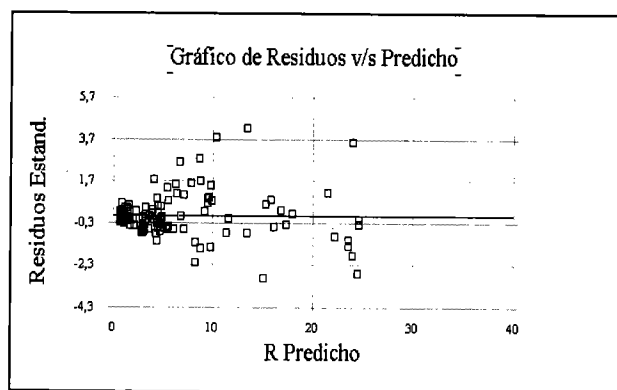


**TABLA 3: Test de normalidad**

Test Kolmogorov – Smirnov (95% de confianza)
Estadístico Kolmogorov Estimado DPLUS = 0,152961
Estadístico Kolmogorov Estimado DMINUS = 0,127954
Estadístico Total Estimado DN = 0,152961
Valor p Aproximado = 0,00524913

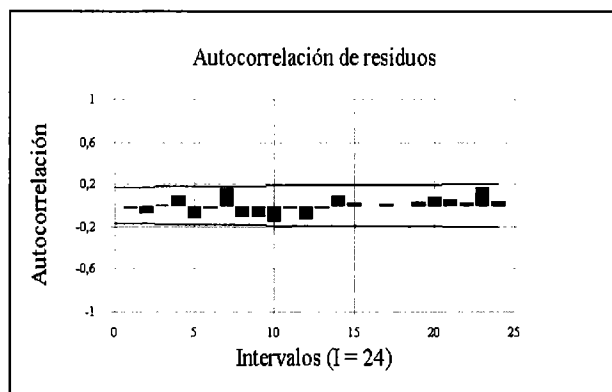
En el gráfico precedente, se puede apreciar que los residuos no están homogéneamente distribuidos sobre la recta, por lo que el supuesto de normalidad no se estaría cumpliendo. Aseveración que se corrobora con el test de Kolmogorov – Smirnov, done su valor  $p$  es menor a 0,05.

***b.- Supuesto de Homocedasticidad***



El gráfico de los residuos respecto a los valores estimados, muestra que existe un patrón de comportamiento sistemático en los residuos, por lo que hay evidencia de heterocedasticidad.

*c.- Supuesto de No - Autocorrelación*



**TABLA 4:** Test para la autocorrelación.

Prueba de Durbin – Watson ( 95% de confianza)
$d = 2,05087$ ; $d_L = 1,675$ ; $d_u = 1,743$
$d_u < d < 4 - d_u$
$1,743 < 2,05087 < 2,257$

En el gráfico se puede apreciar que no hay frecuencias fuera del intervalo, por lo que no hay presencia de autocorrelación. La aseveración anterior se corrobora con el test de Durbin – Watson, donde el valor  $d$ , se encuentra en la región de no rechazo, por lo que se concluye finalmente que no existe Autocorrelación positiva o negativa.

Observaciones : No se cumple el supuesto de normalidad.

No se cumple el supuesto de homocedasticidad.

Se cumple el supuesto de autocorrelación de los residuos.

Para corregir los dos primeros supuestos, es necesario transformar las variables originales del modelo de regresión. Entre las transformaciones más usuales y recomendadas es la aplicación de raíz cuadrática y logaritmo a las variables involucradas en el modelo. Para este caso, la raíz cuadrada fue la mejor medida correctiva.

## **APÉNDICE II**

- ANÁLISIS DE REGRESIÓN: MODELO  $R_v$  / s IFm PARA MESES HÚMEDOS.

**ANÁLISIS DE REGRESIÓN: MODELO R v/s IFm PARA MESES HÚMEDOS.**

$$R = -2,25979 + 17,0728 * I + 0,847605 * (IFm) - 0,0773729 * (IFm) * I$$

n = 125 datos

Coefficiente de determinación ( $R^2$ ) = 95,75 %

Error Estándar de la Estimación = 14,2016

Error Medio Absoluto = 9,44249

Estadístico Durbin – Watson = 1,3072

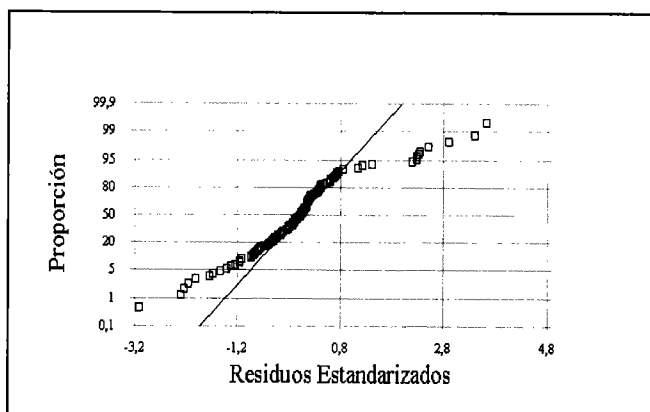
**TABLA 1:** Análisis de regresión.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico - t	Valor p
Constante $\alpha_0$	-2,25979	2,47168	-0,914273	0,3624
Constante $\alpha_1$	17,0728	3,29955	5,17427	0,0000
Pendiente $\beta_0$	0,847605	0,0347911	24,3627	0,0000
Pendiente $\beta_1$	-0,0773729	0,0391995	-1,97382	0,0507

**TABLA 2:** Análisis de varianza

Fuente	S.C.	G.I.	C.M.	F	Valor p
<b>Modelo</b>	549325,0	3	183108,0	907,89	0,0000
<b>Error</b>	24404,0	121	201,686		
<b>Total</b>	573729,0	124			

**a.- Supuesto de Normalidad**

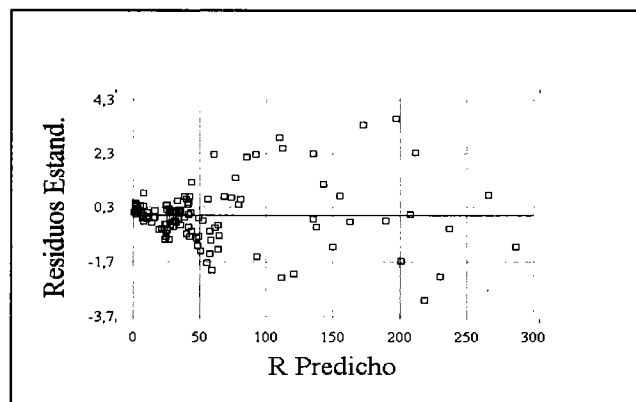


**TABLA 3: Test de normalidad**

Test Kolmogorov – Smirnov (95% de confianza)
Estadístico Kolmogorov Estimado DPLUS = 0,145933
Estadístico Kolmogorov Estimado DMINUS = 0,0858209
Estadístico Total Estimado DN = 0,145933
Valor p Aproximado = 0,00974539

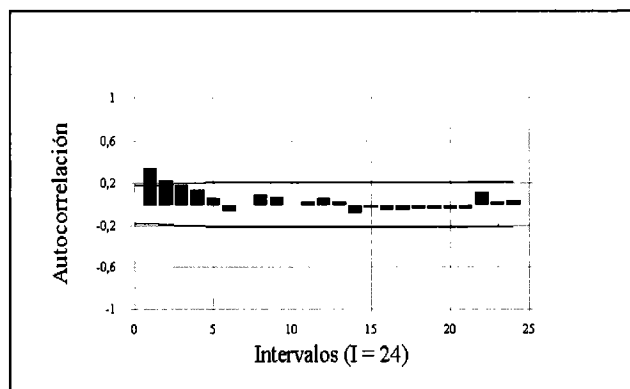
En el gráfico anterior, se puede apreciar que los residuos no están homogéneamente distribuidos sobre la recta, por lo que el supuesto de normalidad no se estaría cumpliendo. Aseveración que se corrobora con el test de Kolmogorov – Smirnov, done su valor  $p$  es menor a 0,05.

***b.- Supuesto de Homocedasticidad***



El gráfico de los residuos respecto a los valores estimados, muestra que existe un patrón de comportamiento sistemático en los residuos, por lo que hay evidencia de heterocedasticidad.

**c.- Supuesto de No – Autocorrelación**



**TABLA 4:** Test para la autocorrelación.

Prueba de Durbin – Watson (95% de confianza)
$d = 1,3072$ ; $d_L = 1,673$ ; $d_u = 1,738$
$0 < d < d_L$
$0 < 1,3072 < 1,673$

En el gráfico se puede apreciar que existen frecuencias fuera del intervalo, por lo que hay presencia de autocorrelación. La aseveración anterior se corrobora con el test de Durbin – Watson, donde el valor  $d$ , se encuentra en la región de rechazo, por lo que se concluye finalmente que existe Autocorrelación positiva.

Observaciones : No se cumple el supuesto de normalidad.

No se cumple el supuesto de homocedasticidad.

No se cumple el supuesto de autocorrelación de los residuos.

Para corregir estos supuestos, es necesario transformar las variables originales del modelo de regresión. Entre las transformaciones más usuales y recomendadas para superar la heterocedasticidad, es la aplicación de raíz cuadrática y logaritmo a las variables involucradas en el modelo. Para corregir la autocorrelación, se utilizará el método  $\rho$ .



- **Corrección del modelo**

$$\ln(R^*_t) = -0,11283 + 0,968765 * I_t + 0,944807 * \ln(IFm_t) - 0,170782 * \ln(IFm_t) * I_t$$

n = 124 datos

Coefficiente de determinación ( $R^2$ ) = 94,02 %

Error Estándar de la Estimación = 0,277158

Error Medio Absoluto = 0,213317

Estadístico Durbin – Watson = 1,97545

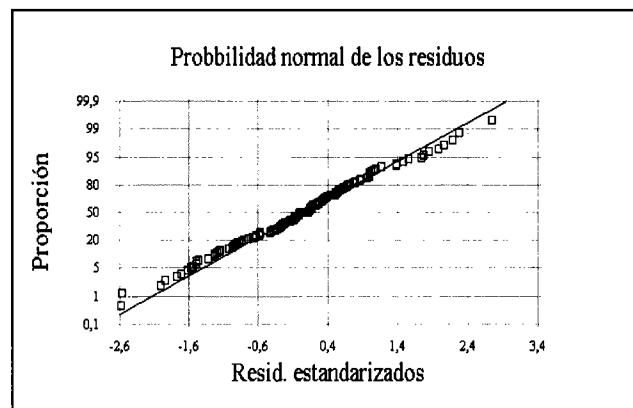
**TABLA 1:** Análisis de regresión.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico - t	Valor p
Constante $\alpha_0^*$	-0,11283	0,0940008	-1,20031	0,2324
Constante $\alpha_1^*$	0,968765	0,146796	6,5994	0,0000
Pendiente $\beta_0^*$	0,944807	0,0340797	27,7235	0,0000
Pendiente $\beta_1^*$	-0,170782	0,0470513	-3,6297	0,0004

**TABLA 2:** Análisis de varianza

Fuente	S.C.	G.I.	C.M.	F	Valor p
<b>Modelo</b>	144,811	3	48,2704	628,39	0,0000
<b>Error</b>	9,21798	120	0,0768165		
<b>Total</b>	154,029	123			

**a.- Supuesto de Normalidad**

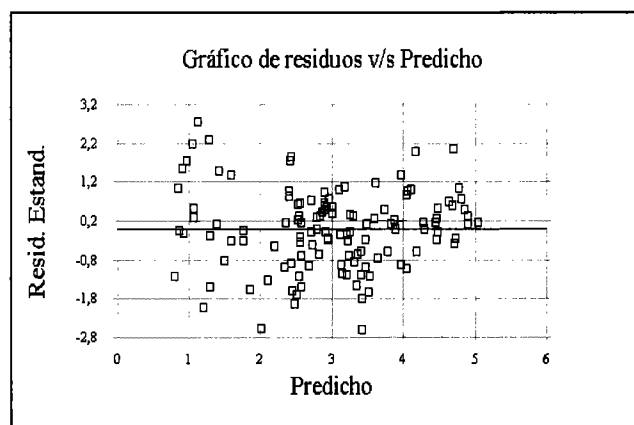


**TABLA 3:** Test de normalidad

Test Kolmogorov – Smirnov (95% de confianza)	
Estadístico Kolmogorov	Estimado DPLUS = 0,0371062
Estadístico Kolmogorov	Estimado DMINUS = 0,0545098
Estadístico Total Estimado	DN = 0,0545098
Valor p Aproximado	= 0,854887

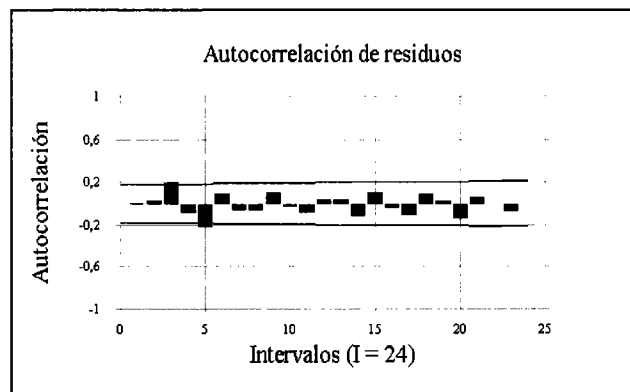
En el gráfico anterior, se puede apreciar que los residuos están homogéneamente distribuidos sobre la recta, por lo que el supuesto de normalidad se estaría cumpliendo. Aseveración que se corrobora con el test de Kolmogorov – Smirnov, donde su valor  $p$  es mayor a 0,05.

***b.- Supuesto de Homocedasticidad***



La gráfica de los residuos respecto a los valores estimados, muestra que no existe un patrón de comportamiento sistemático en los residuos, por lo que no hay evidencia de heterocedasticidad.

*c.- Supuesto de No – Autocorrelación*



**TABLA 4:** Test para la autocorrelación.

Prueba de Durbin – Watson ( 95% de confianza)
$d = 1,97545$ ; $d_L = 1,659$ ; $d_u = 1,728$
$d_u < d < 4 - d_u$
$1,728 < 1,97545 < 2,272$

En la gráfica se puede apreciar que existe levemente una frecuencia fuera del intervalo, por lo que no habría presencia de autocorrelación. La afirmación anterior se reafirma con el test de Durbin – Watson, donde el valor  $d$ , se encuentra en la región de no rechazo, por lo que se concluye finalmente que no existe Autocorrelación positiva o negativa.

Observaciones : Se cumple el supuesto de normalidad.

Se cumple el supuesto de homocedasticidad.

Se cumple el supuesto de autocorrelación de los residuos.

## **APÉNDICE III**

- **COMPARACIÓN DE MODELOS ALTERNATIVOS.**

## COMPARACIÓN DE MODELOS ALTERNATIVOS.

➤ Modelos para los meses secos.

Modelos	R <sup>2</sup>	Error Estándar
$R = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 IFm + \beta_1 IFm * I$	87,73	2,396
$R = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 IFm + \beta_1 IFm * I$	90,53	0,389
$\ln(R) = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 \ln(IFm) + \beta_1 \ln(IFm) * I$	85,78	0,469
$R = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 IFm + \beta_1 IFm * I$	78,25	3,152
$R = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 IFm + \beta_1 IFm * I$	88,53	2,316
$R = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 \ln(IFm) + \beta_1 \ln(IFm) * I$	78,89	3,143
$R = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 \ln(IFm) + \beta_1 \ln(IFm) * I$	78,89	3,143
$1/R = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 IFm + \beta_1 IFm * I$	41,19	0,920

➤ Modelos para los meses húmedos.

Modelos	R <sup>2</sup>	Error Estándar
$R = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 IFm + \beta_1 IFm * I$	95,75	14,202
$R = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 IFm + \beta_1 IFm * I$	95,75	0,805
$\ln(R) = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 \ln(IFm) + \beta_1 \ln(IFm) * I$	94,16	0,287
$R = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 IFm + \beta_1 IFm * I$	87,21	24,625
$R = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 IFm + \beta_1 IFm * I$	92,49	18,871
$R = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 \ln(IFm) + \beta_1 \ln(IFm) * I$	80,21	30,632
$R = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 \ln(IFm) + \beta_1 \ln(IFm) * I$	80,21	30,630
$1/R = \alpha_0 + \beta_0 * I + \alpha_1 IFm + \beta_1 IFm * I$	55,29	0,053

# ***ANEXOS***

## ANEXOS

- I.-** Determinación del índice de Fournier mensual.
- II.-** Determinación de la mediana.
- III.-** Posibilidades de comportamiento de una variable cualitativa con dos clases.
- IV.-** Patrones generales del comportamiento de los residuos.
- V.-** Medida correctiva para la autocorrelación.
- VI.-** Registro de precipitaciones (mm), de pluviógrafos y pluviómetros de la estación de la Universidad de Talca y Embalse de Bullileo.
- VII.-** Máximos valores de intensidad en 30 minutos (cm/h), obtenidas en los meses de los años considerados para la estación de Talca y Bullileo.

## I.- DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE FOURNIER MENSUAL.

$$IFm = \frac{(P_i)^2}{P_m}$$

Donde:

IFm : es el índice de Fournier mensual.

$P_i$  : es la precipitación correspondiente al mes  $i$  en mm.

$P_m$  : es la precipitación media anual (mm).

Precipitación media anual de Talca = 590,8 mm.

Precipitación media anual de Bullileo = 2105,3 mm.

IFm. Est. Pluviog. De Talca.

$P_i$ (mm)	$(P_i)^2$	IFm
82,2	6756,84	11,44
24,6	605,16	1,02
38,3	1466,89	2,48
21,8	475,24	0,80
60,9	3708,81	6,28
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
81	6561	11,11
281,6	79298,56	134,22
135,5	18360,25	31,08
12,7	16129	0,27
8,2	67,24	0,11

IFm. Est. Pluviog. De Bullileo.

$P_i$ (mm)	$(P_i)^2$	IFm
47,3	2237,29	1,06
65,2	4251,04	2,02
42,9	1840,41	0,87
87,7	7691,29	3,65
368,8	136013,44	64,61
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
181,8	33051,24	15,70
280,3	78568,09	37,32
320,4	102656,16	48,76
73,9	5461,21	2,59
50	2500	1,19



## II.- DETERMINACIÓN DE LA MEDIANA.

Datos	Precip. (mm)	Datos ordenados
1	82,2	4,1
2	24,6	4,4
3	38,3	5,6
4	21,8	5,7
5	60,9	6,1
.		
.		
<b>49</b>	<b>15,6</b>	<b>47</b>
.		
.		
93	81	282,6
94	281,6	309
95	135,5	325
96	12,7	349,4
97	8,2	402,7

Datos	Precip. (mm)	Datos ordenados
1	47,3	14,4
2	65,2	14,5
3	42,9	14,9
4	87,7	16
5	368,8	16,5
.		
.		
<b>78</b>	<b>148,8</b>	<b>152,6</b>
.		
.		
151	181,8	746,1
152	280,3	779,7
153	320,4	829,6
154	73,9	863,2
155	50	892,1

Si  $n$  es impar  $\Rightarrow$  Mediana =  $X_{((n+1)/2)}$

- 1) Datos ( $n$ ) proporcionados por la estación de Talca: 97
- 2) Datos ( $n$ ) proporcionados por la estación de Bullileo: 155

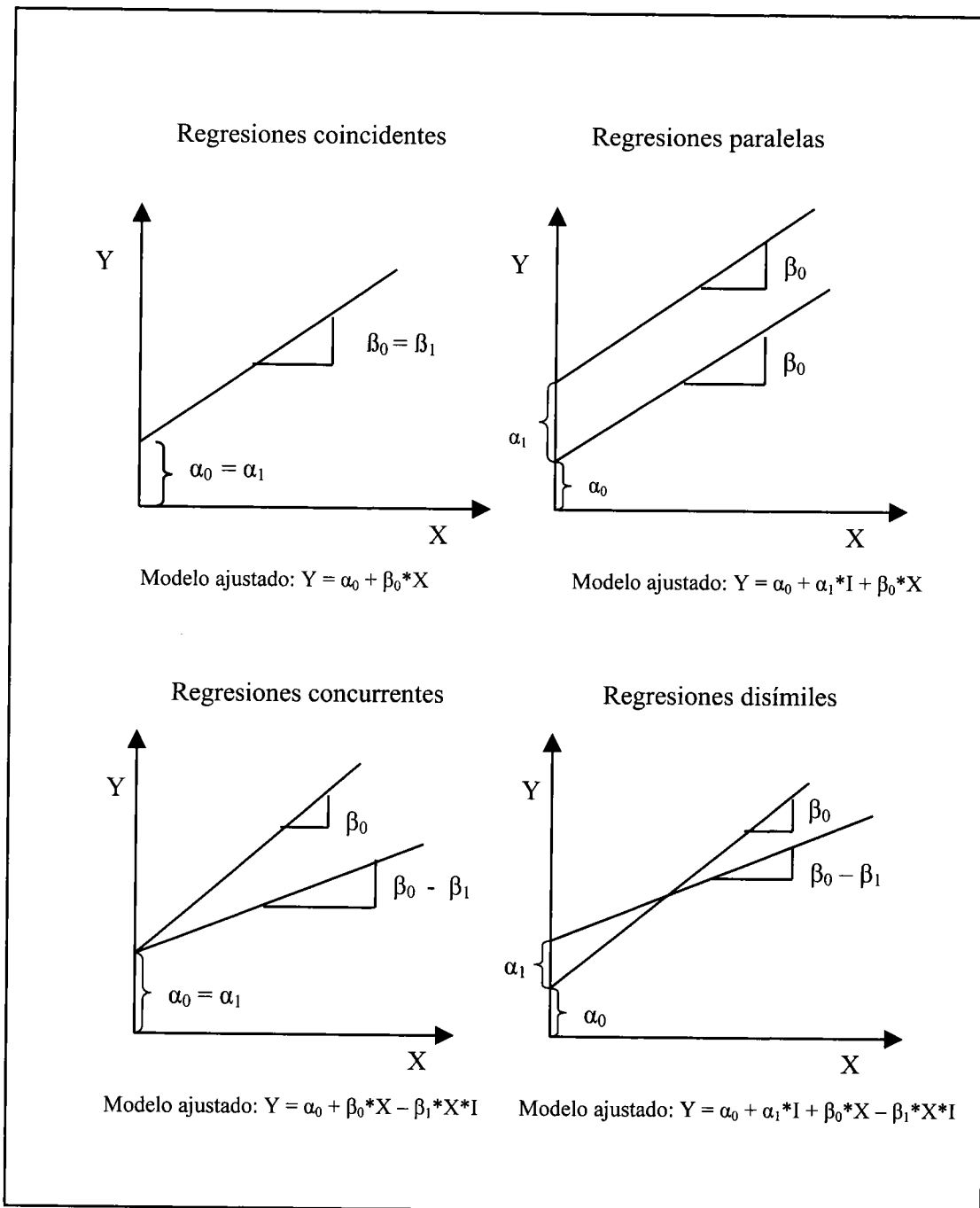
$$\begin{aligned}
 1) \text{ Si } n \text{ es impar } &\Rightarrow \text{Mediana} = X_{((n+1)/2)} \\
 &= (98) / 2 \\
 &= 49
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2) \text{ Si } n \text{ es impar } &\Rightarrow \text{Mediana} = X_{((n+1)/2)} \\
 &= (156) / 2 \\
 &= 78
 \end{aligned}$$

Se consideraron como meses secos, todos los valores de precipitación que están bajo de la mediana e incluida ésta. Por ello, se consideraron como meses húmedos los valores de precipitación que se encuentran sobre la mediana.

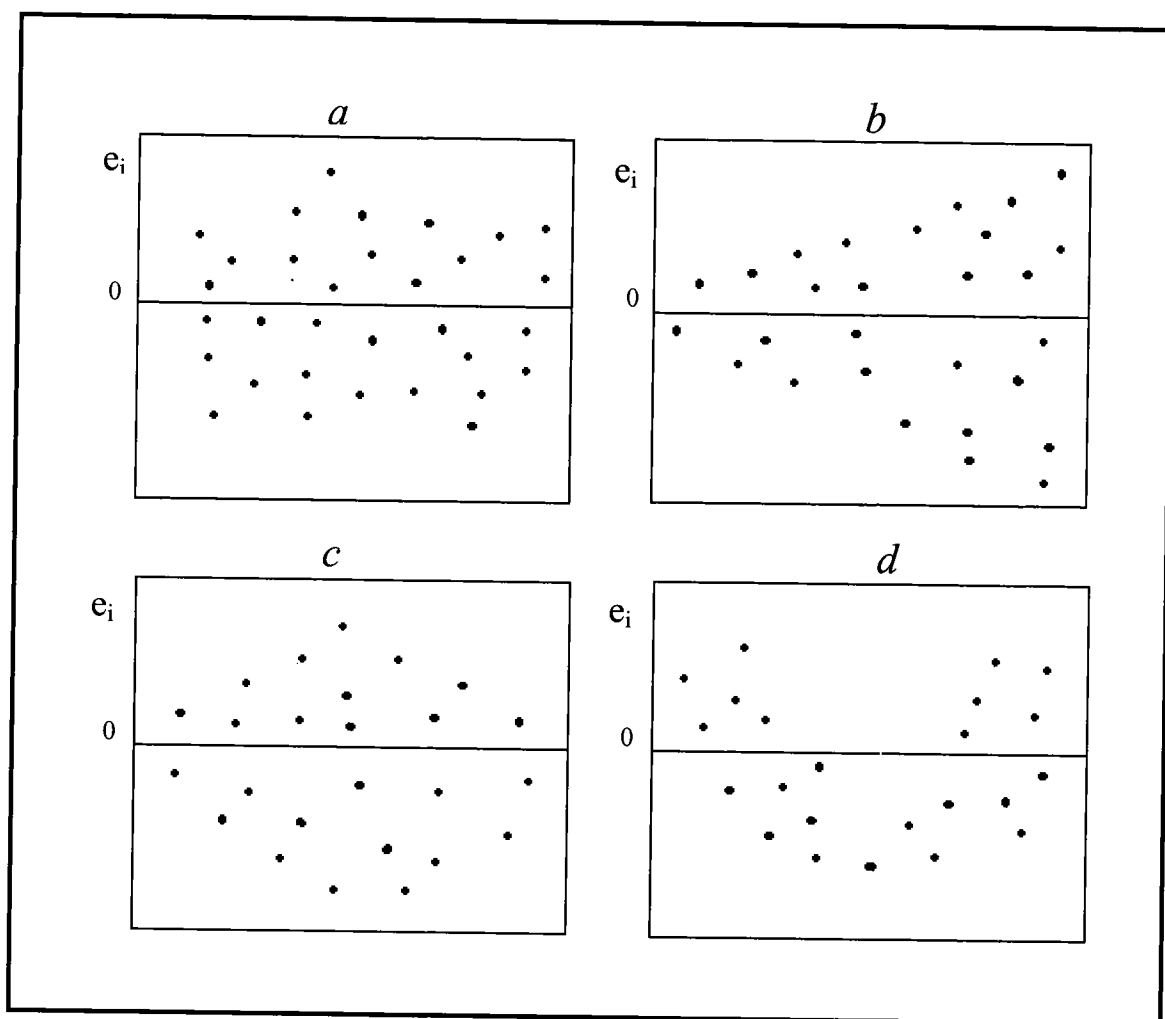
NOTA: El programa excel, entrega automáticamente el valor del número que se encuentra en la mediana, por lo que se evita realizar el procedimiento anterior.

**III.- POSIBILIDADES DE COMPORTAMIENTO DE UN MODELO CON UNA VARIABLE CUALITATIVA CON DOS CLASES.**



Fuente: Gujarati, D. 1992.

## IV.- PATRONES GENERALES DEL COMPORTAMIENTO DE LOS RESIDUOS.



Fuente: Montgomery, D.; Runger, G. 1996.

## V.- MEDIDA CORRECTIVA PARA LA AUTOCORRELACIÓN.

### MÉTODO $\rho$ .

Paso 1: Determinar  $\rho$ , donde  $\rho = (1 - d/2)$ ,  $d$ : estadístico de Durbin – Watson.

Paso 2: Transformación de variables.

Se tiene el modelo original (1)  $Y_t = a + bX_t$ .

Si la expresión (1) se cumple para  $t$ , también se cumple para  $t - 1$ .

Luego, se tiene (2)  $Y_{t-1} = a + bX_{t-1}$ .

Ahora, multiplicando la expresión (2) por  $\rho$ , queda:

$$(3) \rho Y_{t-1} = \rho a + \rho b X_{t-1}.$$

Restando (1) con (3), se obtiene lo siguiente:

$$Y_t^* = a^* + b^* X_t^*$$

Donde:  $a^* = a(1 - \rho)$ ,  $Y_t^* = (Y_t - \rho Y_{t-1})$ ,  $X_t^* = (X_t - \rho X_{t-1})$ .

Paso 3: Correr la regresión  $Y_t^*$  v/s  $X_t^*$ .

Paso 4: Determinar los coeficientes de regresión originales  $a$  y  $b$ .

Donde:

$$a = a^*/(1 - \rho) \text{ y } b = b^*$$

Paso 5: Verificar la no autocorrelación de los modelos (Test de Durbin – Watson). Si persiste este problema, se debe iterar el procedimiento nuevamente, ya que existen modelos con autocorrelación mayor a primer orden.

Cuando se incluyen variables indicadoras en el modelo se sigue el procedimiento anterior y además los siguientes pasos:

1.- Los valores  $I$  (indicadores), son cero para todas las observaciones, que fueron consideradas como tal ( datos de Talca); Los datos de Bullileo que fueron considerados como 1, el valor de  $I$  para la primera observación es  $1/(1 - \rho)$ , y es 1 para todas las demás observaciones.

2.- La variable  $X_t$  se transforma en  $(X_t - \rho X_{t-1})$ .

3.- El valor  $I_t X_t$  es cero para todas las observaciones cuando  $I$  lo indica; Cuando  $I$  toma el valor 1, la primera observación de ésta toma el valor de  $I_t X_t = X_t$  y las observaciones restantes son de forma de  $(I_t X_t - I_t X_{t-1}) = (X_t - \rho X_{t-1})$ .

**Fuente:** Gujarati, D. 1992.

## VI.- REGISTROS DE PRECIPITACIONES (mm.) DE PLUVIÓGRAFO. ESTACIÓN DE TALCA.

AÑO	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	TOTAL
1990	-	-	81,9	24,4	36,0	21,2	42,5	11,4	111,0	22,8	17,2	-	368,4
1991	-	-	-	20,7	192,3	116,9	114,8	20,9	42,3	31,4	-	39,6	578,9
1992	-	-	30,0	29,7	333,5	273,8	27,0	76,7	35,9	3,9	11,6	-	822,1
1993	-	-	-	51,2	123,1	84,6	52,5	35,4	18,8	16,7	14,7	4,3	401,3
1994	-	-	-	31,7	35,7	88,6	122,2	7,7	24,2	13,6	-	5,0	328,7
1995	-	-	-	81,0	36,6	76,9	170,2	70,9	20,7	20,7	-	-	477,0
1996	-	11,6	-	32,0	42,5	49,2	47,6	91,7	-	4,8	9,8	-	289,2
1997	3,8	-	-	40,8	59,6	319,8	53,4	59,0	71,4	85,8	34,3	-	727,9
1998	-	-	-	17,9	33,9	50,4	-	9,6	39,7	-	-	5,7	157,2
1999	-	-	6,3	15,2	39,3	149,5	51,7	52,8	168,3	5,7	-	-	488,8
2000	-	21,3	-	3,8	19,7	365,8	16,5	19,8	122,8	9,7	-	-	579,4
2001	8,2	-	-	41,3	145,5	68,3	214,7	93,0	11,3	6,9	-	-	589,2

PROMEDIO ANUAL = 484,01

VI.- REGISTROS DE PRECIPITACIONES (mm.) DE PLUVIÓMETRO. ESTACIÓN DE TALCA.

AÑO	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	TOTAL
1990	0,4	2,7	82,2	24,6	38,3	21,8	60,9	14,7	113,4	23,3	17,8	0,2	400,3
1991	8,7	0,0	0,0	20,9	214,8	153,4	129,0	21,2	57,1	38,1	8,3	47,0	698,5
1992	0,0	2,8	31,2	55,1	349,4	309,0	28,9	94,1	50,6	11,3	11,8	0,1	944,3
1993	1,3	0,0	0,0	51,9	150,0	121,8	82,4	47,1	19,0	16,5	12,8	4,4	507,2
1994	0,0	0,0	0,9	90,8	50,7	110,7	148,3	12,5	36,1	14,5	1,7	7,8	474,0
1995	0,0	0,0	0,0	70,9	28,3	91,7	282,6	80,9	15,6	23,3	0,0	0,0	593,3
1996	1,6	13,1	4,7	35,8	42,8	64,0	58,6	113,3	1,0	5,6	10,3	8,9	359,7
1997	4,1	5,5	0,2	43,9	74,6	325,0	59,1	77,9	104,8	131,5	35,6	3,5	865,7
1998	0,0	0,2	0,0	18,1	57,6	57,6	3,1	13,0	48,6	0,0	0,0	5,7	203,9
1999	0,9	4,3	6,5	15,7	50,0	159,6	52,9	83,8	187,5	6,1	0,5	0,0	567,8
2000	0,0	23,9	0,0	8,4	27,7	402,7	8,8	21,6	170,7	7,6	8,1	0,0	679,5
2001	24,7	0,0	0,0	43,4	200,0	81,0	281,6	135,5	12,7	8,2	8,1	0,0	795,2

PROMEDIO ANUAL = 590,8 mm.

VI.- REGISTROS DE PRECIPITACIONES (mm.) DE PLUVIÓGRAFO. ESTACIÓN DE BULLILEO.

AÑO	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	TOTAL
1982	41,2	65,0	41,9	66,7	335,4	710,0	506,2	361,2	419,5	298,2	51,6	-	2896,9
1983	43,3	-	-	76,1	228,0	433,8	398,0	167,2	139,4	34,8	-	-	1520,6
1984	-	45,6	20,8	45,5	546,3	226,4	718,6	214,3	245,4	143,9	14,7	-	2221,5
1985	15,5	-	23,4	144,1	302,0	159,2	385,8	57,9	154,9	220,8	69,0	-	1532,6
1986	-	-	27,4	244,8	651,7	664,1	232,9	239,2	21,0	86,8	258,2	-	2426,1
1987	-	-	88,3	32,0	158,8	142,9	683,6	257,3	230,3	195,3	-	-	1788,5
1988	16,8	-	61,9	76,6	102,1	580,7	250,7	369,3	77,4	64,3	18,6	15,8	1634,2
1989	-	-	-	-	49,6	273,1	340,3	287,6	61,6	44,3	-	60,3	1116,8
1990	19,3	22,2	124,5	127,8	197,8	149,6	198,9	105,9	381,9	60,1	74,0	-	1462
1991	15,3	-	-	118,0	793,9	316,4	293,1	77,1	231,3	154,0	32,9	130,8	2162,8
1992	-	12,8	154,6	211,7	763,7	619,2	179,2	134,5	122,0	122,5	22,3	14,6	2357,1
1993	-	-	-	149,0	553,9	843,0	259,8	259,0	89,0	147,5	45,8	79,7	2426,7
1994	-	12,8	-	201,7	145,3	390,5	485,6	45,6	180,3	109,5	15,0	38,6	1624,9
1995	-	-	-	194,0	94,7	713,9	611,1	261,5	77,9	103,7	-	-	2056,8
1996	11,4	52,1	41,7	120,9	137,4	270,4	72,8	231,3	41,6	29,2	45,0	17,5	1071,3
1997	12,3	34,1	-	323,1	208,9	835,1	282,9	169,6	261,5	295,0	72,5	28,9	2523,9
PROMEDIO ANUAL = 1926,42													



VI.- REGISTRO DE PRECIPITACIONES (mm.) DE PLUVIÓMETRO. ESTACIÓN DE BULLILEO.

AÑO	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	TOTAL
1982	47,3	65,2	42,9	87,7	368,8	746,1	538,3	366,6	462,4	345,2	54,5	1,2	3126,2
1983	53,2	6,0	1,1	96,0	235,9	458,3	411,0	184,1	148,7	46,2	0,0	8,6	1649,1
1984	6,5	48,8	21,9	54,2	578,1	346,9	726,9	225,8	298,4	164,5	16,6	2,4	2491,0
1985	17,2	0,0	33,1	182,9	381,0	184,6	438,6	68,1	170,9	267,8	84,6	0,0	1828,8
1986	5,4	7,3	59,4	254,9	713,4	691,0	236,1	269,5	42,5	114,8	310,9	1,6	2706,8
1987	0,0	3,0	90,0	40,9	167,2	184,9	705,5	272,5	269,9	220,0	9,8	8,4	1972,1
1988	17,5	0,0	80,2	86,8	117,8	590,6	264,8	418,5	86,8	84,6	20,9	18,9	1787,4
1989	9,5	13,7	5,4	0,0	76,9	280,6	353,1	335,5	65,8	44,4	10,6	68,7	1264,2
1990	21,6	24,5	124,8	148,8	218,4	150,4	210,7	122,6	422,7	61,4	80,2	7,1	1593,2
1991	18,2	0,0	0,8	152,6	829,6	341,0	342,5	79,5	232,6	159,9	43,7	152,4	2352,8
1992	0,0	14,9	158,6	213,6	779,7	635,6	181,8	143,8	152,0	168,8	45,4	16,5	2510,7
1993	1,7	0,0	2,4	162,2	573,1	892,1	261,9	277,6	96,8	156,5	47,1	85,3	2556,7
1994	9,9	14,5	6,9	206,4	150,2	400,5	508,4	82,9	196,6	115,4	17,8	62,2	1771,7
1995	0,0	9,8	0,3	217,9	106,4	733,7	619,6	305,8	106,5	119,1	1,5	0,0	2220,6
1996	16,0	53,8	42,4	127,3	141,1	274,4	76,6	252,7	44,4	31,3	55,3	18,5	1133,8
1997	14,4	39,3	6,3	355,3	229,8	863,2	304,8	181,8	280,3	320,4	73,9	50,0	2719,5

PROMEDIO ANUAL = 2105,3

**VII.- VALORES MÁXIMOS DE INTENSIDAD EN 30 MINUTOS (cm/h), OBTENIDOS EN LOS MESES DE LOS AÑOS CONSIDERADOS PARA LA ESTACIÓN PLUVIOGRÁFICA DE TALCA.**

<b>AÑO</b>	<b>Ene.</b>	<b>Feb.</b>	<b>Mar.</b>	<b>Abr.</b>	<b>May.</b>	<b>Jun.</b>	<b>Jul.</b>	<b>Ago.</b>	<b>Sep.</b>	<b>Oct.</b>	<b>Nov.</b>	<b>Dic.</b>
1990	-	-	1,28	0,9	1,2	0,4	0,62	1,8	1,26	0,8	0,9	-
1991	-	-	-	0,48	1,26	2,2	0,68	1,94	1,68	2,04	-	0,66
1992	-	-	0,98	0,94	1,28	1,26	0,4	1,86	1,42	0,34	1,38	-
1993	-	-	-	1,0	1,7	0,62	1,16	0,56	2,2	0,4	0,5	0,54
1994	-	-	-	0,7	0,98	0,64	1,42	0,5	0,96	0,52	-	0,22
1995	-	-	-	0,8	1,0	2,4	1,32	0,66	0,5	0,4	-	-
1996	-	0,6	-	0,5	0,68	0,78	0,6	1,0	-	0,5	0,46	-
1997	0,9	-	-	0,6	1,62	1,6	0,62	0,6	1,0	0,92	1,8	-
1998	-	-	-	0,88	0,8	0,68	-	1,34	0,88	-	-	0,32
1999	-	-	0,7	0,8	0,9	1,28	0,8	0,6	1,24	0,88	-	-
2000	-	0,8	-	0,24	0,64	2,36	0,5	0,74	1,6	0,96	-	-
2001	0,5	-	-	0,76	1,4	1,0	1,42	0,9	1,1	0,82	-	-

**VII.- VALORES MÁXIMOS DE INTENSIDAD EN 30 MINUTOS (cm/h), OBTENIDOS EN LOS MESES DE LOS AÑOS CONSIDERADOS PARA LA ESTACIÓN PLUVIOGRÁFICA DE BULLILEO.**

<b>AÑO</b>	<b>Ene.</b>	<b>Feb.</b>	<b>Mar.</b>	<b>Abr.</b>	<b>May.</b>	<b>Jun.</b>	<b>Jul.</b>	<b>Ago.</b>	<b>Sep.</b>	<b>Oct.</b>	<b>Nov.</b>	<b>Dic.</b>
1982	1,14	2,2	0,7	1,34	1,8	2,12	2,56	2,0	1,36	2,28	0,98	-
1983	0,54	-	-	0,9	1	1,98	1,78	1,4	1,06	0,58	-	-
1984	-	1,4	0,6	0,7	1,56	1,28	1,2	0,14	1,72	2,2	0,62	-
1985	0,86	-	0,8	1,4	3,1	1,22	2,54	1,0	1,4	1,74	1,3	-
1986	-	-	0,96	1,32	2,26	2,44	1,52	1,24	0,56	1,48	2,8	-
1987	-	-	1,34	0,48	2,58	1,14	2,14	1,56	1,6	1,74	-	-
1988	0,76	-	0,6	1,88	1,16	2,04	1,3	1,4	0,8	1,24	0,76	0,6
1989	-	-	-	-	0,4	3,08	1,58	1,48	0,98	0,92	-	0,8
1990	0,94	0,88	1,02	1,5	1,6	1,52	1,52	1,3	1,9	0,96	1,08	-
1991	0,72	-	-	3,48	2,4	1,04	0,82	1,0	1,0	1,98	1,96	1,3
1992	-	0,76	2,04	1,58	1,8	1,74	0,98	1,06	1,4	1,08	1,16	0,58
1993	-	-	-	1,28	1,88	4,2	1,4	1,48	1,3	1,08	1,2	1,22
1994	-	0,68	-	1,9	1,28	2,3	2,52	1,9	1,24	2,18	0,48	1,32
1995	-	-	-	1,14	1,8	3,1	1,2	1,36	1,34	1,62	-	-
1996	0,68	1,3	1,14	1,02	1,38	2,52	0,66	1,54	0,6	0,76	1,42	0,76
1997	0,72	1,44	-	2,18	3,38	2,78	1,1	0,96	1,06	2,14	1,46	0,96