



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA

EVALUACIÓN DE LA ERODABILIDAD DE ALGUNOS SUELOS DE
CHILE DE USO ACTUAL FORESTAL MEDIANTE ÍNDICES
BASADOS EN PROPIEDADES DEL SUELO DE FÁCIL MEDICIÓN

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

ANGIE CAMILA ABARZÚA MUÑOZ

Prof. Guía: Sr. Juan Pablo Fuentes Espoz. Ingeniero Forestal, MS, Ph.D.

Santiago, Junio

2017

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y
DE LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA

EVALUACIÓN DE LA ERODABILIDAD DE ALGUNOS SUELOS DE
CHILE DE USO ACTUAL FORESTAL MEDIANTE ÍNDICES
BASADOS EN PROPIEDADES DEL SUELO DE FÁCIL MEDICIÓN

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

ANGIE CAMILA ABARZÚA MUÑOZ

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Juan Pablo Fuentes Espoz	...7,0...
Prof. Consejero Sr. Eduardo Martínez Herrera	...7,0...
Prof. Consejero Sr. Mario Gallardo Peña	...7,0...

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Variabilidad de los suelos del país y procesos de erosión antropogénicos	1
1.2 Factores que afectan el proceso de erosión	2
1.3 Erodabilidad	3
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo General	6
1.4.2 Objetivos específicos	6
2. MATERIAL Y MÉTODO	7
2.1 Material	7
• Área de estudio	7
2.2 Método	8
2.2.1 Caracterización de los sectores de estudio, muestreo y determinación de la erosión <i>in situ</i>	8
2.2.2 Análisis de laboratorio	10
2.2.3 Determinación de la erosión mediante métodos cuantitativos	11
2.2.4 Determinación de índices de erodabilidad basados en la agregación estructural y estabilidad	13
• <i>Relación mecánica de Bouyoucos (KB)</i>	13
• <i>Índice de separabilidad de partículas (ISP)</i>	14
• <i>Índice de Sellado-Encostrado de los suelos (ISE)</i>	15
• <i>Estimación de coeficiente K mediante la formula empírica de la USLE</i>	15
2.2.5 Análisis de la información	16
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
3.1 Grado de erosión	18
3.1.1 Análisis de tasas de erosión por zonas geográficas	18
3.1.2 Análisis de erosión por geoforma	20
3.1.3 Análisis de factor topográfico <i>LS</i>	21
3.1.4 Análisis de Tasas de Erosión según aproximación metodológica	24
3.2 Índices de erodabilidad	24
3.2.1 Relación entre índices de erodabilidad	26

3.2.2	Análisis de índices de erodabilidad por zona geográfica	30
3.2.3	Análisis de índices de erodabilidad por unidades geomorfológicas	33
3.3	Efecto de propiedades físicas y químicas en índices de erodabilidad.....	36
3.3.1	Efecto de carbonato de calcio en índices de erodabilidad.....	36
3.3.2	Efecto de materia orgánica y cobertura vegetal en índices de erodabilidad	38
4.	CONCLUSIONES	41
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	45
6.	APÉNDICES.....	59
Apéndice I.	Tasas de erosión	59
Apéndice II.	Factor topográfico <i>LS</i>	59
Apéndice III.	Factores de tasas de erosión.....	60
Apéndice IV.	Índice de concordancia Kappa de Cohen en tasas de erosión.	60
Apéndice V.	Índices de erodabilidad	61
Apéndice VI.	Carbonatos e índices de erodabilidad y tasas de erosión.....	62
Apéndice VII.	Contenido de materia orgánica e índices de erodabilidad y tasa de erosión.	63
Apéndice VIII.	Efecto de porcentaje de materia orgánica en tasas de erosión.	64
Apéndice IX.	Cobertura vegetal en índices de erodabilidad.....	65
Apéndice XI.	Efecto de carbonatos en texturas.	66
Apéndice XII.	Efecto de materia orgánica en textura.	67
Apéndice XIII.	Texturas según zona geográfica.....	68
Apéndice XIV.	Texturas según geomorfología.	70
Apéndice XVI.	Propiedades edáficas según zonas geográficas.....	75
7.	ANEXO.....	76
Anexo I.	Caracterización de áreas de muestreo.	76
Anexo II.	Pautas de evaluación de campo.	81
Anexo III.	Pautas de asignación para factor C en modelo USLE.	84
Anexo IV.	Pauta de asignación para factor de prácticas de conservación.	89

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Descripción de geoformas	8
Cuadro 2: Susceptibilidad a la separación de acuerdo al índice de separabilidad de partículas.	15
Cuadro 3: Promedios y desviación estándar de índices de erodabilidad según zonas geográficas analizadas.	25
Cuadro 4: Cuartiles de tasa de erosión <i>USLE</i> con zonas geográficas.	59
Cuadro 5: Cuartiles de tasa de erosión <i>USLE modificada</i> con zonas geográficas.	59
Cuadro 6: Correlación y coeficiente de determinación factor <i>LS</i> y tasas de erosión.	59
Cuadro 7: Correlación y coeficientes de determinación entre factores de <i>USLE</i> y tasas de erosión.	60
Cuadro 8: Índice de concordancia entre <i>USLE</i> y <i>Método de Campo Visual</i>	60
Cuadro 9: Índice de concordancia entre <i>USLE Modificada</i> y <i>Método de Campo Visual</i> . .	61
Cuadro 10: Correlación y coeficientes de determinación entre índice <i>K</i> e índices de erodabilidad.	61
Cuadro 11: Correlación y coeficientes de determinación entre contenido de carbonatos e índices y tasas de erosión.	62
Cuadro 12: Correlación y coeficientes de determinación entre porcentaje de materia orgánica e índices y tasas de erosión.	63
Cuadro 13: Comparación entre presencia y ausencia de cobertura vegetal en índices de erodabilidad.	65
Cuadro 14: Valores medios de las propiedades edáficas determinadas con su desviación estándar.	75
Cuadro 15: Áreas de muestreo y algunas características principales de éstas.	76
Cuadro 16: Indicador de acuerdo al tiempo de ocurrencia (Casanova, 2008).	81
Cuadro 17: Indicador según tipo de erosión (Casanova, M., 2008).	82
Cuadro 18: Indicador de erosión a nivel de campo (Stocking y Murnaghan, 2000).	83
Cuadro 19: Valores C para terrenos forestales sin alterar.	84
Cuadro 20: Valores de factor C para praderas permanentes, terrenos, baldíos y bosques pastoreados.	84
Cuadro 21: Valores de factor C para áreas de bosques alterados mecánicamente o con métodos de preparación de sitio (Adaptado de tabla 12 del manual <i>USLE</i> , Wischmeier y Smith, 1978).	85
Cuadro 22: Valores para el sub-factor de la cubierta del dosel (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984).	86
Cuadro 23: Valores para sub-factor de almacenamiento in-situ en el cual las características enunciadas son sistemáticamente continuas espacialmente (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984).	86
Cuadro 24: Valores para el sub-factor de la secuencia de saltos en el terreno (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984).	87
Cuadro 25: Valores de sub-factor de labranza en contorno (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984).	87

Cuadro 26: Valores para el efecto combinado de los sub-factores de proporción de suelo desnudo, raíces finas y reconsolidación del suelo en suelos forestales sin labranza (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984).....	88
Cuadro 27: Valores para el sub-factor de raíces finas para el caso de plantas invasoras en terrenos forestales labrados.	88
Cuadro 28: Factor P de prácticas de conservación.	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Zonas de muestreo consideradas en este estudio.	7
Figura 2: Esquema de obtención de factor <i>LS</i> en sistemas de información geográfica.....	13
Figura 3: Variación de tasa de erosión <i>USLE</i> según zonas geográficas	19
Figura 4: Variación de tasas de erosión <i>USLE</i> y <i>USLE modificada</i> según geoformas.....	21
Figura 5: Efecto del factor topográfico <i>LS</i> , determinado en campo y por geoprocesamiento en los valores de tasas de erosión mediante <i>USLE</i>	23
Figura 6: Relación del índice de erodabilidad <i>K</i> con índices de erodabilidad <i>KB</i> , <i>ISP</i> e <i>ISE</i>	29
Figura 7: Relación entre el índices de erodabilidad <i>K</i> con <i>ISE</i> según zona geográfica.....	32
Figura 8: Índices de erodabilidad <i>K</i> , <i>KB</i> , <i>ISP</i> e <i>ISE</i> según geoformas.	35
Figura 9: Relación entre el índice de sellado – encostrado (<i>ISE</i>) y carbonatos de calcio...	37
Figura 10: Relación entre el porcentaje de materia orgánica e índice de erodabilidad <i>K</i> ...	39
Figura 11: Comparación de texturas con y sin presencia de carbonatos.	67
Figura 12: Comparación de texturas con y sin presencia contenido de materia orgánica.	68
Figura 13: Comparación de texturas según zonas geográficas.	70
Figura 14.A: Comparación de texturas según geoformas.....	72
Figura 14. B: Comparación de texturas según geoformas.	73
Figura 15: Relación entre el índice de erodabilidad <i>K</i> y <i>relación mecánica de Bouyoucos</i> en zona centro.	74
Figura 16: Relación entre índices de erodabilidad en zona centro-sur.	74

RESUMEN

La humanidad ha dado diferentes usos al suelo, que en ocasiones están asociados a prácticas no sustentables que generan la degradación de este recurso. Por lo tanto, es relevante el estudio de las propiedades y procesos intrínsecos del suelo que puedan influir en la disminución de los procesos degradativos. Entre los procesos que disminuyen la susceptibilidad a la degradación se encuentra la acción de agentes cementantes (presencia de *e.g.* carbonatos y materia orgánica) y como propiedades se puede mencionar la evaluación de índices más complejos que muestran la susceptibilidad del suelo a la disgregación y transporte de sus partículas por agentes erosivos. Esto último se enmarca dentro del concepto de erodabilidad.

En Chile no existe gran cantidad de estudios que determinen estas propiedades; generalmente se ha utilizado el factor de erodabilidad K de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (*USLE*) para comprender dicha cualidad. El objetivo de este estudio fue evaluar la erodabilidad de algunos suelos chilenos ubicados, en las zonas norte, centro y centro – sur del país, utilizando índices con propiedades de suelo de fácil medición. En este sentido, se compararon la relación mecánica de Bouyoucos (KB), el índice de separabilidad de partículas (ISP) y el índice de sellado – encostrado (ISE), con el índice determinado en la *USLE*. También se estimaron tasas de erosión mediante pauta de campo de Stocking y Murnaghan, *USLE* y *USLE modificada*, para determinar el grado de erosión de los suelos en estudio.

Por último, se evaluó el porcentaje de materia orgánica y el contenido de carbonatos, para determinar sus influencias en los índices de erodabilidad. Se muestrearon suelos superficiales (0-10 cm) bajo cobertura y sin cobertura vegetal y se caracterizaron ambientalmente los puntos de muestreo en las zonas norte, centro y centro – sur del país. Se realizaron análisis de correlación de rangos de Spearman entre los índices de erodabilidad y el índice K . El ISE presentó una correlación significativa con K en todas las zonas de estudio, mientras que ISP solo en la zona centro – sur, KB no obtuvo correlación significativa. Las tasas de erosión estimadas, - *USLE* y *USLE modificada* -, presentaron una baja correlación con la *Pauta de campo*. Por su parte *USLE*, mostró que la erosión es menor en la zona centro – sur y mayor en la zona centro. La cantidad de carbonatos tiene una correlación importante con ISE . Por lo tanto, se podría considerar la cantidad de carbonatos en el uso de ISE , particularmente en suelos de zonas áridas, donde el contenido de carbonatos puede ser un agente de cementación y de agregación importante, que puede contrarrestar por lo general, las pequeñas cantidades de materia orgánica del suelo.

El ISE mostró ser el más adecuado para determinar erodabilidad, por su alta correlación con K y sensibilidad a los agentes cementantes.

ABSTRACT

During the history, mankind has given different uses to the soil; in some cases these uses have been associated to non-sustainable practices that have led to the degradation of this natural resource. Hence, the study of intrinsic soil properties that can reduce land degradation are of great relevance. Among the factors that can decrease the susceptibility to soil degradation, is the presence of cementing agents (*e.g.* carbonates and organic matter). Thus, soil indexes that include the effect of cementing agents allow a better understanding of the susceptibility of soils to disaggregation and particle transport by erosive agents such as water. This susceptibility is usually framed within the concept of erodibility.

In Chile there are few studies that have determined erodibility indexes. The erodibility factor K from the Universal Soil Loss Equation (*USLE*) has been the most common one to comprehend the susceptibility of soils to erosion. The objective of this study was to evaluate the erodibility of some Chilean soils located in the North, Central and South-Central part of the country, by using indexes constructed with soil properties of easy measurement. In this regard, the mechanical relation of Bouyoucos (KB), the particle separability index (ISP), and the crusted - sealing index (ISE) were compared with the empirical index of the *USLE* model. Also, the rates of soil erosion were estimated by the *field approach* of Stocking and Murnhagam, the *USLE* model, and a *modified USLE model*. We finally evaluated, the effect of organic matter and carbonate contents and their influence in some of the erodibility indexes. Soil samples of topsoil horizons (0-10 cm) were extracted in zones under plant cover as well as in zones without vegetation coverage. Spearman ranks correlation between K , KB , ISP , and ISE was performed. The ISE showed a significant correlation with K in all the studied areas, meanwhile the ISP only showed a significant correlation with K in soils from the South Central zone. The KB index had no significant correlation with K . The rates of erosion estimated, by the *USLE* and *modified USLE*, increased from South to North. The amount of carbonate had an important correlation with ISE . Hence, the use of the ISE should consider the amount of carbonates, particularly in soils of arid zones, where carbonate contents can be an important cementing and aggregating agent that can counteract the usually small amounts of soil organic matter. Due to the high correlation of ISE with K and its sensitivity to the presence of cementing agents, the ISE seems to be the most suitable index for the measurement of soil erodibility.

1. INTRODUCCIÓN

Los suelos son sistemas naturales complejos, de gran variabilidad debido a la acción de agentes climáticos, geológicos y bióticos, que influyen en las características y propiedades de éstos, permitiendo el desarrollo y crecimiento de plantas y seres vivos (Crosara, 2007). El ser humano le ha dado diferentes usos al suelo a lo largo de la historia. Cuando dichos usos han estado asociados a prácticas no sustentables, los sistemas edáficos se hacen más susceptibles a la erosión, afectando entonces directamente la salud y productividad de los sistemas. La evaluación de los procesos erosivos, pasa por estimar las condiciones del suelo que hacen que éste sea más resistente o más propenso a la pérdida de material edáfico. Esto se puede lograr a través de indicadores que entreguen información relevante sobre las condiciones intrínsecas de este medio. En este sentido, una propiedad relevante a considerar es la erodabilidad del suelo (K), la cual es definida como una medida de la susceptibilidad del suelo a la disgregación o separación de las partículas y al transporte de éstas por agentes erosivos (Lal y Elliot, 1994).

1.1 Variabilidad de los suelos del país y procesos de erosión antropogénicos

En Chile existe una diversidad de suelos, debido a la gran cantidad de procesos genéticos que han intervenido en su origen (Santibañez *et al.*, 2000). Luzio (2010) plantea que es posible identificar ocho zonas edáficas en el país (zona desértica, zona árida y semiárida, zona mediterránea árida, zona mediterránea húmeda, zona húmeda, zona de Magallanes, zona Antártica y suelos de las islas de Pascua y de Juan Fernández), cada una con características muy particulares en sus propiedades, que permiten distinguir unas de otras. Sin embargo, esta clasificación no sugiere que exista una uniformidad u homogeneidad de los cuerpos de suelos en cada zonificación, pues las condiciones fisiográficas y geográficas de Chile, no permiten que esto sea posible.

Para nuestro país existe una relación directa entre las superficies afectadas por procesos erosivos y la fragilidad de los ecosistemas, siendo factores como la topografía del territorio y el mal manejo del suelo y el agua los principales causantes de dicho deterioro (Santibañez *et al.*, 2000). La Cordillera de los Andes se ve afectada por acciones erosivas, que producen sedimentación hacia la Depresión Intermedia, mientras que la Cordillera de la Costa presenta un alto grado de meteorización del basamento rocoso, que junto al relieve y tipo de suelo, facilitan la formación de cárcavas (Santibañez *et al.*, 2000). Estos procesos erosivos se deben principalmente a que los terrenos de uso agrícola, de extracción de leña y madera, pastoreo y grandes industrias se encuentran insertos en ecosistemas frágiles, lo que acelera estos procesos (Universidad de Chile, 1997). Consecuencia de lo anterior, actualmente la erosión en los suelos de Chile, resulta uno de los mayores problemas

medioambientales dentro del sector silvoagropecuario (CIREN, 2010a). Más aún, este recurso no es renovable a escala humana, ocasionando que el suelo sea más vulnerable a la acción antrópica y a las variables climáticas (Yoma, 2003). Esto conlleva a que exista un 49,1% del territorio nacional con algún grado de erosión, existiendo un 38% de los suelos con erosión moderada a muy severa, lo cual aumenta de sur a norte, siendo las regiones con mayores problemas de erosión la de Coquimbo, Valparaíso y Región de O'Higgins con un 84, 54 y 52% de suelos erosionados, respectivamente (CIREN, 2010b).

1.2 Factores que afectan el proceso de erosión

Ritter (2012) menciona que para poder determinar el grado de erosión en los suelos, se deben considerar diversos factores que influyen en este proceso, siendo las precipitaciones uno de las principales causantes. El impacto que tiene la gota de lluvia sobre el suelo ocasiona rompimiento y dispersión de sus agregados, provocando que las partículas finas ya sea de arena, limo, arcilla y materia orgánica, sean rápidamente transportadas por el agua superficial. El efecto que tiene la gota de lluvia, depende tanto de la frecuencia como de la intensidad de las precipitaciones, siendo esta última la más influyente, puesto que a una mayor intensidad de lluvia, menor es la velocidad de penetración de agua al suelo (Horton, 1945). El impacto que tiene la frecuencia de las precipitaciones depende de las condiciones del terreno, así por ejemplo cuando existen períodos cortos entre lluvias, el suelo tiene un alto contenido de humedad, lo que implica que haya una mayor posibilidad de que se origine escorrentía, independientemente si la intensidad de esta es baja; caso contrario ocurre cuando los intervalos entre lluvias son mayores (Suárez, 1980). Otro factor influyente en la erosión del suelo es la pendiente y su longitud, puesto que entre más pronunciada y larga sea la gradiente, mayor es el riesgo de erosión. Lo anterior, se debe principalmente a la acción del agua, ya que ésta aumenta la velocidad de la escorrentía superficial, a través del largo de la pendiente, no siendo capaz de infiltrarse en el suelo, generando una mayor capacidad de carga de sedimentos transportados (Ritter, 2012). El mismo autor, menciona que los factores antes mencionados se encuentran directamente relacionados con la cobertura vegetal, la cual es otro componente que interviene en los procesos de erosión, puesto que ésta protege al suelo del impacto de la gota de lluvia y de la dispersión de partículas que se genera, frenando la escorrentía superficial, y permitiendo que el agua infiltre en el suelo. Ciertamente, el nivel de resguardo que se produce depende del tipo de vegetación, la cobertura que presenta y el período en que se encuentre, pues si existe una cobertura de protección completa que involucre pastos y bosques, ésta será muy eficiente para evitar erosión, o bien, si se trata de una cobertura parcial, ésta permitirá que exista flujo de agua y a la vez se proteja al suelo. Por lo tanto, el grado de protección que genera la cobertura vegetal, está relacionado con el tipo de manejo que se le realice (FHIA, 2004; Stocking y Murnaghan, 2000).

Cabe destacar que la incidencia que tengan estos factores de erosión sobre el suelo, dependen del tipo y de las propiedades que éste presente, puesto que el daño que pueda afectar a un suelo, varía a lo largo de su perfil, ya que existe la posibilidad de que sus capas superficiales tengan propiedades distintas a las capas sub-superficiales, provocando que estas últimas sean menos erosionables, lo que ocasiona que las tasas de pérdida de suelo varíen a lo largo del tiempo (Lal y Elliot, 1994; United States Department of Agriculture, USDA, 2014). Un indicador que evalúe el efecto de varios factores causantes de erosión, y que permita medir la susceptibilidad que tiene el suelo a ser erosionado, a través del estudio de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, es por ende relevante para la interpretación de la fragilidad de un sistema y su manejo. Es en este sentido que nace el concepto de erodabilidad.

1.3 Erodabilidad

La erodabilidad del suelo, es una medida de la susceptibilidad de éste a la disgregación o separación de las partículas y al transporte de éstas por agentes erosivos (Lal y Elliot, 1994). La erodabilidad depende primeramente de las características físicas del suelo, de la naturaleza, cantidad y distribución de sus agregados, y del contenido de materia orgánica que presenta. Sin embargo, estas características físicas dependen, a su vez, del uso que se le da al suelo, y por tanto dichas propiedades también pueden variar (Singh y Khera, 2008).

Ritter (2012) y O'geen *et al.* (2006) establecen que las propiedades más influyentes en el factor de erodabilidad son la textura (tamaño y distribución de partículas), estructura, contenido de materia orgánica y la permeabilidad, ya que suelos con tasas de infiltración elevadas, alto contenido de materia orgánica y mejor estructura, tienen mayor resistencia a la erosión. Estos autores señalan que la textura es un excelente indicador para la estimación de la erodabilidad, pues suelos con altos contenidos de limo y arenas muy finas (0.005 a 0.10 mm en diámetro), o la expansión de minerales de arcilla tienden a ser altamente erodables, mientras que suelos ricos en arcilla con una baja capacidad de contracción tienen una baja erodabilidad, debido a que estas partículas se encuentran en masa formando grandes agregados que resisten la separación y el transporte.

La estructura es la unión de las partículas individuales del suelo que forman agregados más grandes, y su importancia radica en que suelos con una estructura bien desarrollada permiten, a través de sus grandes poros, una mayor capacidad de infiltración de agua, lo cual reduce la escorrentía y por lo tanto la erosión. La permeabilidad es una medición de la tasa de infiltración del agua en el suelo, donde suelos altamente permeables permiten el paso rápido del agua, disminuyendo la escorrentía, y por ende la erosión. Sin embargo en el caso que el horizonte sub-superficial del mismo suelo, tenga una permeabilidad muy lenta, se podría formar una capa de agua retenida, lo que se traduce a escorrentía superficial que

produce erosión. Por lo tanto, la permeabilidad se puede asumir como una función de la textura, estructura y también de la densidad aparente de suelo.

Por último el contenido de materia orgánica, es un agente de agregación que une las partículas minerales para formar la estructura del suelo, donde los residuos orgánicos que aún no se descomponen protegen la superficie del suelo contra el impacto de las gotas de lluvia. Del mismo modo, la materia orgánica altamente descompuesta (humus) actúa como un “adhesivo” que une las partículas del suelo formando agregados, lo cual hace suponer que un gran contenido de materia orgánica, otorga mayor resistencia a la erosión.

Existen muchas formas de poder evaluar la erodabilidad del suelo, como por ejemplo a través de técnicas de parcelas de campo directo, que es un buen método de estimación de erodabilidad (Wischmeier y Smith, 1978; Arab *et al.*, 2013). Sin embargo, estas parcelas tienen ciertas dificultades de ser implementadas, ya que son costosas, requieren de mucho tiempo y no son factibles para todos los lugares (Singh y Khera, 2008). Por tal razón existen otras formas de estimar la erodabilidad de un suelo, como la que es utilizada en la fórmula empírica desarrollada por Weischmeier *et al.* (1971) para determinar pérdidas anuales de suelo, la cual es conocida como Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (*USLE*), que involucra componentes como el clima, topografía, prácticas de manejo y suelo y un índice de erodabilidad “*K*” (Ecuación 1). Este último índice, de tipo empírico, representa la vulnerabilidad que tiene el suelo a la erosión y que considera propiedades tales como la textura (*M*), el contenido de materia orgánica (*a*), grado de estructuración (*b*) y permeabilidad (*c*) (Rejman *et al.*, 1999; Arab *et al.*, 2013).

$$K = 2.8 * 10^{-7} * M^{1.14}(12 - a) + 4.3 * 10^{-3}(b - 2) + 3.3 * 10^{-3}(c - 3) \text{ (Ec. 1)}$$

Existen otros métodos de estimación de erodabilidad de suelo que se basan en la medición de las propiedades de éste a través de análisis en laboratorio y que permiten generar índices de erodabilidad que se basan en las propiedades que gobiernan la agregación o estabilidad de agregados. Dentro de estos índices encontramos la relación de dispersión desarrollada por Middlenton (1930), la cual mide el grado de agregación de un suelo a través de la dispersión de sus partículas, donde un suelo que tiene facilidad de dispersarse, presenta un mayor riesgo de erosión. Otro índice es el propuesto por Bouyoucos (1935) que mide la relación de arcilla, basado en la velocidad de sedimentación de las partículas del suelo, permitiendo determinar el porcentaje de éstas. También existen índices que miden la estabilidad de agregados, los cuales miden la fuerza de cohesión entre las partículas de suelos, mediante la aplicación de una fuerza disruptiva (Kemper y Rosenau, 1986). Asimismo Florentino (1998) propuso índices que miden la susceptibilidad que tiene el suelo a la separabilidad de sus partículas, como consecuencia de la formación de sello

superficial o encostramiento del suelo, cuando éste es humedecido o por la acción de fuertes lluvias. Todos estos índices son detallados en la sección 2.2.2.4 de este estudio.

Se debe considerar que todos los métodos e índices que estiman la erodabilidad del suelo son relativos, y no tienen por qué reflejar el comportamiento del suelo en respuesta a la lluvia o a prácticas de manejo, pues son aproximaciones a lo que puede suceder frente a dichos eventos. Los métodos de campo, que miden la pérdida de suelo a través de la escorrentía generada por lluvia natural, entregan resultados más cercanos a la realidad que los índices mencionados (Arab *et al.*, 2013).

En Chile no existe una gran cantidad de estudios que determinen la erodabilidad del suelo y generalmente se ha utilizado el factor de erodabilidad K como aproximación para comprender esta propiedad. Este factor de erodabilidad se ha obtenido de una función general creada en Estados Unidos de Norteamérica, la cual relaciona textura, contenido de materia orgánica y agregación, con la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica. Otros índices o indicadores de erodabilidad no han sido utilizados de manera extensiva, desconociéndose su potencial utilidad, y por tanto este estudio, tiene como propósito comparar diferentes aproximaciones para el cálculo o determinación de la erodabilidad, teniendo como patrón de comparación el índice de erodabilidad usualmente utilizado en nuestro país.

1. 4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la erodabilidad de algunos suelos de Chile de uso actual forestal mediante índices basados en propiedades del suelo de fácil medición.

1.4.2 Objetivos específicos

- Establecer el estado o grado de erosión de los suelos en estudio.
- Estimar índices de erodabilidad basados en propiedades físicas y químicas de los suelos en estudio.
- Determinar el efecto de algunas propiedades físicas y químicas del suelo en los índices de erodabilidad.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1 Material

- Área de estudio

Se seleccionaron suelos de las zonas norte, centro y centro – sur del país (Figura 1), extendiéndose desde 28°41'15.97" latitud Sur y 70°48'2.11" longitud Oeste hasta 37°27'0.28" latitud Sur y 72°48'26.70" longitud oeste, abarcando sectores costeros, de valles y lomajes interiores y precordilleranos (Anexo 1), con la finalidad de abarcar un amplio rango de suelos con características físicas y químicas variadas.

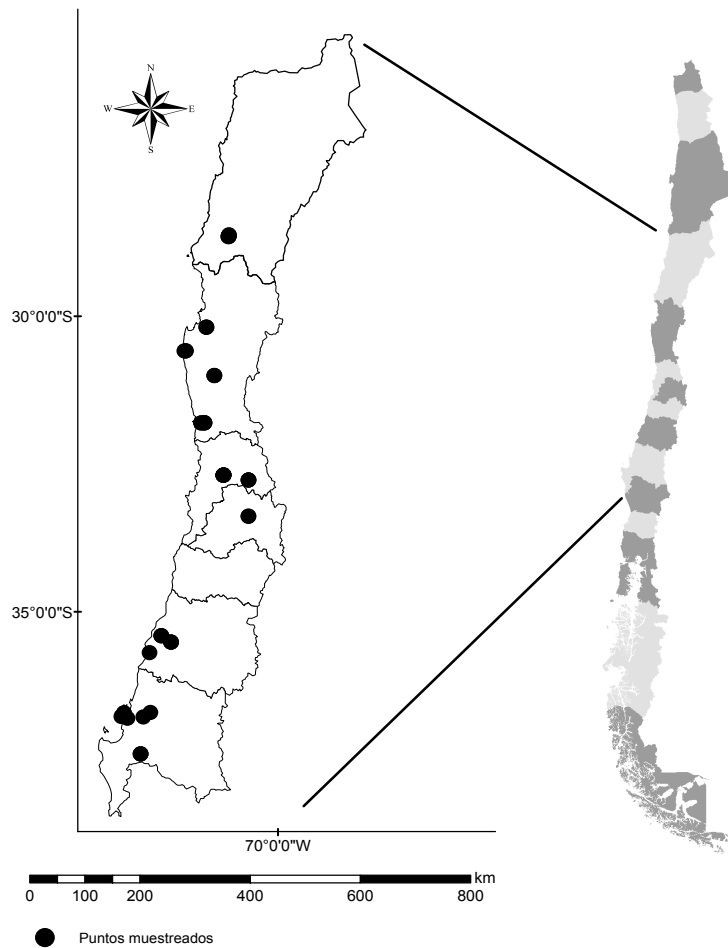


Figura 1: Zonas de muestreo consideradas en este estudio.

2.2 Método

2.2.1 Caracterización de los sectores de estudio, muestreo y determinación de la erosión *in situ*.

El estudio de suelos abarcó una amplia extensión del territorio nacional (Región de Atacama hasta Región del Bío-Bío), y para efectos de este trabajo se dividió en tres zonas geográficas: zona norte (Región de Atacama y Región de Coquimbo) que tiene un clima árido y semi-árido, zona centro (Región de Valparaíso y Región Metropolitana) con un clima mediterráneo propiamente tal y la zona centro – sur (Región del Maule y Región del Bío-Bío) que presenta un clima templado – húmedo. Para cada uno de los sectores, se realizó un análisis visual en terreno que consideró variables tales como el grado de erosión del suelo, especies vegetales dominantes, porcentaje de cobertura vegetal general, geoformas (Cuadro 1), pendiente y largo de pendiente. Posteriormente se obtuvieron muestras de suelo de los primeros 10 cm de profundidad (con un área de extracción de 30 x 30 cm [0.09 m²]), ya que la susceptibilidad a la erosión se aprecia preferentemente en el epipedón. Para la mayoría de los sectores de estudio se consideraron tres puntos de muestreo bajo cobertura vegetal de la o las especies dominantes y tres puntos de muestreo en áreas descubiertas de vegetación, obteniéndose un total de seis muestras por sector, con un peso aproximado de 1 Kg por muestra. Esto último con la finalidad de establecer el efecto de la vegetación (a través de la acumulación de materia orgánica) en la erodabilidad del suelo en cada uno de los sistemas analizados. Las muestras fueron secadas al aire y transportadas al Laboratorio de Ecología de Suelos de la Universidad de Chile (Ventura Matte), en el cual se determinaron la distribución del tamaño de partículas, el porcentaje de materia orgánica y cantidad de carbonatos en el suelo.

Cuadro 1: Descripción de geoformas

Geoformas	Descripción ¹
Cono aluvial	Es una acumulación de sedimentos sobre la base más llana de un fuerte montañoso o área motañosa, en el cual disminuye la pendiente al expandirse el relieve ² .
Cima de cerro	Es el punto de mayor altitud de un cerro. Cerro corresponde a una geoforma de cima plana con pendientes elevadas en su parte alta.

¹Abraham, E.; Salomon, M., Componente morfoedáfico. Capítulo I: geomorfología. S.a.

²Patton, C.P.; Alexander, CH. S.; Kramer, F.L., 1970. Physical geography. Wandsworth, Belmont, California.

Geoformas	Descripción ¹
Ladera de cerro	Corresponde a cada una de las pendientes que limitan lateralmente a un cerro, ubicadas en sentido contrario.
Llanura aluvial	Es una faja de terreno llano que está compuesta por aluvión depositado sobre el fondo plano del valle, marginando algunos cauces de ríos.
Lomaje	Son de crestas subredondeadas a planas que presentan flancos cortos de fuertes pendientes ³ .
Piedmont	Es una transición entre relieves montañosos, accidentados y las áreas bajas circundantes.
Quebradas	Es una abertura estrecha entre dos montañas.
Terraza marina	Es una antigua línea de costa, formada por una plataforma de abrasión que se ubica por encima del actual nivel del mar
Valle intermontano	Es un ambiente de agradación entre lomajes y cerros, cuya morfogénesis fue dada por la dinámica fluvial.

³Ojeda, G.; Lacreu, H.; Sosa, G.; Gómez, H.; Dueñas, D., 2008. Atlas de recursos geoambientales. Municipio de Juana Koslay, Argentina. 10p.

Cabe mencionar que se determinó la estructura y porcentaje de pedregosidad del perfil de suelo basado en la “Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo” desarrollado por el USDA (1999). Estas dos últimas propiedades fueron utilizadas para evaluar el grado de erosión visual del suelo, por medio del método propuesto por Casanova (2008), que se basa en indicadores de degradación erosiva del suelo, tales como el tiempo de ocurrencia y tipo de erosión (Anexos 2 y 3), incluyendo además la pauta realizada por Stocking y Murnaghan (2000), la cual mide indicadores de erosión a nivel de campo (Anexo 4), con estimaciones de tasas de erosión menores a 1 (Mgha⁻¹), - erosión natural -, hasta mayores de 500 (Mgha⁻¹) considerada como erosión catastrófica.

2.2.2 Análisis de laboratorio

2.2.2.1 Distribución de tamaño de partículas

La distribución del tamaño de partículas se determinó a través del tamizaje de las muestras (Fracciones entre 2 y 0.05 mm) y posterior aplicación del método del hidrómetro (*Bouyoucos*) en las fracciones menores a 2 mm. Para el total de las zonas y muestras analizadas se consideró la determinación de la distribución del tamaño de partículas en función de los contenidos de materia orgánica, contenidos de carbonatos y de sales solubles. En las muestras de suelo con un contenido de materia orgánica mayor a un 5%, el análisis de textura se realizó con y sin extracción de la materia orgánica, siguiendo los protocolos establecidos por Sandoval *et al* (2012). De igual forma, muestras que presentaron altos contenidos de carbonatos (*i.e.* mayores a 1.5 mg por cada 2 g de suelo), la distribución de tamaño de partículas se realizó con y sin extracción de carbonatos, utilizando la metodología propuesta por los mismo autores. La extracción de carbonatos se efectuó mediante la aplicación de ácido acético 100% a las muestras de suelo, las cuales fueron agitadas hasta que dejaron de reaccionar, posteriormente fueron lavadas con agua hasta llegar a un pH cercano a 7. Finalmente, se midió el contenido de sales solubles, a través de la conductividad eléctrica donde valores mayores a 2 dS/m indicaban la necesidad de un lavado de sales en la determinación de textura basado en el protocolo establecido por Sandoval *et al* (2012), sin embargo ninguna de las muestras analizadas presentó valores cercanos o superiores a dicho valor, por tanto se descartó este procedimiento.

2.2.2.2 Determinación de niveles de materia orgánica

La materia orgánica del suelo se determinó por digestión ácida, utilizado para esto una solución de dicromato y ácido sulfúrico, la cual produce una reacción de oxidación en la muestra (1 a 2 g de muestra seca < 2 mm) que permite determinar, colorimétricamente, el cromato reducido (Sadzawka *et al*, 2006).

2.2.2.3 Determinación de niveles de carbonatos de calcio

Dado que el Ca puede ser considerado una agente de agregación de importancia, como también que puede causar distorsiones al momento de la determinación de la distribución del tamaño de las partículas, se consideró la determinación de los carbonatos presentes en las muestras de suelo de la zona norte y centro. Para este fin, se utilizó la metodología propuesta por Loeppert *et al.*, 1984 (Carter y Gregorich, 2007), que consiste en aplicar ácido acético (25 ml 0,4 M) a la muestra para neutralizar el contenido de carbonatos; el pH obtenido de dicha reacción permitió obtener el contenido de carbonatos presente en la

muestra, mediante la utilización de una curva estándar que relaciona el pH con la cantidad de carbonatos a través de la siguiente ecuación:

$$pH = k + n \log \left(\frac{CaCO_3}{(T - CaCO_3)} \right) \text{ (Ec. 2)}$$

Donde k y n son constantes, y T es la cantidad total de $CaCO_3$ que podría ser complementamente neutralizado con la cantidad de ácido acético utilizado.

2.2.3 Determinación de la erosión mediante métodos cuantitativos

2.2.3.1 Ecuación universal de pérdida de suelo (*USLE*)

La tasa de erosión actual se estimó mediante la ecuación general *USLE* (Ecuación 3) propuesta por Wischmeier y Smith (1978), que mide los siguientes factores:

$$A = R * L * S * K * C * P \text{ (Ec. 3)}$$

Donde:

- A , es la pérdida de suelo en $Mgha^{-1}año^{-1}$
- R , es la erosividad de la lluvia que fue calculada mediante la ecuación $R = 0.5 * P * 1.73(4)$ propuesta por Morgan (1994), donde P corresponde a la media anual de precipitaciones, la cual se obtuvo mediante interpolación de precipitaciones de la estación meteorológica más cercana, realizando geoprocesamientos en *ArcGis 9.3*.
- L y S , corresponde al factor topográfico compuesto por la longitud y ángulo de pendiente respectivamente, y su estimación será explicada más adelante.
- K , es la erodabilidad del suelo, el cual incluye las variables de estructura, permeabilidad, materia orgánica y textura del suelo, y que es explicada en detalle en la sección 2.2.2.4 de la metodología.
- C , es el factor de cubierta vegetal y manejo de recursos, el cual fue estimado mediante tabulaciones propuestas por Wischmeier y Smith (1978) (Anexo III).
- P , es el factor de prácticas de conservación de suelo, se consideró en tres situaciones: en el empleo de labranza siguiendo las curvas de nivel, en fajas de cultivos en contorno y en empleo de terrazas (Anexo IV), en aquellos casos que no existen práctica de conservación se ponderó con valor 1.

El factor topográfico fue calculado de dos maneras, en primera instancia se midió en terreno el ángulo de pendiente y la longitud de ésta. Como es de esperar la longitud de pendiente en muchas situaciones es difícil de determinar en una sola medición, por tanto se aplicó el método de pendiente irregular descrito por Mancilla (2008), que consistió en dividir en segmentos la ladera en cuestión, registrando los diferentes ángulos y trazos de pendiente, para luego ponderar dichos valores utilizando las siguientes ecuaciones:

$$LS = \left(\frac{\gamma}{22.1}\right)^{0.6} * \left(\frac{S}{9}\right)^{1.4} \text{ (Ec. 5)}$$

Donde γ es la longitud (en metros) de la ladera en pendiente y S es la inclinación de dicha pendiente en porcentaje. Las constantes 22.1 y 9 corresponden a las razones de ladera de longitud e inclinación de pendiente de la parcela estándar *USLE*. Posteriormente se calculó la fracción de pérdida de suelo (*FPS*) por segmento (Ecuación 6), la cual se ponderó con el *LS* obtenido por segmento, y se sumó cada producto obtenido, estimándose el *LS* total (Ecuación 7).

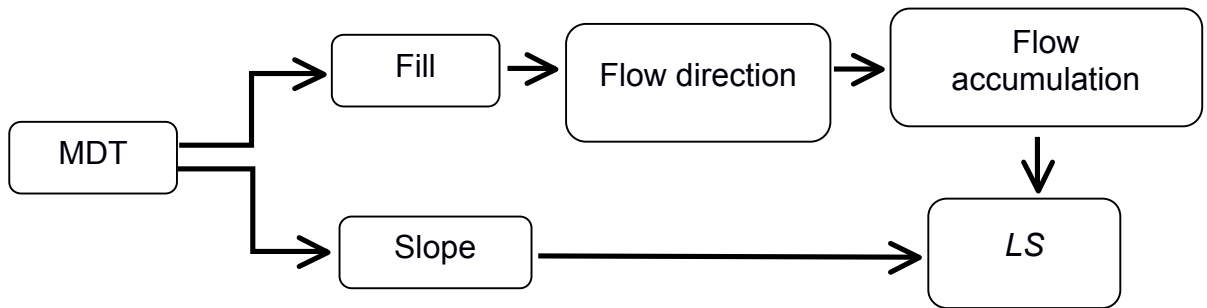
$$FPS = \frac{i^{m+1} - (i-1)^{m+1}}{N^{m+1}} \text{ (Ec. 6)}$$

Siendo i el número secuencial del segmento, m es el exponente de largo de pendiente, que en aquellos casos con pendientes mayor a 5% se utilizó un valor de m igual a 0.5, pendientes de 4% el valor de m fue de 0.4, y pendientes menores a 3% el valor fue de 0.3. N representa el número total de segmentos considerados.

$$LS_T = \sum LS_n * FPS_n \text{ (Ec. 7)}$$

2.2.3.2 Determinación de la erosión mediante *USLE* modificada según factor topográfico

La segunda forma en la que se estimó el factor topográfico, se basó en la metodología propuesta por Pelton *et al.* (2014) que consistió en realizar un geoprocesamiento en *ArcGis 9.3*, en el que se utilizó un Modelo de Elevación de Terreno (*MDT*), al cual se le realizó un *análisis de cuencas*, - que permite describir componentes físicos de una superficie -, obteniéndose el largo de pendiente en metros y el grado de pendiente en porcentaje. El proceso se describe en la figura 2:



MDT: modelo de elevación de terreno; Fill: función de relleno que garantiza la representación correcta de una cuenca (mantiene continua); Flow direction: genera la dirección del flujo de una cuenca en pendientes descendientes más pronunciadas; Flow accumulation: obtiene la acumulación de flujo de una cuenca en pendiente descendiente; Slope: calcula pendientes de terreno; LS: es el factor topográfico.

Figura 2: Esquema de obtención de factor *LS* en sistemas de información geográfica.

Para la obtención del factor *LS*, se utilizaron las capas de información *Acumulación de flujo* y *Pendiente* en la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\text{Flow accumulation} \cdot \text{Resolución de celda}}{22.1}\right)^m * \left(\frac{\text{Sin}(\text{slope} \cdot 0.01745)}{0.09}\right)^{(m+1)} * (m + 1) \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde *Resolución de celda*, es el tamaño de la celda, y *m* depende del grado de pendiente siendo 0.5 en pendientes mayores o igual a 5%, 0.4 en pendientes menores a iguales a 4% de pendiente, y 0.3 en pendientes menores o iguales a 3%.

2.2.4 Determinación de Índices de erodabilidad basados en la agregación estructural y estabilidad

- *Relación mecánica de Bouyoucos (KB)*

Este índice fue propuesto por Bouyoucos (1935) y considera la siguiente relación:

$$KB = \frac{\text{Arena} + \text{Limo}}{\text{Arcilla}} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

- % de Arena, corresponde a partículas de tamaños entre 0.05 mm a 2.0 mm.
- % de limo, corresponde a partículas de 0.002 mm a 0.005 mm
- % de Arcilla, corresponde a partículas menores a 0.002 mm.

Este método se basa en la determinación de los porcentajes de arena, limo y arcilla en estado disperso. Su determinación por ende considera el método tradicional de determinación de la distribución de tamaño de partículas por hidrometría. Éste consiste en dispersar el suelo utilizando un agente dispersante y a través de agitación mecánica, y con ello medir la densidad en diferentes tiempos de sedimentación a través de un hidrómetro calibrado a una temperatura de 20°C. Esto permite obtener el porcentaje de limo + arcilla y arcilla, mientras que las arenas se obtienen por diferencia.

- *Índice de separabilidad de partículas (ISP)*

Este índice fue propuesto por Florentino (1998) el cual lo expresa mediante la siguiente relación:

$$ISP = \frac{\%A}{\%L + \%af + \%amf} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

- *ISP*, corresponde al índice de susceptibilidad a la separación.
- % *A*, es el porcentaje de arcilla <2 µm.
- % *L*, es el porcentaje de limo entre 2-50 µm.
- % *af*, es el porcentaje de arena fina entre 100-250 µm.
- % *amf*, es el porcentaje de arena muy fina entre 50-100 µm

El índice se obtuvo mediante las curvas de distribución de tamaños de partículas, el cual se determinó a través del método de hidrómetro de *Bouyoucos* que relaciona los porcentajes de arcilla, limo y arenas. El porcentaje de arenas finas y muy finas, se determinaron a través de tamizaje. El Cuadro 2 presenta los rangos de susceptibilidad a la separabilidad de partículas según el índice de separabilidad *ISP*:

Cuadro 2: Susceptibilidad a la separación de acuerdo al índice de separabilidad de partículas.

<i>ISP</i>	Separabilidad de partículas
>2	Muy baja
1 – 2	Baja
0.5 – 1	Moderada
0.2 – 0.5	Alta
<0.2	Muy Alta

- *Índice de Sellado-Encostrado de los suelos (ISE)*

Este índice fue propuesto por Florentino (1998), el cual relaciona y de manera empírica el contenido de materia orgánica y la distribución del tamaño de partículas.

$$ISE = \frac{6.7433 * M.O}{0.5501 * (L + amf + af)} \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

- *ISE*, corresponde al índice de sellado-encostrado.
- % *M.O*, corresponde al porcentaje de materia orgánica.
- % *L*, corresponde al porcentaje de limo (2 – 50 µm).
- % *amf*, corresponde al porcentaje de arena muy fina (100 – 250 µm).
- % *af*, corresponde al porcentaje de arena fina (50 – 100 µm)

- *Estimación de coeficiente K mediante la formula empírica de la USLE*

Wischmeier y Smith (1978), desarrollaron una ecuación de regresión que determina el coeficiente de erodabilidad (*K*), a través de distintas propiedades del suelo como lo son la textura, porcentaje de materia orgánica, estructura y permeabilidad.

$$K = 2.8 * 10^{-7} * M^{1.14} (12 - a) + 4.3 * 10^{-3} (b - 2) + 3.3 * 10^{-3} (c - 3) \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

- *M* es el (% de limo + % de arena muy fina) * (100 – % de arcilla) con valores de limo más arena muy fina de 0.1-0.002 mm y de arcilla < 0.002.
- *a* es el porcentaje de materia orgánica, el cual fluctúa entre 0 y 4%, sin embargo en suelos forestales es posible encontrar montos de *MO* muchos mayores (Fuentes,

2014 comunicación personal), en aquellos casos se utiliza 4% como porcentaje *MO*, esta restricción tiene la finalidad de evitar subestimaciones de la erodabilidad en suelos ricos en *MO* (Panagos *et al.*, 2014). Además Ouyang (2002) menciona que una mayor acumulación de materia orgánica en el suelo se ve reflejado en el factor *C* de la *USLE*, mas que en el factor *K*, y que por tanto no recomienda una extrapolación del factor *K* con porcentajes de *MO* mayores a 4%. El porcentaje de materia orgánica se obtuvo mediante el método de Walkey-Black (Sadzawka, 2006).

- *b* es la estructura del suelo, clasificada en grano muy fino <1 mm; grano fino de 1-2 mm; grano medio de 2-5 mm o grueso 5-10 mm; laminar, maciza o cúbica, correspondiente a los códigos de la *USLE* 1, 2, 3 y 4 respectivamente.
- *c* corresponde a la permeabilidad del suelo⁴, clasificada en rápido a muy rápido entre 25-12.5 cm/h; moderadamente rápido entre 12.5-6.5 cm/h; moderado entre 6.5 a 2 cm/h; moderadamente lento entre 2-0.5 cm/h; lento entre 0,5-0,12 cm/h; muy lento < 0.12 cm/h, los cuales corresponden a los códigos *USLE* 1, 2, 3, 4, 5 y 6 respectivamente.

2.2.5 Análisis de la información

Se analizaron las tasas de erosión estimadas, *-USLE* y *USLE modificada-*, con la finalidad de determinar la relación que éstas presentan con la evaluación del *método de campo*, -visual -, propuesto por Stocking y Murnaghan (2000), mediante la realización de un test de correlación de rangos de Spearman, obteniéndose además los coeficientes de determinación a través de regresiones lineales. Asimismo se realizó un test de concordancia mediante el índice de Kappa de Cohen como un análisis complementario para dicha relación. El análisis de erosión por zona geográfica se efectuó mediante estadísticas descriptivas, considerando la obtención de cuartiles y gráficos de caja. Además se consideró el análisis de tasas de erosión en función de las geoformas registradas para cada sitio de muestreo. Dado que el factor *LS* juega un rol clave en las tasas de erosión, se procedió a evaluar el efecto de este factor en las tasas calculadas mediante *USLE* y *geoprocesamiento*. Con este propósito se generaron gráficas con la finalidad de observar la potencial linealidad de comportamiento de los factores.

Se evaluó la estimación de los índices de erodabilidad según las zonas geográficas establecidas en este estudio, mediante medidas de dispersión de datos. Esto con la finalidad de ver su variación entre las zonas analizadas.

⁴La permeabilidad del suelo se determinó mediante revisión bibliográfica obtenida de "Descripciones de suelos, materiales y símbolos", Estudios Agrológicos, realizados por CIREN, y financiado por INNOVA-Chile, Corfo, correspondiente a cada región muestreada, y en base a las características de textura y estructura del suelo.

Se procedió además a analizar cada índice de erodabilidad en función de la geoforma de manera de tratar de dilucidar el potencial efecto de la geoformología en la susceptibilidad del suelo a la erosión, así como también el efecto que tienen la materia orgánica y carbonatos de calcio presentes en el suelo en los índices de erodabilidad estimados, mediante el test de correlación de rangos de Spearman.

Se evaluó la relación existente entre los índices de erodabilidad estimados, utilizando como estandar al índice de erodabilidad K , mediante un análisis de correlación de rangos de Spearman, considerando el total de los suelos muestreados. Asimismo, se realizó un análisis por zona geográfica, obteniéndose para cada uno de ellos, coeficientes de determinación con la finalidad de predecir que índice se relaciona mejor con el índice K .

Por otro lado, se evaluó el efecto de la cobertura vegetal, a través de sus aportes en materia orgánica, con los índices de erodabilidad, mediante el test de comparación de variables de Kruskal-Wallis.

El análisis estadístico de la información se realizó con el programa estadístico R (R versión 3.1.2 (2014-10-31) – “Pumpkin Helmet” © 2014. The R foundation for statistical computing).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Grado de erosión

3.1.1 Análisis de tasas de erosión por zonas geográficas

Las tasas de erosión de las distintas zonas geográficas fueron analizadas mediante el modelo de *USLE*, ya que éste permite utilizar datos reales de longitud e inclinación de la pendiente, obtenidos en campo. Para agrupar los resultados obtenidos, se realizó un gráfico de caja presente en la Figura 3, por medio del cual se muestra la distribución que presentan las tasas de erosión estimadas mediante *USLE* en cada zona geográfica de estudio, desprendiéndose que:

- La zona norte posee mayor dispersión entre el 2^{do} y 3^{er} quintil, mientras que el 1^{er} quintil presenta mayor agrupación. Además, a partir del gráfico se desprende que el 50% de las tasas de erosión estimadas se encuentran alrededor de $24 \text{ Mgha}^{-1}\text{año}^{-1}$.
- La zona centro, presenta mayor dispersión en el 2^{do} y 3^{er} quintil en comparación al 1^{er} quintil. En esta zona el 50% de las tasas de erosión se acerca a $18 \text{ Mgha}^{-1}\text{año}^{-1}$.
- La zona centro – sur presenta mayor dispersión en el 1^{er} quintil, mientras que el 2^{do} y 3^{er} quintil hay mayor agrupación. En esta zona el 50% de las tasas de erosión se aproximan a $5 \text{ Mgha}^{-1}\text{año}^{-1}$. Es importante mencionar que esta zona posee menores tasas de erosión al compararla con la zona norte y centro, concordando ello con los estudios realizados por CIREN (2010c), donde se determina que la zona sur presenta menores índices de erosión a nivel país, aumentando hacia el norte, siendo la zona centro, la que presenta mayores tasas de erosión.

En base a lo anterior, se puede establecer el grado de erosión de las zonas en estudio según la clasificación propuesta por la FAO (1980), en ella la zona norte y zona centro tienen un grado de erosión moderada, mientras que la zona centro – sur tiene erosión ligera. Al comparar con estudios de erosión realizado por CIREN (2010c) en el territorio nacional, se tiene resultados similares en la zona norte, con grados de erosión moderada en la mayoría de su superficie, mientras que en la zona centro y centro – sur difieren los resultados, pues la mayoría de la superficie en ambas zonas es considerada por CIREN con grado de erosión grave y moderada, respectivamente. Esto se explica, debido a que CIREN (2010) determinó erosión en base a capas de información geográficas, que almacenan información espacial mediante pixels, lo cual tiene la desventaja de centrarse en propiedades del espacio, más que en la precisión de localización, indicando ello que a un mayor tamaño de pixels, menor

será la precisión de localización, y por ende, el detalle del espacio geográfico (Sastre, 2010). Lo anterior, genera subestimación en las tasas de pérdida de suelo (Van Remortel *et al.*, 2001; Panagos *et al.*, 2015).

Al comparar las tasas de erosión estimadas en esta investigación con estudios realizados en campo por UNESCO (2009), mediante parcelas de erosión, se determinó una pérdida de suelo promedio de $4.84 \text{ Mgha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en la zona norte. Se puede desprender que los valores determinados en esta investigación por la *USLE*, sobreestiman 4 veces los valores de erosión, siendo una condición que se reitera en otros estudios. En este sentido, Oyarzún (1993) determinó una sobreestimación de 22% en las predicciones de *USLE* frente a parcelas experimentales y de un 41% considerando lluvias mensuales, destacando que esta sobreestimación se acentúa a medida que aumenta la longitud y ángulo de la pendiente del terreno. Por su parte Olivares *et al.* (2015), indica que la *USLE* presenta consistencia en la tendencia de sus datos, a pesar de que subestima y sobreestima las tasas de erosión cuando no existen las situaciones idóneas en las que se originó.

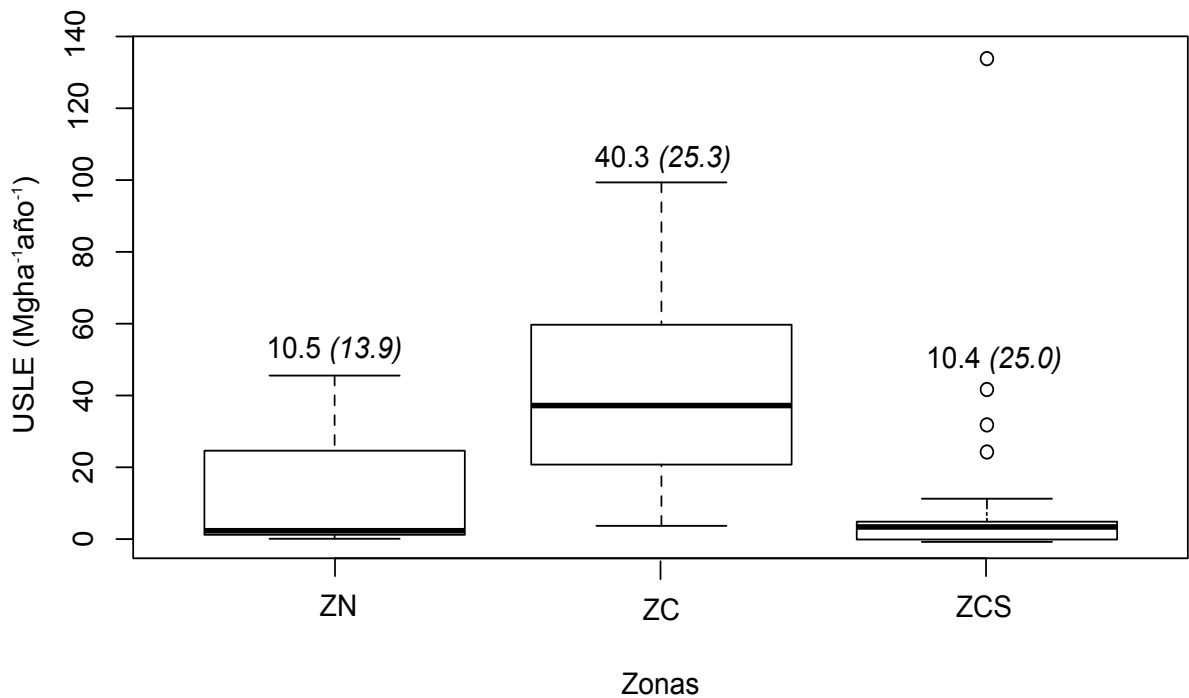


Figura 3: Variación de tasa de erosión USLE según zonas geográficas.

Los gráficos de cajas representan la distribución de las tasas de erosión según las zonas geográficas ZN: zona norte, ZC: zona centro, ZCS: zona centro – sur. El bigote superior representa el 25% de las tasas de erosión más altas, el bigote inferior indica el 25% de las tasas de erosión más bajas; las cajas representan el 50% medio de la tasas de erosión. Los círculos corresponden a tasas de erosión altas atípicas en la zona centro – sur. La línea ennegrecida indica la mediana. Valores indican medias y desviación estándar en paréntesis.

3.1.2 Análisis de erosión por geoforma

Las tasas de erosión según geoforma evaluados con la *USLE* en los suelos en posición piedmont (*PM*), llanuras aluviales (*LLA*) y quebradas (*QUE*), son representados en la Figura 4. Los suelos de las tres geoformas mencionadas, presentan una mayor dispersión entre el 2^{do} y 3^{er} quintil, teniendo cada uno de ellos, el 50% de sus tasas de pérdida de suelo cercanas a 60.5 Mgha⁻¹año⁻¹, 28 Mgha⁻¹año⁻¹ y 12.5 Mgha⁻¹año⁻¹ respectivamente.

Por otra parte, al analizar la tendencia de las gráficas, se observa que las posiciones geomorfológicas con mayor variación en las tasas de erosión son aquellas relacionadas con el grado de inclinación de pendiente y con el porcentaje de cobertura vegetal. Dengiz *et al.* (2007) mencionan que la pendiente es uno de los factores abióticos más importantes en el control de los procesos erosivos, ya que a mayor pronunciación de la pendiente, mayor es la escorrentía superficial y subsuperficial, mayor es la traslocación de materiales de la pendiente hacia abajo por causa de erosión y hay un mayor movimiento de masas, dificultando con ello, el desarrollo de suelo. Por otra parte, Gerrard (1981) menciona que en pendiente, el movimiento y distribución del agua son una de las principales razones que diferencian las características del suelo, mientras que Huggett (2007) establece que la gravedad es el factor que permite el movimiento, transporte y distribución de agua y de masas, determinando así, las propiedades del suelo, y con ello, el nivel de impacto que tienen los procesos erosivos en él. Junto a lo anterior, un estudio realizado por Brubaker *et al.* (1993), reporta que las propiedades físicas y químicas del suelo presentan diferencias de acuerdo a la posición geomorfológica en la que se encuentren, incidiendo por ello, en las tasas de erosión del suelo. Lo anterior, explicaría que las mayores tasas de erosión se encuentren en piedmont, llanuras aluviales y quebradas, que son justamente aquellas geoformas con mayor grado de inclinación de pendiente en este estudio.

Luzio *et al.* (2009) y Casanova *et. al.* (2013) describen los suelos de Chile y mencionan que en la zona norte los suelos ubicados en llanuras aluviales han sido fuertemente erosionados y disectados por fenómenos aluviales. Caso similar ocurre en suelos posicionados en lomajes (*LOM*), valles (*VI*) y piedmont (*PM*), que por su limitado desarrollo se encuentran expuestos a procesos de erosión moderada y en algunos casos severa. Junto a ello, el estudio revela que en los sectores precordilleranos de la zona centro, los suelos en piedmont, cerros y planos aluvio-columviales, tienen un desarrollo pedogénico más evolucionado, mientras que en los valles, en posición de cerros, existen procesos de erosión moderada que son más o menos intensos y frecuentes producto del uso agrícola. Por último, el estudio revela que en la zona centro – sur, en la Cordillera de la Costa, los suelos ubicados en cerros, presentan diversos grados de meteorización, y en muchos casos se evidencian intensos procesos de erosión.

Lo expuesto con anterioridad, permite explicar la variación en las tasas de erosión estimadas en aquellas unidades geomorfológicas que tienen un alto grado de inclinación de pendiente, puesto que las diferencias en las condiciones ambientales de las zonas de estudio, permiten que exista un mayor desarrollo pedogenético del suelo y un mayor porcentaje de cobertura vegetal en la zona centro y centro – sur, lo que reduce el impacto de procesos erosivos por causa de escorrentía y viento, a diferencia de la zona norte que por el escaso desarrollo del suelo y de vegetación, el impacto de estos procesos es mayor.

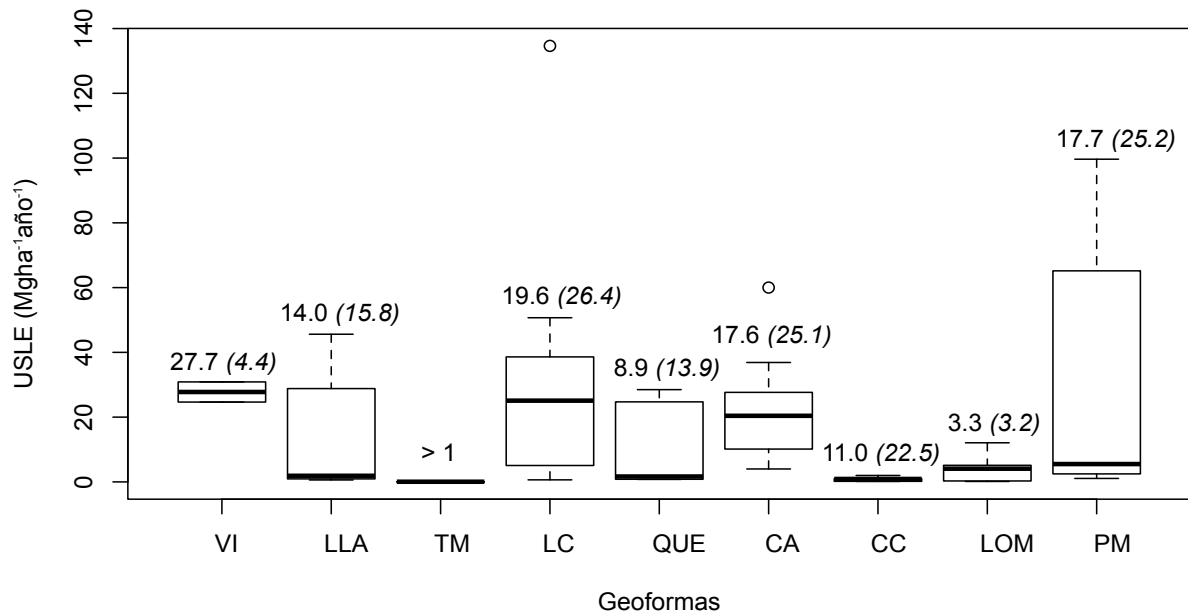


Figura 4: Variación de tasas de erosión *USLE* y *USLE modificada* según geomorfas. CA: cono aluvial; CC: cima de cerro; LC: ladera de cerro; LLA: llanura aluvial; LOM: lomaje; PM: piedmont; QUE: quebrada; TM: terraza marina; VI: valle intermontano. Valores indican medias y desviación estándar en paréntesis.

3.1.3 Análisis de factor topográfico *LS*

En esta sección se realizará una comparación del factor topográfico *LS*, medido por medio de datos obtenidos en campo y por medio de estimaciones derivadas del Modelo de elevación de Terreno (*MDT*), con la finalidad de establecer su efecto en la medición de la *USLE*. La correlación del factor topográfico *LS*, medido mediante datos recopilados en campo con las tasas de erosión *USLE* fue positiva y altamente significativa ($R= 0.85$, $p \ll 0.0001$) permitiendo explicar un 65% de los valores de erosión determinados (Figura 5). Para el caso del factor *LS* determinado mediante *MDT*, se obtuvo también una correlación positiva y altamente significativa ($R= 0.53$, $p \ll 0.0001$), aunque *LS* en este caso sólo permite explicar un 35% de los valores de erosión determinados.

Junto a lo anterior, se evaluaron otros factores (R , K , C , y P), con el fin de determinar su grado de correlación con la USLE, y con ambos métodos de aproximación en el cálculo de LS . En ambos escenarios, el factor LS presentó mejor correlación y explicación de la ecuación (Apéndice III), coincidiendo ello con trabajos de McCool *et al.* (1987) y Hoffman *et al.* (2013), quienes determinaron que el factor topográfico LS , es uno de los parámetros más sensibles en la estimación de pérdida de suelo, y que un error de 10% en el cálculo de la pendiente, genera un error de 20% en los resultados de tasas de erosión.

Al realizar un análisis del mecanismo de cálculo del factor LS , se tiene que con el *método de pendientes irregulares*, se incorpora la influencia del perfil topográfico, -que puede ser cóncavo o convexo-, disminuyendo la sobreestimación de resultados (Mitasova *et al.*, 1995; Desmet y Govers, 1996; Mancilla, 2008). Sin embargo, este método presenta la desventaja de no examinar los fenómenos hidrológicos en su contexto geográfico, sino que más bien, realiza una representación simplificada de los elementos espaciales presentes en una cuenca hidrográfica, asumiendo la uniformidad de ésta (Mitasova *et al.* 1995; Hoffman *et al.* 2013), y siendo por ello útil de aplicar en áreas más homogéneas, al no considerar sedimentación ni la depositación (Mitasova *et al.* 1995; Van Remortel *et al.*, 2001). A nivel local, utilizar *USLE* con recopilación de información en campo, proporciona al investigador un nivel de detalle del sector, que le permite considerar aspectos topográficos que con el *MDT* no se pueden apreciar, y los cuales pueden ser utilizados para calibrar la información recopilada en terreno y así reducir los errores de estimación en los resultados de pérdida de suelo (Hoffman *et al.*, 2013; Pelton *et al.*, 2014).

El calcular el factor topográfico LS mediante un *MDT*, resulta ser rápido, de fácil aplicación y de bajo costo, siendo por ello útil para ser utilizado en grandes extensiones de territorio (Panagos *et al.*, 2015). Además, un *MDT* permite estimar pérdidas de suelo, considerando los flujos divergentes y convergentes de las cuencas hidrográficas, así como también, las propiedades de sedimentación y depositación (Pelton *et al.*, 2014). Pese a ello, un *MDT* presenta limitaciones que al no ser resueltas de manera adecuada, generan errores en los cálculos de inclinación y longitud de pendiente (Panagos *et al.*, 2015; Hoffman *et al.*, 2013; Van Remortel *et al.*, 2001), como es el caso de la resolución espacial (tamaño de celda o pixel) del *MDT* que se utiliza, pues un aumento en la resolución provoca una disminución en el ángulo de pendiente (Panagos *et al.*, 2015), así como también, el caso de un *MDT* con muchas depresiones, ya que estas irrumpen en el flujo de agua, afectando la longitud de pendiente, al reconocer al pixel como un área de depósito, reestableciendo la longitud de pendiente a valor cero, distorsionando con ello, la realidad topográfica (Hickey, R., 2000).

Lo expuesto anteriormente, concuerda con estudios realizados por Van Remortel *et al.* (2001), quien concluye que la alta calidad de un *MDT* es fundamental para la obtención de un LS fiable, ya que errores en él pueden causar longitudes de pendientes erráticas y discontinúas, que pueden derivar en una sobreestimación de las longitudes de pendiente.

Por lo tanto una mejor resolución espacial permite capturar los cambios geomorfológicos con mayor precisión, y de esta forma contribuye a una mejor estimación en la pérdida de suelo y a la obtención de parámetros topográficos confiables, mediante la utilización de modelos de erosión adecuados que representen estos parámetros espaciales (Mitasova *et al.* 1995).

En base a lo expuesto, la elección de que método utilizar para la determinación de *LS* dependerá de la escala y objetivo del trabajo que se quiere abordar.

Por su parte, Panagos *et al.* (2015), señala que, además de la importancia del factor topográfico (*LS*) en la *USLE*, el factor cobertura del suelo (*C*), también es un determinante en la estimación de erosión con este modelo, concordando ello con los resultados obtenidos en este estudio. En este aspecto, las tasas de erosión calculadas mediante la *USLE* fueron 20% menor en situaciones de cobertura vegetal que sin cobertura (Apéndice X).

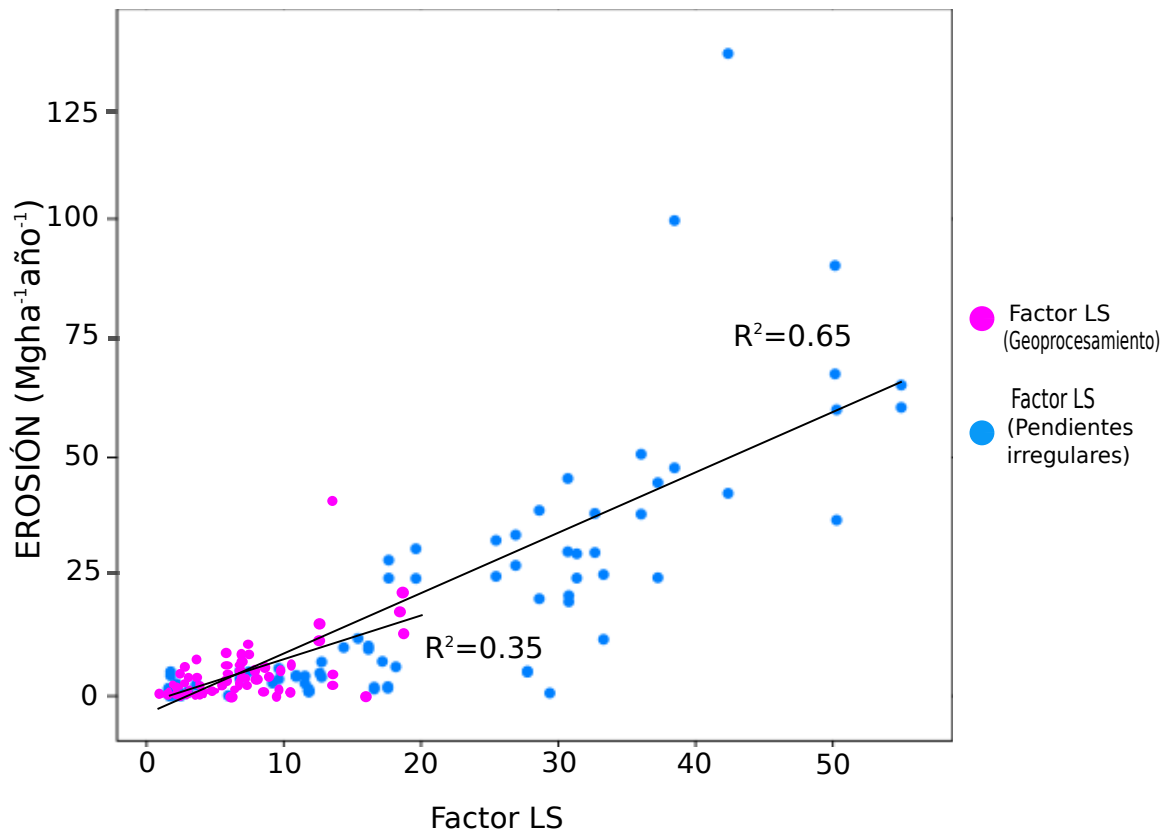


Figura 5: Efecto del factor topográfico *LS*, determinado en campo y por geoprocesamiento en los valores de tasas de erosión mediante *USLE*.

3.1.4 Análisis de Tasas de Erosión según aproximación metodológica

Se analizaron las tasas de erosión estimadas, - *USLE* – *USLE modificada*-, con la finalidad de determinar la correlación que éstas presentan con la evaluación del *método de campo*, -visual-, propuesto por Stocking y Murnaghan (2000), obteniendo que el test de correlación de rangos de Spearman fue bajo y significativo en ambos casos, siendo de 0.23 para el caso de *USLE* ($p = 0.03$) y de 0.21 para el caso de *USLE modificada* ($p = 0.048$). Al analizar cuanto explican ambas tasas de erosión al método de campo, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.01 para ambos modelos, siendo ninguna de ellas significativa ($p = 0.35$ y $p = 0.48$, respectivamente). Del mismo modo se realizó un índice de concordancia Kappa de Cohen, el cual evidenció que existe una fuerza de concordancia débil para ambos casos (Apéndice IV), lo que coincide con los resultados obtenidos en las correlaciones.

Lo anterior, Stocking y Murnaghan (2000) lo explican por medio del rol del evaluador en el estudio de la degradación del paisaje, pues el resultado dependerá del objetivo y de las directrices que tiene su investigación, además de las técnicas de seguimiento científico que se utilicen, pues muchas veces se basan en el proceso mismo de erosión, y por tanto sus mediciones reflejan la intervención que se realizó, y no necesariamente el proceso de erosión en un ajuste de campo que sea real. Otro punto que consideran los autores, es que tanto las tasas de erosión *USLE* y *USLE modificada*, se basan en información recopilada de características propias de los lugares de estudio, que si bien se ajustan a diferentes tabulaciones, -que corresponden a una ponderación de su efecto en la erosión-, estas siguen siendo más cercanas a la realidad, que las derivadas del análisis de erosión en base a la *pauta de campo*, pues ésta resulta ser ambigua o subjetiva al tener el investigador la tarea de estimar la tasa de erosión general, en base a la selección de una situación representativa, que no siempre cumple con todas las características y condiciones del lugar.

Con lo expuesto, es posible concluir que la baja correlación existente entre *USLE* y *USLE modificada*, con el *método de campo*, deriva en tres problemáticas, asociadas a la precisión - escala, extrapolación y fiabilidad de la información recopilada (Stocking y Murnaghan, 2000).

3.2 Índices de erodabilidad

La erodabilidad fue medida en base a los índices de relación mecánica de Bouyoucos (*KB*), de separabilidad de partículas (*ISP*), de sellado – encostrado (*ISE*) y del índice erodabilidad *K*, de las diferentes zonas de estudio.

El Cuadro 3 muestra el promedio de los datos y su desviación estándar según las diferentes zonas geográficas analizadas:

Cuadro 3: Promedios y desviación estándar de índices de erodabilidad según zonas geográficas analizadas.

ÍNDICES	ZONAS		
	ZN	ZC	ZCS
<i>KB</i>	9.84 ± 4.29	12.75 ± 8.11	5.96 ± 4.89
<i>ISP</i>	0.19 ± 0.10	0.19 ± 0.09	0.55 ± 0.33
<i>ISE</i>	0.94 ± 1.46	2.96 ± 2.52	4.22 ± 4.82
<i>K</i>	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01

KB: Relación mecánica de Bouyoucos; *ISP*: índice de separabilidad de partículas; *ISE*: índice de sellado – encostrado; *K*: índice de erodabilidad según *USLE*; *ZN*: zona norte; *ZC*: zona centro; *ZCS*: zona centro – sur.

Del cuadro anterior se extrae que el índice de erodabilidad *K*, tiene en todas las zonas estudiadas el mismo promedio y desviación estándar, lo que se puede explicar por dos razones:

- En primera instancia el porcentaje de materia orgánica es muy variado entre zonas geográficas, siendo muy bajos en la zona norte a muy altos en la zona centro – sur. No obstante esto último, el índice *K* no considera una amplia variabilidad en esta propiedad (el valor máximo de *MO* está fijado en un 4%) y por ende, el efecto de la materia orgánica se minimiza.
- Tanto la estructura como la permeabilidad (factores que incorpora este índice), no presentaron diferencias cuantiosas en terreno, siendo por tanto su categorización similar entre zonas de estudio.

Por otro lado el índice *KB* tuvo mayor variación en sus estimaciones, siendo la zona centro la que presentó mayor dispersión en los datos obtenidos, lo cual es sólo atribuible a la diversidad de texturas presentes. Es importante recordar que este índice no diferencia la separación de las partículas de arena en su estimación, lo que generaliza aun más los resultados. El *ISP* por su parte, no presentó grandes variaciones entre las zonas de estudio, sin embargo determinó que la zona centro – sur presenta suelos mas estables (*ISP* > 0.5).

Finalmente, el *ISE* muestra una variación consistente entre las zonas estudiadas, indicando que los suelos de la zona norte son más inestables en comparación a las otras dos zonas, siendo la zona centro – sur, la que presenta suelos más estables ($ISE > 0.5$).

Considerando las diferencias obtenidas en la medición de los diferentes índices, y a fin de proponer un índice de erodabilidad de fácil medición, -distinto del índice *K*-, a continuación se procede a realizar un análisis comparativo entre el índice *K* y los otros tres índices de estudio, que permita establecer cuál de ellos tendrá un mejor comportamiento como predictor de erodabilidad del suelo.

3.2.1 Relación entre índices de erodabilidad

- Índice de erodabilidad *K* y relación mecánica de Bouyoucos, *KB*

El objetivo del análisis acerca de la relación existente entre los índices de erodabilidad *K* y de *relación mecánica de Bouyoucos* (Figura 6), tiene por finalidad, el poder implementar a este último, como una alternativa sencilla y de fácil medición para determinar la susceptibilidad del suelo, frente a la disgregación de sus partículas por causa de agentes erosivos.

Los resultados derivados del análisis, reflejan una baja correlación entre ambos factores siendo ésta no significativa ($p= 0.56$) y, con un coeficiente de determinación de 0.01 tampoco significativo ($p =0.37$), reflejando con ello una nula relación entre ambos índices, a pesar de que indirectamente los dos miden agregación. Esto se puede explicar debido a que la *relación mecánica de Bouyoucos* solo mide el comportamiento de las texturas en función del porcentaje de arcillas, y no involucra ningún otro tipo de componente que afecte a las propiedades del suelo, y con ello, su susceptibilidad a la erosión; mientras que el factor *K* de la *USLE*, incorpora, además de la textura, otros componentes, tales como materia orgánica, estructura y permeabilidad del suelo. Autores como Mitchell y Bubenzer (1980) y Goldman (1986), establecen que la textura es la propiedad del suelo más influyente en la erodabilidad, y por tanto, el índice de *Bouyoucos* sería un buen predictor de este factor. Sin embargo Díaz-Fierro *et al.* (1998), plantean que en la ecuación del índice de erodabilidad *K*, tanto la textura como la materia orgánica son componentes importantes, al representar el 80% de ésta; mientras que el resto de los componentes que la conforman, sólo son un refinamiento de la fórmula, y por tanto, no siempre se utilizan.

A partir de lo anterior, es posible inferir que la gran diferencia y la baja relación entre los índices de *erodabilidad K* y *la relación mecánica de Bouyoucos*, se justifica por la presencia y ausencia de la materia orgánica y, su interacción con la textura, ya que esta

última actúa como un agente cementante entre las partículas del suelo, proporcionando una mejor y mayor agregación, estabilidad estructural y resistencia a la erosión, así como también, mejora la infiltración, la retención de agua y con ello la reducción de la escorrentía superficial (Lal, 1988; Suárez, 1998; Ramírez *et al.*, 2009). De esta manera, la dinámica establecida entre materia orgánica y textura en el factor K , permite precedir la erodabilidad del suelo, ya que indirectamente analiza su estabilidad estructural y permeabilidad, siendo ambos componentes dependientes de las condiciones ambientales, pues en zonas húmedas la materia orgánica es fundamental, ya que regula la susceptibilidad a la erosión por causa de la lluvia; mientras que en sectores áridos y semiáridos, -con menor presencia de materia orgánica-, la textura tiene mayor protagonismo, al ser el patrón de estabilización y permeabilidad del suelo, pues suelos arcillosos son más resistentes a la disgregación de partículas, y los suelos arenosos a pesar de ser más propensos a la separación de sus partículas, tienen mejor permeabilidad, disminuyendo la escorrentía superficial (en eventos de lluvia), propiciando una menor pérdida de suelo (Díaz-Fierro *et al.*, 1998).

- *Índice de erodabilidad K e índice de separabilidad de partículas, ISP*

Se evaluó la relación entre los índice de erodabilidad K e índice de separabilidad de partículas (ISP), dando como resultado una correlación moderada, negativa y significativa ($p \ll 0.0001$), y un coeficiente de determinación 0.16 significativo ($p \ll 0.0001$), lo cual se aprecia en la Figura 6. Lo anterior se puede explicar porque ambos índices miden, además de la distribución del tamaño de partículas y del porcentaje de arena, limo y arcilla, el porcentaje de arenas muy finas, - que junto con las de arenas y limo -, son más susceptibles al deterioro físico, debido a la baja cohesión y alta separabilidad de sus componentes (Pérez, 1984; Pla, 1995, Bravo y Florentino, 1997 citados por Lozano *et al.*, 2002).

Por su parte, la correlación negativa entre ambos índices, se puede explicar porque con el ISP , los valores mayores a 0.5 corresponden a suelos más estables, mientras que los menores a 0.5 son inestables, siendo por ello, más susceptibles a la separación de partículas del suelo (Pulido *et al.*, 2009). Mientras que, con el índice de erodabilidad K , entre mayor sea el valor del índice, mayor será la erodabilidad del suelo (*i.g.* suelos con alto contenido de arcillas, presentan índices K de 0.05 a 0.15 lo que es bajo, debido a la resistencia que presentan éstas a la disgregación de sus partículas) (Suárez, 1998).

Con lo expuesto, es posible decir que la falta de linealidad entre K y el ISP , se debe a la ausencia de MO (propiedad medida por el K) en el cálculo del ISP , pues éste se encuentra condicionado sólo por el contenido de arenas, arenas muy finas y limo (Hernandez *et al.*, 2013), sin considerar a los otros componentes que afectan a la separación de partículas del suelo, ya que tal y como es definido por Lobo y Pulido (2009), este índice “refleja la tendencia de un suelo predominantemente mineral, -con muy bajo contenido de materia

orgánica-, a la separación de sus partículas (...)”. De esta forma, al no evaluar el contenido de materia orgánica, los resultados del *ISP* se ven afectados, tal y como lo muestran los estudios realizados por Reyes (2014), en los que se determinó que altos contenidos de materia orgánica, afectan a los resultados obtenidos por este índice, y por tanto el *ISP* se constituye como un mal predictor en suelos con medios y altos porcentajes de materia orgánica, explicando ello, que solo represente en un 1% al índice *K*.

- Índice de erodabilidad K e índice de sellado-encostrado

El índice de sellado-encostrado fue el que obtuvo una mejor correlación con el *K* ($r = 0.56$), siendo altamente significativa y negativa ($p < 0.0001$), permitiendo explicar un 23% de los valores de *K* (Figura 6). Lo anterior se explica porque ambos índices incorporan la textura del suelo y el porcentaje de materia orgánica, siendo éstos los componentes más influyentes en la determinación de la erodabilidad del suelo (Díaz-Fierro *et al.*, 1998). La relevancia de estas propiedades, en los índices de estudios, se debe a su interacción en el suelo, pues la *MO* enlaza química y físicamente las partículas minerales de éste (Lado *et al.*, 2004) manteniéndolas unidas frente a fuerzas desestabilizadoras, aumentando por tanto, su estabilidad (Fortun y Fortun, 1989; Hermawan y Bomke, 1997; Haynes *et al.*, 1997).

Por último, la correlación negativa, se debe a que suelos con un *ISE* superior a 0.5 son más estables, mientras que los suelos con un valor inferior, son más inestables. Por su parte, en el índice *K*, los valores superiores representan mayor susceptibilidad a la disgregación de partículas. Por otro lado, Reyes (2014), plantea en un estudio que el índice *ISE*, es un buen predictor, ya que sus resultados son similares a lo visto en campo; no obstante a ello, Páez y Plá (1992) evalúan la eficiencia de los índices de erodabilidad de suelo, por medio de una comparación con el índice *K*, concluyendo que es recomendable utilizar índices que consideren el impacto de la gota de lluvia en el suelo, de manera de no subestimar los resultados, como sucede al evaluar con otros índices.

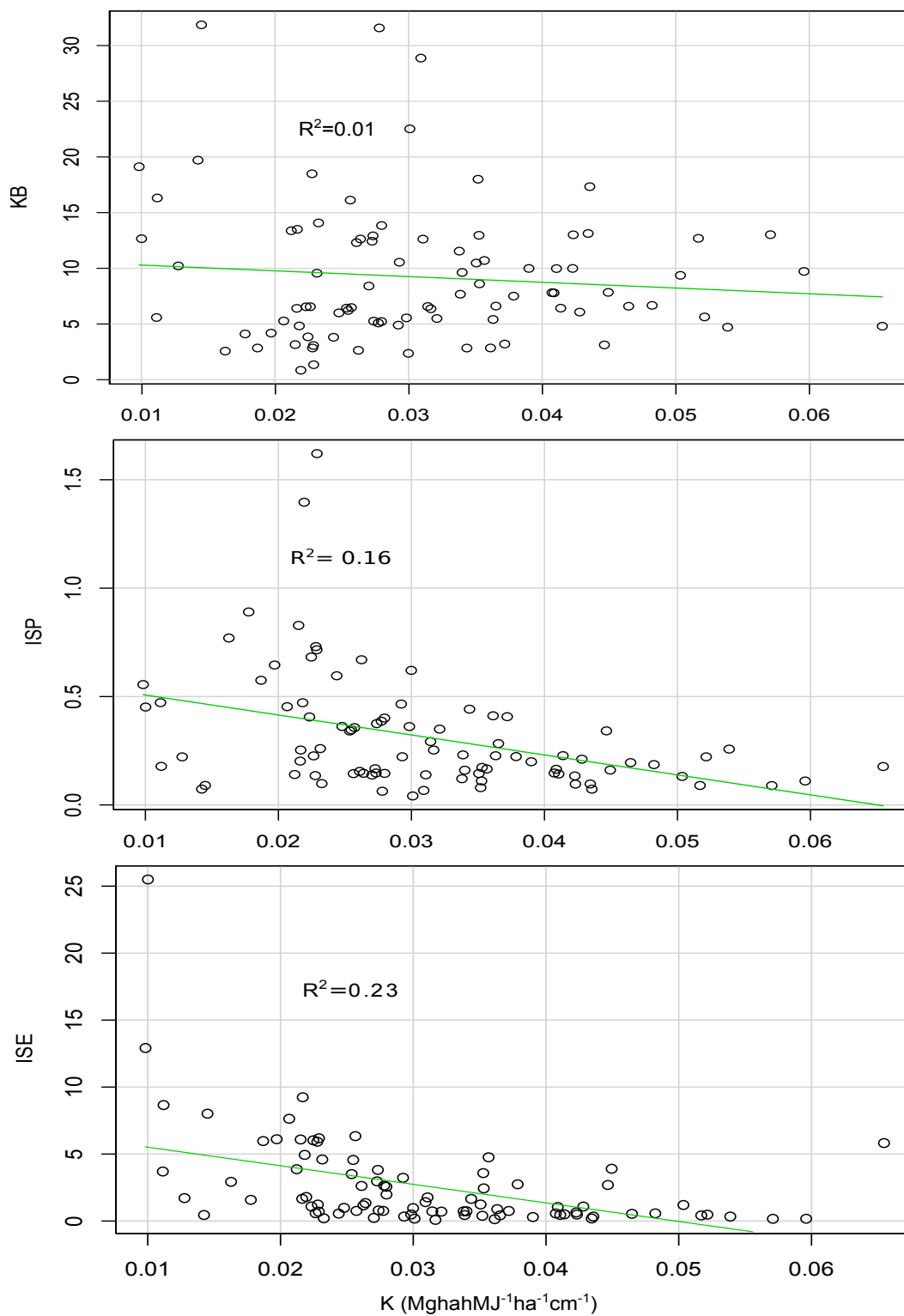


Figura 6: Relación del índice de erodabilidad K con índices de erodabilidad KB , ISP e ISE . KB : Relación mecánica de Bouyoucos; ISP : índice de separabilidad de partículas; ISE : índice de sellado – encostrado.

3.2.2 Análisis de índices de erodabilidad por zona geográfica

Se analizó la relación de cada índice de erodabilidad con las tres zonas de estudio. Esto con la finalidad de poder establecer si existen diferencias en las estimaciones de los índices, debido a la cantidad de *MO* y a la granulometría que contengan los suelos de las diferentes zonas objetivos.

Al evaluar la relación del índice de erodabilidad *K*, con los índices de *Bouyoucos*, *ISP* e *ISE*, en cada zona geográfica estudiada, se encontró que el *ISE* tuvo correlaciones significativas en todas las zonas, mientras que los índices *KB* e *ISP*, sólo tuvieron correlaciones significativas en las zonas centro y centro – sur, respectivamente (Apéndice V). En el caso de *ISE* (Figura 7), la zona centro mostró el mejor ajuste ($R^2 = 0.37$), seguido de la zona norte ($R^2 = 0.24$) y por último, la zona centro – sur ($R^2 = 0.11$). Se hubiese esperado una mejor correlación en los suelos de la zona centro – sur, debido a la mayor cantidad de materia orgánica ($MO > 4\%$) presente en éstos (Figura 7). No obstante esto último, el *K* no lo refleja, pues los valores de *MO* están restringido a un 4%, mientras que el *ISE*, considera los valores de *MO* sin limitaciones. Esto indicaría que los índices se relacionan mejor en la zona norte, sin embargo no ocurre.

Lo anterior, se explica debido a que hay otros factores y/o propiedades considerados en el índice *K* y que no están expresados en el *ISE*, que estarían definiendo en mayor grado la erodabilidad del suelo. Dentro de estas propiedades, el porcentaje de arcilla presente en los suelos está definiendo la relación entre ambos índices, pues los suelos de la zona centro – sur, contienen el porcentaje más alto de arcilla, mientras que los suelos de la zona centro, contienen los porcentajes de arcillas más bajos de las tres zonas estudiadas, y por tanto la relación entre los índices es mejor.

La buena relación entre los índices *K* y la *relación mecánica de Bouyoucos*, en la zona centro (Apéndice XV), se explica por el bajo contenido de arcilla que poseen los suelos de esta zona (Apéndice XIII), con lo cual se obtienen valores altos de erodabilidad. Por otro lado, las zonas norte y centro – sur, tienen porcentajes mayores de arcilla, estimando erodabilidades menores a las del índice *K*, debido a que *Bouyoucos* establece que suelos con altos porcentajes de arcillas son menos erodables, lo que genera sobreestimaciones de erodabilidad con respecto al índice *K*. Lo anterior, concuerda con trabajos realizados por Anache *et al.* (2015), en los que expone que la *relación mecánica de Bouyoucos* sobreestima la erodabilidad en relación al índice *K*. Junto a ello, Bryan (1968), menciona que el índice de *Bouyoucos* establece demasiada importancia a la arcilla como factor determinante en la erodabilidad, aún cuando existen otros agentes más influyentes en la estabilidad del suelo, como lo es la materia orgánica, por lo que la arcilla por si sola, sería susceptible a la separación de partículas por medio de procesos de erosión hídrica (Babel *et al.*, 2012). Por último, Lozano *et al.* (2002), agrega que el contenido de arcilla aumenta en

profundidad, existiendo por tanto un menor porcentaje de ésta en superficie, lo que indicaría que es un buen predictor de erodabilidad, ya que la susceptibilidad a la separación de partículas del suelo, se evalúa en el epipedón, pues éste está expuesto a cualquier tipo de agente erosivo que produzca degradación física.

Los índices de erodabilidad K e ISP (Apéndice XV), miden las partículas finas del suelo, por consiguiente establecer la variación de estas propiedades edáficas, permite explicar el comportamiento de los índices según las zonas estudiadas.

De acuerdo a lo anterior, la centro – sur, resultó tener los suelos más estables en comparación a las otras dos zonas. Esto debido al bajo contenido de arenas finas y muy finas, y al mayor contenido de arcillas presentes en los suelos de la zona.

Por su parte, las zonas norte y centro, presentan suelos muy erodables, debido al alto contenido de arenas finas y muy finas (Apéndice XVI). Esto indica que el ISP , sobreestima los valores de erodabilidad con respecto al índice K , lo que explica la nula relación en ambas zonas.

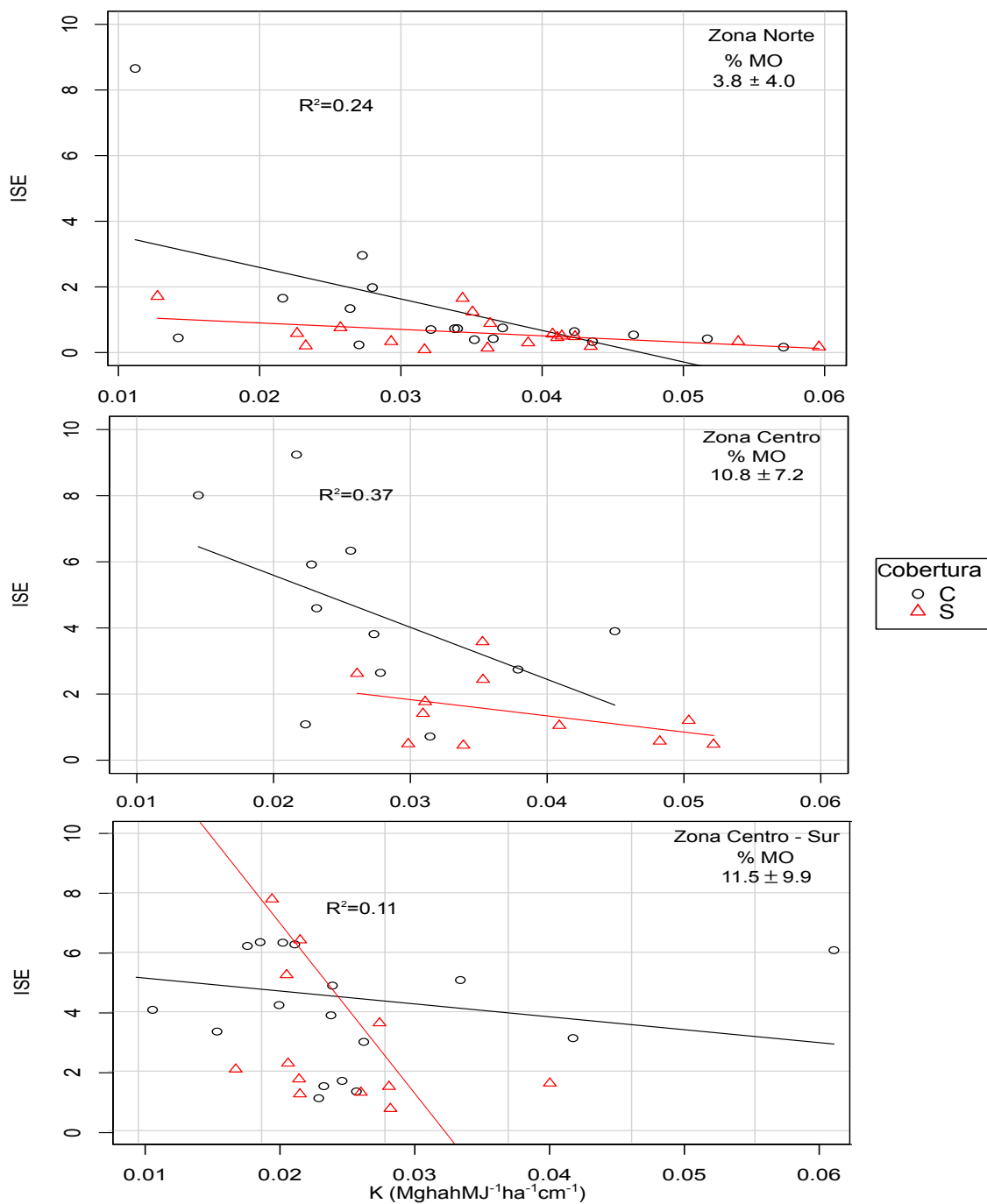


Figura 7: Relación entre el índices de erodabilidad K con ISE según zona geográfica. ISE : índice de sellado-encostrado; K : índice de erodabilidad de la $USLE$. Valores de MO corresponden a las medias y desviación estándar obtenidas, considerando los sitios con y sin cobertura. Símbolo C, indica muestras bajo cobertura vegetal; símbolo S, indica muestras sin cobertura vegetal.

3.2.3 Análisis de índices de erodabilidad por unidades geomorfológicas

La Figura 8 muestra el comportamiento de los índices de erodabilidad K , *Relación mecánica de Bouyoucos*, *ISP* e *ISE*, según las nueve unidades geomorfológicas definidas en este estudio. Lo anterior, puede ser explicado por medio de las propiedades intrínsecas del suelo que cada índice evalúa.

De la Figura 8, se destaca que tanto las quebradas (*QUE*) como las laderas de cerro (*LC*) presentan los más altos índices de erodabilidad K , mientras que las cimas de cerros (*CC*) y las terrazas marinas (*TM*), evidencian índices de erodabilidad más bajos. Estas últimas, contienen un menor contenido de limo y un mayor contenido de *MO* en los suelos, en comparación a las unidades geomorfológicas con altos índices de erodabilidad, explicando ello, los resultados obtenidos; pues tal y como lo mencionan Morgan y Davidson (1986), los suelos con mayor contenido de limo, son más erodables, mientras que suelos con alto contenido de *MO*, mantienen la estabilidad de los agregados del suelo, siendo éstos menos erodables (Stadmüller, 1994; Hincapié y Rivera, 2003).

Las propiedades edáficas de las geoformas en estudio, están influenciadas por las características topográficas y la cobertura vegetal presentes en ellas. En este sentido, Phillips (1990) y Huggett (2007) plantean que la inclinación de la pendiente y la cobertura vegetal, inciden en la susceptibilidad del suelo a la disgregación de sus partículas frente a la acción hídrica. Asimismo, Stadmüller (1994) indica que suelos desprovistos de vegetación son más susceptibles al lavado de partículas, lo que disminuye su infiltración y permeabilidad. Esto explicaría el comportamiento de las propiedades intrínsecas de los suelos de las distintas geoformas en estudio, puesto que, a pesar de que todas tengan alto contenido de arenas, sus diferencias radican en el contenido de limo y *MO*, pues las situaciones con altos contenidos de limo, serían causadas por el transporte de las partículas del suelo generados por la inclinación de la pendiente; mientras que bajos contenidos de *MO*, se debería a la poca cobertura vegetal presentes en *QUE* y *LC*, siendo por tanto suelos más erodables en comparación a *TM* y *CC*.

La *relación mecánica de Bouyoucos* tiene una tendencia diferente al índice K , puesto que sus valores más altos se concentran en conos aluviales (*CA*) y terrazas marinas (*TM*), mientras que sus índices más bajos de erodabilidad, se encuentran en lomajes (*LM*) y laderas de cerro (*LC*). Lo anterior, se explica fundamentalmente por la naturaleza de la granulometría del suelo, pues en los análisis de texturas realizados en este estudio, tanto los suelos en posición de *CA* como de *TM*, tienen mayor cantidad de arenas, y muy baja cantidad de arcillas, lo que indicaría sus altos índices de erodabilidad. Caso contrario ocurre en los *LM* y *LC*, los cuales contienen baja cantidad de arcilla. Por tanto, la diferencia es la resultante de que este índice no incorpora otros factores influyentes en la erodabilidad del suelo, como lo es el contenido de *MO*.

Autores como Gachene (1982) y Suárez (1998), concluyeron en sus estudios que la *relación mecánica de Bouyoucos*, presenta mejores resultados cuando existen proporciones similares de arena, limo y arcilla, y que distorsiona sus resultados cuando hay menores contenidos de arcilla, puesto que no considera que las arenas, a pesar de ser más susceptibles a separarse frente a la acción del agua, son más permeables, y por lo tanto, permiten que el agua no escurra, disminuyendo la pérdida de suelo.

En la Figura 8 se aprecia que el *ISP* presenta suelos con una separabilidad de partículas moderada en cimas de cerros (*CC*) y lomajes (*LM*), y una alta separabilidad de partículas en conos aluviales (*CA*), quebradas (*QUE*) y llanuras aluviales (*LLA*), esto debido principalmente a la composición granulométrica y a la distribución del tamaño de partículas en el suelo según su geoforma, pues tal como se indica en el Apéndice XIV, éstas tienen suelos compuestos de partículas gruesas (arenas), y por tanto, son más susceptibles a disgregarse por acción de agentes ambientales que influyen en la formación del paisaje (Renard *et al.*, 1997), concordando con lo planteado por Lozano *et al.* (2002) y Hernández *et al.* (2013) quienes plantean que los suelos con texturas con mayor contenido de arenas y limos, son más susceptibles a la separación de partículas, como es el caso de los *CA*, *QUE* y *LLA*; mientras que suelos en posición de *CC* y *LM*, presentan porcentajes similares de limo y arcillas, y por tanto, presentan una mayor cohesión que dificulta la separación de sus partículas (Ospina, 2009). No obstante aquello, se basa en supuestos en el cual no se está considerando el material parental, que es en definitiva el que determina las propiedades físicas y mineralógicas del suelo (Luzio, 2010), y por tanto las condiciones del relieve por si solas no son lo suficientemente influyentes para indicar la separación de las partículas del suelo. Un estudio sobre la litología estos suelos, complementaría el efecto de este índice, sin embargo no está dentro de los propósitos de este trabajo.

De todos los índices analizados, el *ISE* es el único que presenta comportamientos similares en las diferentes geoformas (Figura 8), donde posiciones de quebrada (*QUE*), llanuras aluviales (*LLA*) y piedmont (*PM*) son más inestables y susceptibles a procesos de sellado y encostramiento del suelo, mientras que las terrazas marinas (*TM*) no presentan riesgo de sellamiento y encostramiento, coincidiendo ello con lo visto en campo, pues en las geoformas más inestables (*QUE*, *LLA* y *PM*), los procesos de sellamiento y encostramiento del suelo se producen por el bajo contenido de materia orgánica que poseen, -no superando el 4%- , además de ser suelos con mayor contenido de arenas y limo, siendo estos factores que favorecen a ambos procesos (Bravo y Florentino, 1997; Pulido y Lobo, 2009; Hernández *et al.*, 2013). Por otra parte, en el caso de las *TM*, existe una plantación de especies estabilizadoras de dunas, con una amplia cobertura vegetal compuesta de árboles de eucalyptus y arbustos, con abundante hojarasca y porcentaje de materia orgánica superior a 30%, lo que protege al suelo de agentes erosivos (Thomas *et al.*, 1997; Stocking y Murnaghan, 2000).

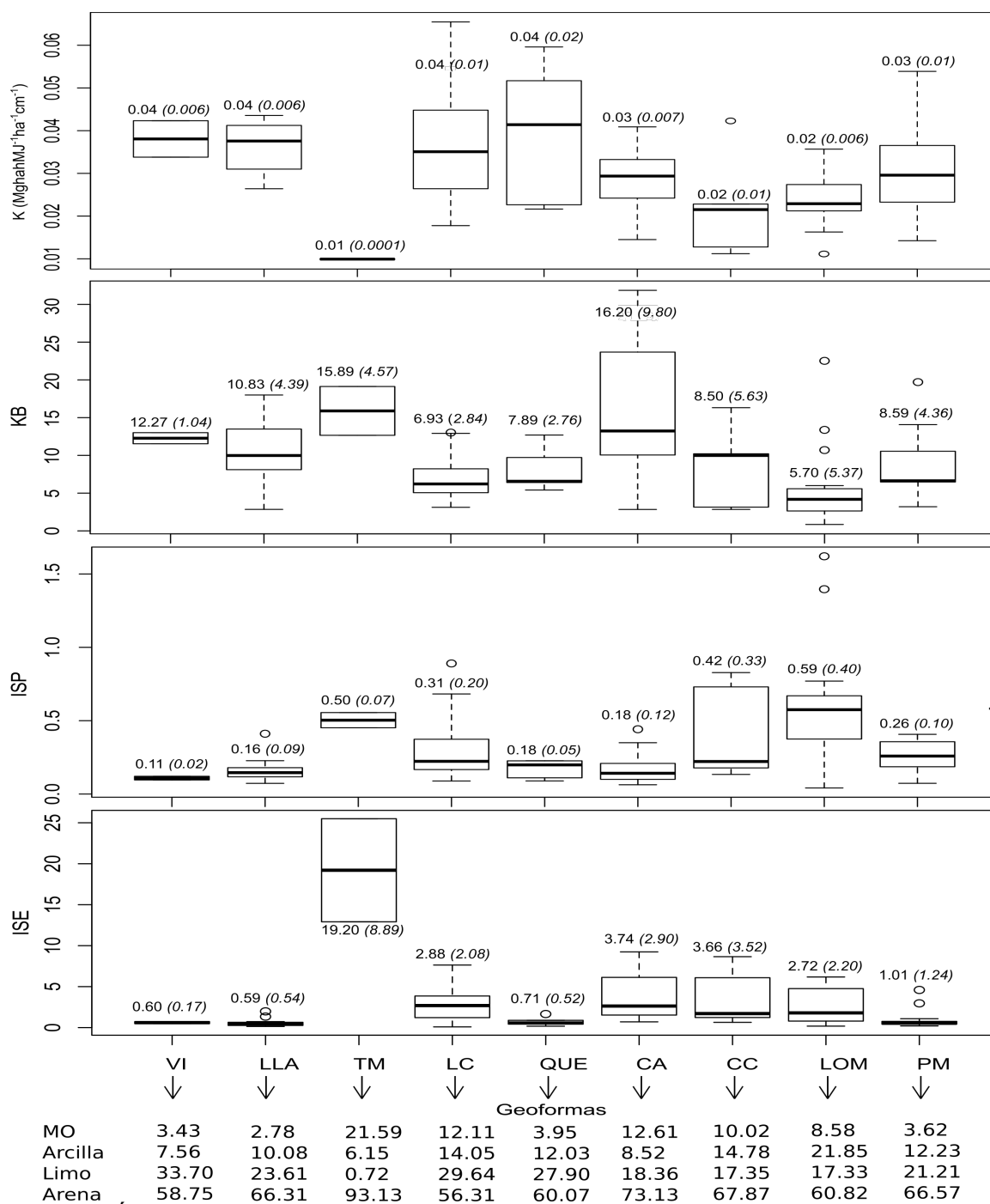


Figura 8: Índices de erodabilidad K , KB , ISP e ISE según geomorfos.

VI: valle intermontano; LLA: llanura aluvial; TM: terrazas marinas; LC: ladera de cerro; QUE: quebrada; CA: cono aluvial; CC: cima de cerro; LOM: lomaje; PM: piedmont. K : índice de erodabilidad de la $USLE$; KB : relación mecánica de Bouyoucos; ISP : índice de separabilidad de partículas; ISE : índice de sellado – encostrado. Valores sobre cajas indican medias y desviación estándar en paréntesis. Valores de propiedades edáficas, indican medias.

3.3 Efecto de propiedades físicas y químicas en índices de erodabilidad

3.3.1 Efecto de carbonato de calcio en índices de erodabilidad

En este apartado se evaluó la relación entre el contenido de carbonatos de calcio presente en el suelo, con los índices de erodabilidad (Apéndice VI), siendo el *ISE* (Figura 9), el único que presentó una correlación significativa con el contenido de carbonatos. Ahora bien, a pesar de que los demás índices no presentaron correlaciones significativas, algunos de ellos si presentaron coeficientes de determinación significativos, como es el caso de la *Relación mecánica de Bouyoucos* y el índice de erodabilidad *K*.

Junto a lo anterior, se evaluó la relación de los índices en las diferentes zonas geográficas de estudio, con la finalidad de determinar su correlación, dando esto como resultado, que la zona centro presenta mejor relación en índices con el contenido de carbonatos, donde el *ISE* tiene una alta correlación y un buen ajuste de 0.76, seguido del índice de erodabilidad *K*, que tiene una correlación moderada negativa y significativa, y un ajuste de 0.27, y por último, el índice de *Bouyoucos* con una correlación moderada. El *ISP* no presentó correlación significativa en ninguna de las zonas de estudio.

Con lo anterior, se aprecia que el contenido de carbonatos tiene mejor relación con el *ISE*, y que esta relación es mayor en la zona centro (Apéndice VI). La interacción que presenta el contenido de carbonatos de calcio con el proceso de sellado y encostramiento del suelo, explica muy bien los resultados obtenidos en este estudio, pues la presencia de carbonatos de calcio en el suelo permite mantener a las partículas de arcillas cohesionadas (en estado de floculación), impidiendo que éstas se separen (Luzio *et al.*, 2006; Sadzawka, 2006). No obstante lo anterior, cuando el suelo es expuesto a frecuentes e intensas precipitaciones, la estabilidad de las arcillas colapsa debido al lavado de carbonatos, provocando separación y movimiento de partículas, destruyendo la porosidad y estructura del suelo e impidiendo la infiltración del agua, y con ello la formación de sellado y encostramiento, que a su vez produce escorrentía superficial, y por tanto, erosión (Badia, 1992; Poch *et al.*, 2013).

Es importante destacar, que del análisis de regresión efectuado entre el contenido de carbonatos y el *ISE*, se denota un efecto positivo y significativo de la presencia de carbonatos en el *ISE*. El efecto cementante de los carbonatos permite una mayor agregación y resistencia de las partículas a la dispersión. No obstante esto último, el efecto de los carbonatos no se ve reflejado en los valores medios al comparar el *ISE* de las muestras tratadas (eliminación de carbonatos) y no tratadas, en que no hay diferencias significativas, lo cual se atribuye a la variabilidad de las muestras analizadas. Sin embargo, dada la fuerte relación entre carbonatos y el *ISE*, es recomendable considerar esta propiedad en la medición de este índice, particularmente en suelos de zonas áridas, debido a que éste puede

ser un importante agente de cementación y agregación, que podría contrarrestar las bajas cantidades de *MO*, que generalmente encontramos en suelos de zonas áridas.

El índice de erodabilidad *K*, tiene una correlación negativa, ya que la presencia de carbonatos mantiene la estabilidad del suelo. Lo anterior coincide con estudios realizados por Fotouhi *et al.* (2012), quien plantea que el porcentaje de Ca^{+2} tiene una correlación negativa con el índice *K*, atribuible a la cohesión de las partículas del suelo, favoreciendo la resistencia de éste al impacto de gotas de lluvia. Junto a ello, el autor plantea que el carbonato de calcio es reconocido como un agente cementante con un rol fundamental en la resistencia a la erosión.

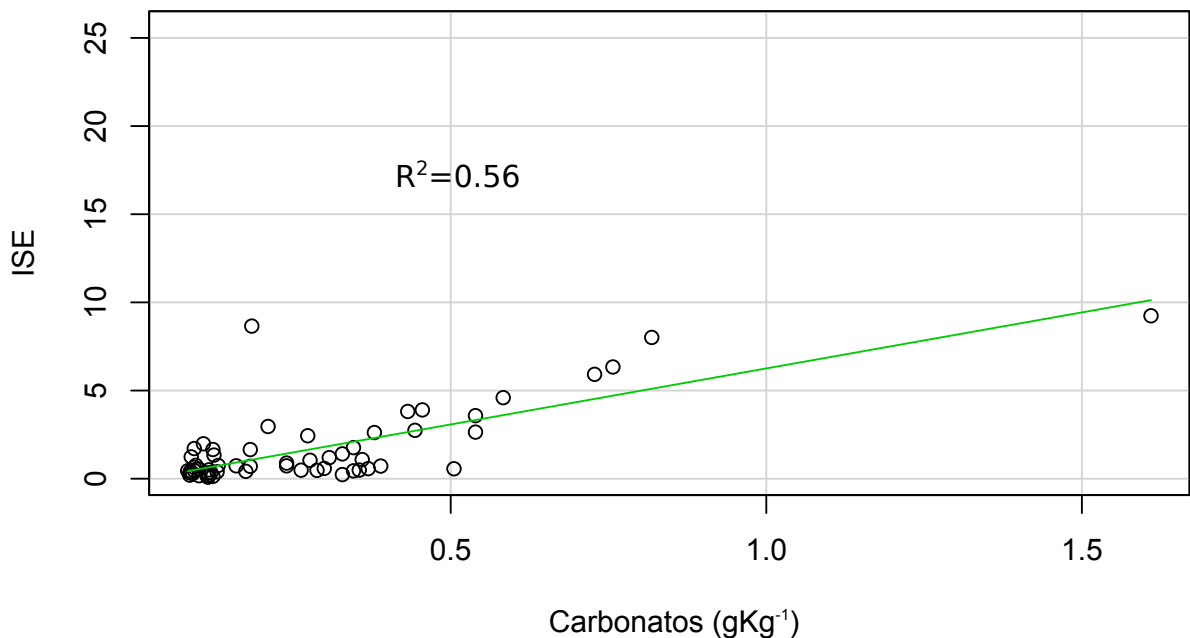


Figura 9: Relación entre el índice de sellado – encostrado (*ISE*) y carbonatos de calcio.

Por su parte, el índice de *Bouyoucos* se encuentra en función del contenido de arcilla, sobre la cual el carbonato de calcio actúa manteniéndola en un estado floculado que impide la separación de sus partículas (Badía, 1992; Luzio *et al.*, 2006), y por tanto, es posible deducir que éstas mantienen una estrecha relación, al determinar la susceptibilidad a la disgregación de partículas del suelo.

3.3.2 Efecto de materia orgánica y cobertura vegetal en índices de erodabilidad

Se analizó la relación de la materia orgánica con los índices de erodabilidad (Apéndice VII), de los cuales tuvieron una correlación significativa el *ISE* y el índice *K*, mientras que solo el *ISE* presentó significancia en el coeficiente de determinación. Sin embargo este último no será analizado, pues la *MO* es una variable muy influyente dentro de éste, considerándose como una autocorrelación.

Junto a lo anterior, se evaluó la relación de los índices en cada zona geográfica, obteniéndose que el *ISP* y el índice de *Bouyoucos*, presentaron una correlación significativa solo en la zona centro, siendo moderada y negativa para el *ISP* ($r = 0.44$) y alta para *Bouyoucos* ($r = 0.68$); mientras que el índice de erodabilidad *K* solo tuvo una correlación baja y negativa ($r = 0.33$) en la zona norte, con un coeficiente de determinación de 0.23.

La relación con el índice *K* es baja y negativa (Figura 10), y en muchos casos no resulta significativa, coincidiendo ello con lo planteado por Bonilla y Johnson, 2012; Fotouhi *et al*, 2012; Diaz *et al*, 1998; y Piscitelli *et al*. 2010, quienes evaluaron la correlación entre el índice *K* y el contenido de materia orgánica, estableciendo que sus resultados eran negativos y no significativos, al no incorporar en el índice *K*, contenidos de materia orgánica mayores a 4%, pese a que existen suelos que contienen porcentajes mayores a dicho valor. Esto último se debe a que al extrapolar los porcentajes de materia orgánica mayores a 4%, genera subestimaciones en el cálculo de erodabilidad (Ouyang, 2002; Panagos, 2014). Lo anterior explica además, que el índice *K*, solo obtuvo una correlación significativa en la zona norte, donde los suelos presentan un bajo contenido de materia orgánica, y que esta correlación es negativa, debido a que a menor contenido de materia orgánica, los suelos son más inestables y por tanto, susceptibles a la erosión (Suárez, 1998; Rorke, 2000; Anache *et al.*, 2015).

Por otro lado, Bonilla y Johnson (2012) mencionan que el bajo y/o nulo ajuste que existe entre el contenido de materia orgánica y el índice *K*, se debe a que este último involucra otros componentes, -como la permeabilidad, estructura y distribución del tamaño de partículas -, los cuales cambian al mismo tiempo.

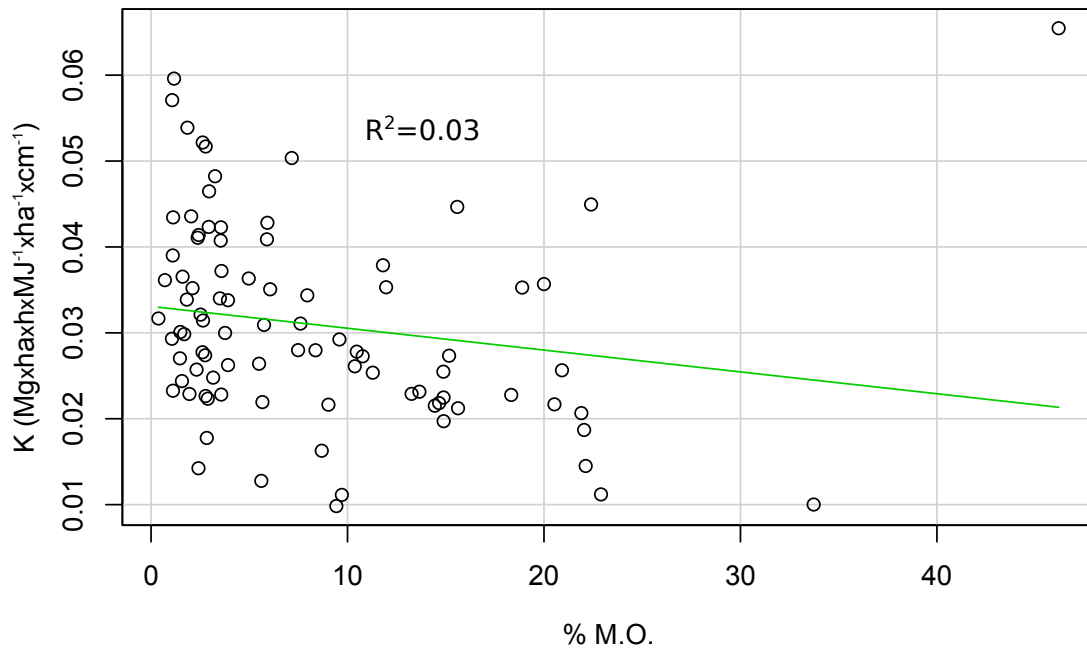


Figura 10: Relación entre el porcentaje de materia orgánica e índice de erodabilidad K .

La correlación moderada y negativa que tiene la *relación mecánica de Bouyoucos* con el porcentaje de materia orgánica en la zona centro, concuerda con estudios realizados por Anache *et al.* (2015), que plantean que la relación inversa entre ambos, se debe a que su relación con las arcillas también es inversa, y que ambas, -en su conjunto-, son estabilizadoras de los agregados del suelo (Kirkby y Morgan, 1991; Luzio *et al.*, 2006).

Por otro lado el *ISP* también presentó una correlación moderada y negativa, lo que concuerda con el planteamiento de Andrade *et al.* (s.a.) y Pulido *et al.* (2009), que postulan que la materia orgánica junto a otros componentes del suelo, -como arcillas, iones di y trivalentes (Fe y Al), y la actividad biológica-, disminuyen la separabilidad de partículas al estar relacionadas con la estabilidad del suelo, siendo por tanto, posible establecer que ante mayor contenido de materia orgánica, menor es la posibilidad de que la partículas del suelo se separen.

En cuanto al análisis del efecto de la cobertura vegetal en los índices de erodabilidad, se obtuvo que la *relación mecánica de Bouyoucos*, según el test de comparación *Kruskall-Wallis*, no registró diferencias significativas en suelos con presencia y ausencia de cobertura vegetal. No obstante lo anterior, se puede apreciar que suelos que presentan cobertura vegetal poseen valores más altos en el test, que aquellos suelos que no poseen cobertura vegetal, lo que indicaría que son más susceptibles a la separación de sus partículas. Caso similar al anterior, ocurre con el índice de separabilidad de partículas

(*ISP*), el cual indica que suelos bajo protección vegetacional son más erodables, siendo no significativa esta diferencia.

El fenómeno antes descrito, se puede explicar por el hecho de que ambos índices, sólo consideran la distribución del tamaño de partículas, y no analizan otras propiedades que determinen la estabilidad del suelo y que se relacionan con la presencia de vegetación, tales como la estructura, permeabilidad y el contenido de materia orgánica (UNESCO, 2009), pues un suelo que presente mayor proporción de partículas de arena, no necesariamente es más susceptible a erosionarse, pudiendo ello ejemplificarse, con el caso de dunas estabilizadas con vegetación, lo que genera que éstas aumenten su capacidad de retención de agua, mejorando sus propiedades (Casanova *et al.*, 2004). Asimismo, suelos ricos en arcillas, -caracterizados por su fuerza de cohesión y resistencia a la disgregación-, al encontrarse expuestos y ser afectados por intensas precipitaciones, pueden ser incluso más erodables que suelos con partículas gruesas (Fournier, 1975; Morgan, 1997).

Por otra parte, tanto del análisis del índice de sellado-encostrado (*ISE*), como del índice de erodabilidad *K*, se deriva que los suelos bajo cobertura vegetal son menos erodables que los suelos sin una cobertura vegetacional. Sin embargo, sólo el *ISE* presentó diferencias significativas en sus resultados. La semejanza en los resultados derivados del análisis de ambos índices, es posible de explicar por el hecho de que estos, -a diferencia de los otros índices estudiados-, consideran la granulometría del suelo y el porcentaje de materia orgánica siendo este último el que mejora la estructura, la estabilidad de los agregados y la resistencia a la erosión (Oyarzún, 1993).

En cuanto a lo referido a la falta de diferencias significativas en el efecto de la cobertura vegetal sobre el índice de erodabilidad *K*, se plantea que éstas se deben principalmente a que éste considera otras propiedades del suelo para medir erodabilidad, como lo son la estructura y permeabilidad, que se relacionan a su vez, con la presencia de otras coberturas de protección para el suelo, como lo son la pedregosidad superficial, - que tiene por función protegerlo del impacto de gotas de lluvia y al mismo tiempo, disminuir la velocidad de escorrentía superficial -, y la pedregosidad sub-superficial, - que disminuye la infiltración del agua, aumentando la escorrentía superficial (Renard *et al.*, 1997) -, y como estas características son similares entre suelos del mismo sitio, es posible aminorar las diferencias entre suelos bajo protección vegetal y suelos desprovistos de vegetación. Por tanto la erodabilidad medida de esta forma, es relativamente estable a los cambios de los factores que la componen.

4. CONCLUSIONES

El primer objeto de estudio, refiere a la estimación de las tasas de pérdida de suelo, mediante la utilización de la *USLE*, para las zonas norte, centro y centro – sur. De ello, se obtuvo que la zona centro – sur, presenta las menores tasas de erosión, mientras que la zona centro, tiene las tasas de erosión más altas. Es importante mencionar que *USLE* sobreestimó las tasas de erosión en este estudio, lo que es un patrón recurrente observado en otros estudios.

La determinación del grado de erosión, mediante la clasificación de FAO (1980), indicó que el grado de erosión de las zonas norte y centro, son moderados; mientras que el de la zona centro – sur es ligera, siendo ello un indicador que permite establecer que la tasa de pérdida de suelo de las zonas analizadas, aumenta de sur a norte.

Un segundo elemento de análisis refiere a los resultados obtenidos en las tasas de erosión calculadas en base a las diferentes geoformas de las zonas de estudio, que indican que las variaciones de éstas se ven influenciadas principalmente por la pendiente y la cobertura vegetal que presente la geoforma, y por tanto, ello permite establecer que para efectos del análisis de la tasa de erosión, se debe priorizar la evaluación de estos factores (grado de pendiente y cobertura vegetal), en desmedro de la geoforma. Lo anterior porque ambos factores influyen en las propiedades físicas y químicas del suelo, y por tanto, hacen que éste sea más o menos susceptible a la disgregación de sus partículas.

La importancia del grado de pendiente en la estimación de las tasas de erosión, se refleja además, en la relevancia que presenta el factor topográfico (*LS*) en la *USLE*, convirtiéndose por tanto, en el tercer elemento de análisis, ya que de los cinco factores constituyentes de la *USLE* (*R*, *K*, *C*, *P* y *LS*), éste es el que presenta una mayor correlación con ella. Sin embargo, a pesar de ser siempre el factor más influyente dentro de la *USLE*, su grado de influencia variará dependiendo del método de estimación que se utilice para su medición. Esto porque de acuerdo a los resultados obtenidos al aplicar el método de pendientes irregulares y el de geoprocusamiento, se obtuvo que el primero demuestra una mayor relación entre *USLE* y el factor *LS*, que el segundo. No obstante, la elección del método de estimación dependerá de la escala de trabajo que se quiera medir, y de los objetivos que se deseen alcanzar.

El cuarto objeto de análisis, hace referencia a la estimación de la tasa de erosión en base a la *USLE*, *USLE modificada* y *método de campo*, obteniéndose que la información proporcionada por cada uno de ellos es confiable, siempre y cuando se utilicen adecuadamente. Esto porque la *USLE*, si bien permite estimar los niveles de erosión del suelo a partir de datos reales obtenidos en terreno, presenta desventajas asociadas a los altos

recursos económicos y de tiempo que demanda su medición, además de presentar resultados que sobreestiman tasas altas de erosión, siendo por ello recomendable utilizarla en casos que no se requiera la estimación de grandes extensiones de terreno. Por su parte, la *USLE modificada* se constituye como una alternativa fácil, rápida y económica para estimar la tasa de erosión, y por lo tanto, es de utilidad en grandes extensiones geográficas. Sin embargo, la precisión de sus resultados dependerá de la calidad de la imagen raster a utilizar, ya que una baja resolución de ella, afecta la estimación del largo de la pendiente y de su inclinación, afectando con ello el cálculo de la tasa de erosión. Por último, el *método de campo* al realizarse por medio del análisis visual, se constituye como una alternativa fácil y económica que puede ser utilizada por agricultores para el manejo de sus tierras; sin embargo, no es recomendable utilizarla para efectos distintos, ya que no es un buen predictor para estimar las tasas de erosión del suelo.

Por su parte, un quinto elemento de análisis refiere a los resultados obtenidos en la estimación de los índices de erodabilidad *K*, *KB*, *ISE* e *ISP*, en la zona norte, centro y centro – sur, que arrojan que el índice *K* presentó la misma variación en las tres zonas de estudio, pudiendo esto explicarse, en que éstas presentan códigos de permeabilidad y estructura con valores similares, y además, en que dentro de este índice, el porcentaje de materia orgánica se encuentra restringido a un cuatro por ciento, y que por lo tanto, cualquier valor mayor a éste, es subestimado. Caso contrario ocurre con el índice *KB*, que demuestra una mayor variación en los resultados obtenidos en cada zona de estudio, explicándose ello por la diversidad de texturas que conforman el suelo de los sitios de análisis. Por su parte *ISE*, resultó ser consistente en sus resultados, pues muestra que la estabilidad de los suelos, mejora a medida que se avanza hacia el sur.

Un sexto objeto de análisis, hace mención a la relación existente entre el índice de erodabilidad *K*, con los índices *KB*, *ISE* e *ISP*, a partir del cual se obtiene que el *ISE* es el que presenta un mayor grado de relación con *K*, debido a que ambos índices consideran componentes influyentes en la erodabilidad, como lo son el porcentaje de materia orgánica y la granulometría del suelo. Ahora bien, al analizar el comportamiento del índice *K* e *ISE* por zona de estudio, es posible decir que en la zona centro, éstos presentaron mayor relación, debido al bajo contenido de arcillas presente en los suelos de esta zona; esta propiedad no es medida por el *ISE*, y por tanto estaría definiendo la relación de ambos.

Asimismo, el análisis realizado permitió estimar que el *ISP* presenta una mayor relación con *K*, que el índice *KB*; esto porque tanto *K*, como *ISP*, incluyen dentro de su análisis, el estudio de las partículas de arenas muy finas, que hacen que el suelo sea más susceptible al deterioro físico. Por su parte, al analizarlo por zonas, el estudio indica que el índice *K* y el *ISP* presentan mayor relación en la zona centro – sur, debido al alto contenido de arcillas y bajo contenido de arenas muy finas presente en los suelos de esta zona, determinando que éstos sean más estables. Por su parte, el índice *K* y el *KB*, presentan mayor relación en la zona centro, ya que el bajo contenido de arcilla en los suelos de esta zona, permite que el

índice *KB* sobreestime los valores de erodabilidad, y con ello, se aproxime más a los valores de erodabilidad obtenidos por medio del índice *K*.

El séptimo elemento de estudio, refiere a la evaluación de los índices de erodabilidad, a partir de distintas geoformas, obteniéndose que más que la geoforma misma, la erodabilidad del suelo se ve influenciada por los factores que la componen, como lo son la pendiente y la cobertura vegetal, ya que éstas juegan un rol fundamental en las propiedades intrínsecas del suelo, tales como el contenido de *MO* y su granulometría.

Un octavo elemento de análisis, hace mención a la relación existente entre las propiedades físicas y químicas del suelo, -como el porcentaje de materia orgánica, contenido de carbonatos y las partículas gruesas y finas del suelo-, con los índices de erodabilidad *K*; *KB*; *ISP* e *ISE*, obteniéndose que el tamaño de las partículas, junto al contenido de materia orgánica, se constituyen como los principales factores influyentes en la erodabilidad, pues le proporcionan al suelo una mayor estabilidad, retención de agua, fertilidad y resistencia a la disgregación, por tanto, los índices *KB* e *ISP* al no considerar el porcentaje de materia orgánica en su estimación de erodabilidad, no se constituyen como buenos predictores de erodabilidad del suelo; el índice de erodabilidad *K*, si bien tuvo una relación significativa con el contenido de materia orgánica, ésta no resultó ser representativa para los suelos chilenos, evaluados en este estudio.

La cantidad de carbonatos presente en las muestras de suelo, inciden fuertemente en el *ISE*, siendo éste, el índice que mejor comportamiento mostró frente al resto. Sería importante entonces, considerar el factor carbonatos, y por ende el origen de la muestra en su determinación, pudiéndose llegar a un nuevo *índice de sellado – encostrado modificado*, que incluya esta propiedad edáfica.

Dado lo anterior, el *ISE* al tener una buena relación con todas las propiedades del suelo, se constituye como un buen predictor de erodabilidad de todas las zonas estudiadas.

El noveno y último elemento de análisis, refiere a la relación existente entre la cobertura vegetal y la erodabilidad del suelo, a partir del cual se desprende que para los índices *K*, *KB* e *ISP*, no existen diferencias significativas en la erodabilidad según la presencia o ausencia de cobertura vegetal en el suelo. Lo anterior resulta interesante de analizar, al considerar que el índice *K* incorpora la materia orgánica como elemento de análisis de erodabilidad, sin embargo para estos efectos, ésta no resulta relevante, puesto que el índice estima la erodabilidad a partir de los diversos factores que influyen en la erodabilidad del sitio. Caso contrario ocurre con el *ISE*, que de igual manera considera la cobertura vegetal como factor de estimación de la erodabilidad, pero en donde ésta juega un rol fundamental, y por tanto,

la presencia o ausencia de cobertura vegetal, si genera diferencias significativas en la erodabilidad del suelo.

Con lo expuesto anteriormente, es posible concluir que para medir la erodabilidad en suelos de uso actual forestal, se deben considerar las propiedades del suelo que midan la estabilidad del recurso, como lo son, la estructura, la permeabilidad, el porcentaje de materia orgánica y la textura, siendo estos dos últimos, los componentes más influyente en la erodabilidad. En este sentido, se recomienda utilizar el (*ISE*) para medir la susceptibilidad del suelo a la disgregación de sus partículas, ya que resulta de fácil medición e involucra el porcentaje de materia orgánica y la distribución del tamaño de partículas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ALCAGAYA, S.; NARBONA, M., 1977.** Estudio de las agrícolas. Comunidades IV región. Publicación nº20. Santiago, Chile. 149 p.
- ANACHE, J.; BACCHI, C.; PANACHUKI, E.; ALVES-SOBRINHO, T., 2015.** Assessment of methods for predicting soil erodibility in soil loss modeling. Sao Paulo, UNESP. In: Geociencias, vol. 34, n.1. 32 - 40 p.
- ANDRADE, L., 2014.** Aplicación del índice de estabilidad estructural de Pieri (1995) a suelos montañosos de Venezuela, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. Terra Nueva Etapa, vol. XXX, nº 48. 143 – 153p.
- ANDRADE, L.; COLOTTI, E.; GUEVARA, J.; sin año.** Estimación de la erosionabilidad en una parcela experimental de erosión mediante diferentes modelos matemáticos. Escuela de geografía, Universidad central de Venezuela.
- ARAB, A.; ABUBACAR, S.; IDRIS, U., 2013.** Evaluation of Empirical and Nomograph Method of Predicting Erodibility Index for Selected Savannah Soils. Ahmadu Bello University Zaria, Nigeria. The pacific journal of Science and Technology. Vol. 14. Nº1. 517-523 p.
- BABEL, J.; GOUVEIA, C.; MAHECHA, L., 2012.** Análisis geoestadística de las fracciones granulometría para el uso como indicadores de complejidad y cambio ambiental en los bosques sobre depósitos pleistocénicos y holocénicos de la planicie costera del municipio de Bertioiga (Brasil), cuencas de los ríos Itagararé y Guaratuba. I Congreso Iberoamericano de Gestión Integrada en áreas litorales, Universidad de Cádiz, España.
- BADIA, D., 1992.** Suelos afectados por sales. Unitat d'Ecologia (UAB), Bellaterra, Barcelona. Bullt. Soc. Cat. Cièn. Vol. XIII. 609 – 629 p.
- BAÑON, L.; BEVIÁ, J., 2000.** Manual de carreteras: Construcción y Mantenimiento. Capitulo 5: Suelos. Universidad de Alicante. Departamento de ingeniería de la construcción, obras públicas e infraestructura urbana. Vol II. Valencia, España. 2- 30 p.

- BONILLA, C.; JOHNSON, O., 2012.** Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. In: Geoderma 189 – 190 (2012). 116-123 p.
- BRAVO, C.; A. FLORENTINO. 1997.** Efecto de diferentes sistemas de labranza sobre las propiedades físicas del suelo y su influencia sobre el rendimiento del algodón. Bioagro 9: 67-75 p.
- BRYAN, R.B. 1968.** The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. Geoderma 2: 5-26 p.
- BRUBAKER, S.C.; JONES, A. J.; LEWIS, D.T.; FRANK, K., 1993.** Soil Sci. Soc. Am. J., 57, 235 p.
- BOUYOUCOS, G., 1935.** The Clay ratio as a criterion of susceptibility of soil to erosion. Journal of American Society of Agronomy 27: 738-741 p.
- CARTER, M.R; GREGORICH, E.G., 2007.** Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science, Second edition. ISBN: 13:978-1-4200-0527-1. 20: 216-217 p.
- CASANOVA, M.; VERA, W.; LUZIO, W.; SALAZAR, O., 2004.** Edafología: Guía de clases prácticas. Departamento de ingeniería y suelos. Facultad de ciencias agronómicas. Universidad de Chile. 75 p.
- CASANOVA, M., 2008.** Indicadores de degradación erosiva de suelos agua, viento, gravedad. Conservacion de suelos y aguas. Universidad de Chile. Departamento de ingeniería y suelos. Santiago, Chile. 2 p.
- CEPEDA, J., 1989.** Actividad temporal de tenebriónidos epígeos (Coleoptera) y su relación con la vegetación arbustiva en un ecosistema árido de Chile. Departamento de Biología y Química. Universidad de la Serena. Revista chilena de Historia Natural. 62: 115-125 p.
- CIREN, 2010a.** Determinacion de la erosion actual y potencial para los suelos de Chile. Región de los Ríos, síntesis de resultados, Diciembre 2010. InnovaChile Corfo. Santiago, Chile. 8-11 p.

- CIREN, 2010b.** Determinación de la erosión actual y potencial para el territorio nacional de Chile. [En línea]. <http://www.unesco.org.uy/ci/fileadmin/templates/conaphi.cl/documentos/XV_Jornadas/Proyecto_Erosion_Nacional_CIREN.pdf>. [Consulta: 28 marzo 2014].
- CIREN, 2010c.** Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. Informe final 2010. Flores, J.; Espinosa, M.; Martínez, E.; Henríquez, G.; Avendaño, P.; Torres, P.; Ahumada, I. Centro de información de recursos naturales. Publicación n°139. ISBN: 978-956-7153-91-6. Santiago, Chile. 292 p.
- CIREN, 2005.** Descripciones de suelos, materiales y símbolos: Estudio agrológico IV región. Publicación n°129. Santiago, Chile. 280 p.
- CIREN, 1997.** Descripciones de suelos, materiales y símbolos: Estudio agrológico V región. Publicación n°116, Santiago, Chile. 366 p.
- CROSARA, A., 2007.** Génesis del suelo y características generales. [En línea]. <<http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Genesis%20del%20suelo%20y%20caracteristicas%20generales.pdf>>. [Consulta: 26 marzo 2014].
- DE LEENHER, L.; DE BOODT, M., 1959.** Determination of aggregate stability by change in mean weight-diameter. Mededelingen van de Landbouwhogeschool, Gent 24: 290-351 p.
- DE VLEESCHAUWER, D.; LAL, R.; DE BOODT, M., 1978.** Comparison of detachability indices in relation to soil erodibility for some important Nigerian soils. Pedologie, XXVIII, 1. 5-20 p.
- DEL POZO, A.; DEL CANTO, P., 1999.** Áreas agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII regiones. Serie Quilamapu N° 113. INIA Quilamapu. Ministerio de Agricultura. Chillán, Chile.
- DENGIZ, O.; KIZILKAYA, R.; GÖLT, C.; HEPSEN, P., 2007.** Effects of different topographic positions on soil properties and soil enzymes activities. Department of Soil Science, Agricultural Faculty, Ondokuz Mayıs University 55139 Kurupelit, Samsun, Turkey. Asian Journal of Chemistry. Vol. 19, No. 3 (2007), 2295-2306 p.

- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, 2004.** Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de aguas según objetivos de calidad: Cuenca del estero Pupío. Gobierno de Chile. 63 p.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, 2004.** Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Limarí. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. [En línea] < http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Limari.pdf>. [Consulta: 3 de agosto 2014].
- DÍAZ – FIERRO, F.; SOTO, B., 1998.** Proceso de erosión: necesidad e información de suelos para su cuantificación y control. Boletín de la Sociedad Española de la Cuenca del Suelo. N°4. 61 – 71 p.
- FAO-PNUMA-UNESCO. 1980.** Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. FAO. Roma, Italia.
- FAO. 1965.** Soil erosion by water: Some measures for its control on cultivated lands. Land and Water Development Series N° 7, Roma, Italia. 279 p.
- FAO, 2009.** Guía para la descripción de suelos. Proyecto FAO SWALIM, Nairobi, Kenya-Universidad Mayor de San Simón, Bolivia. Cuarta Edición. Roma, Italia. 111 p.
- FLORES, L.; ALCALÁ, J., sin año.** Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de físicas de suelos. Departamento de edafología. Instituto de geología. Universidad autónoma de México. 56 p.
- FORTUN, C., Y A. FORTUN. 1989.** Diversos aspectos sobre el papel de la materia orgánica humificada en la formación y estabilización de los agregados del suelo. Edafol. Agrobiol. 48: 185-204 p.
- FOURNIER, F., 1975.** Conservación de suelos. (J.A. Medina Trad.). Madrid, España: Mundi-Prensa, (Trabajo original publicado en 1972).

- FUNDACIÓN HONDUREÑA DE INVESTIGACIÓN AGRÍCOLA, 2004.** Guía sobre prácticas de Conservación de Suelo. Proyecto UE-Cuencas. Centro de Comunicación Agrícola de la FHIA. Honduras. 18 p.
- GABRIELS, D., R. HORN, M.M. VILLAGRA; R. HARTMAN. 1997.** Assessment, prevention and rehabilitation of soil structure caused by soil surface sealing, crusting and compaction. In: R. Lal *et al.* (Eds). Methods for Assessment of Soil Degradation. Advances in Soil Science, CRC Press, Boca Raton, Florida USA. 129-165 p.
- GACHENE, C., 1982.** Assessing the relative erodability of some Kenyan soils using a rainfall simulator and the prediction of relative erodibility factors. A thesis submitted in part fulfilment for the degree of master of science in the University of Nairobi. Isric Library. KE-1982.19. Wageningen the Netherlands.
- GAETE, N.; CARRASCO, J., 1999.** Prácticas de conservación de suelos y aguas, para el control de la erosión hídrica. En: Técnicas para el manejo de los recursos naturales en el programa de recuperación de suelos degradados en la novena región. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Carillanca. Temuco, Serie Carillanca, Julio, 107 – 129 p.
- GERRARD, A.J., 1981.** Soils and Landforms, An Integration of Geomorphology and Pedology, Allen and Unwin.
- GOLDMAN, S., JACKSON, K., BURSZTYNSKY, T., 1986.** Erosion and sediment control handbook. McGraw Hill Book Co., New York.
- HAYNES, R. J., R. S. SWIFT, AND K. C. STEPHEN. 1997.** Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter, water stable and clod porosity in a group of soils. Soil Till. Res. 19: 77-81 p.
- HENIN, S.; MOURNIER, G.; COMBEAU, A., 1958.** Methode pour l'étude de la stabilité structural des sols. Annales Agronomiques 1: 71-90 p.
- HERNÁNDEZ, O.; VARGAS, C.; LOBO, L., 2013.** Efecto de la siembra directa sobre la estabilidad de los agregados en un inceptisol degradado bajo cultivo de arroz. XX Congreso Venezolano de la ciencia del suelo. Universidad Nacional Experimental de los Llanos Centrales, Rómulo Gallegos.

- HERMAWAN, B. AND A. BOMKE. 1997.** Effects of winter cover crops and successive spring tillage on soil aggregation. *Soil Till. Res.* 44: 109-120 p.
- HICKEY, R., 2000.** Slope angle and Slope length solutions for Gis cartography. V. 29, nº1. 1-8 p.
- HINCAPIÉ, E.; RIVERA, H., 2003.** Validación del factor de erodabilidad en suelos de la unidad Chinchiná, Melanudands, mediante el uso de simulador de lluvias. *Cenicafé* 54(1): 77 – 89 p.
- HOFFMAN, A.; APARECIDA DA SILVA, M.; NAVAS, M.; CURTI, N.; KLINKE, G.; FRANG A DA FREITAS, D., 2013.** Development of topografic factor modeling for application in soil erosion models. In: “Soil processes and current trendis in quality assessment”, M. C. H. Soriano, ed. In *Tech* 2013, 111-138 p.
- HORTON, R. E., 1945** Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to cuantitative geomorfology. *Geol. Soc. Am. Bull.* 56. 275-370 p.
- HUANG, J.; LIN, C.; WANG, Y., 2013.** Comparative study of soil erodibility index for Taiwan Montainous area. *Research Journal of Applied Sciencies, Engineering of Technology.* 5(17) 4343-4348 p.
- HUGGETT, R. J., 2007.** *Fundamentals of Geomorphology.* Routledge Fundamentals of Physical Geography, Taylor & Francis group, London- New York. Second edition.
- JONES C.A., GRIGGS, R.H., WILLIAMS, J.R., SRINIVASAN, R., 1992.** Predicción de la erosion hídrica y eólica del suelo. Taller sobre la utilización de un sistema de información geográfica (SIG) en la evaluación de erosion actual de suelos y la predicción del riesgo de erosion potencial. Apoyo para un agricultura sostenible mediante conservación y rehabilitación de tierras en américa latina. FAO. ISBN 92-854-3001-5 [En línea]. <<http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S03.htm>>. [Consulta: 23 abril 2016].
- KEMPER, W., ROSENAU, R., 1986.** *Aggregate Stability and Size Disribution.* Snake River Conservation Research Center. Agricultural Research Service, USDA. Kimberly, Idaho. American Society of Agronomy-Soil Science Society ofAmerica. *Methods of Soil Analisys, Part I. Physical and Mineralogical Methods – Agronomy Monograph N° 9.* 2en Edition.

- KIRKBY, M.; MORGAN, R., 1991.** Erosión de suelos (J. Hurtado, Trad.). México: Limusa (Trabajo original publicado en 1980).
- KREZNOR, W.R., K.R. OLSON, W.L. BANWART, AND D.L. JOHNSON. 1989.** Soil, landscape, and erosion relationships in a northwest Illinois watershed. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:1763–1771 p.
- KUMAR, M.; BABEL, A., 2011.** Available micronutrient status and their relationship with soil properties of Jhunjhunu Tehsil, District Jhunjhunu, Rajasthan, India. *Rev. Journal of Agricultural Science.* Vol. 3. N°2. 97-106 p.
- LADO, M., A. PAZ, AND M. BEN-HUR. 2004.** Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation and soil loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 935-942 p.
- LAL, R., 1988.** Soil erosion research methods Ankeny, Iowa, USA. Soil and Water Conservation Society, 1988. 244 p.
- LAL, R.; ELLIOT, W., 1994.** Erodibility and Erosivity. *Soil Erosion, Research Methods.* Second Edition. (By edited Lal, R.). 181-194 p.
- LOBO, D.; PULIDO, M., 2009.** Métodos e índices para evaluar la separabilidad estructural de los suelos. Universidad Central de Venezuela, facultad de agronomía, Instituto de Edafología. *Venesuelos* 14: 22-37 p.
- LOEPPERT, R. H., HALLMARK, C. T., KOSHY, M. M, 1984.** Routine procedure for rapid determination of soil carbonates. *Soil sci. Soc. Am. J.* 48:1030-1033 p.
- LOZANO, R.; LOBO, D.; PLÁ, I., 2002.** Susceptibilidad a la degradación física de Alfisoles de los Llanos centrales y occidentales de Venezuela. Instituto de adafología. Facultad de agronomía, Universidad de Venezuela. *Revista Facultad de agronomía (Maracay)* 28 (1).
- LUZIO, W.; CASANOVA, M.; VERA, V., 2006.** Génesis de suelos. pp: 21-41. In: *Avances en el conocimiento de los suelos de Chile.* Luzio, W. Y Casanova, M. (Eds.). Santiago – Chile. 393 p.

LUZIO, W.; CASANOVA, M.; SEGUEL, O., 2009a. Suelos de la zona desértica (desde 18° LS hasta 29° LS). pp: 39-80. In: Suelos de Chile. (Luzio, W., Editor). Universidad de Chile.

LUZIO, W.; CASANOVA, M.; SEGUEL, O., 2009b. Suelos de la Zona Mediterránea Húmeda (desde 37° 45'LS hasta 43°00'LS). Pp: 195-261 In: Suelos de Chile. (Luzio, W., Editor). Universidad de Chile.

LUZIO, W., 2010. Suelos de Chile. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 364 p.

MANZANAREZ P.; RAGGI, R.; GALLEGOS, A., 2001. Estabilidad estructural de suelo granítico (Alfisol) según sistema de uso y manejo. Departamento de Silvicultura, Facultad de ciencias Forestales, Universidad de Concepción. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal. Vol. 1, N°2. 34-41 p.

MCCOOL, D.; BROWN, L.; FOSTER, G., 1987. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, vol. 30, 1387-1396. p

MIDDLETON, H., 1930. Properties of soils which influence soil erosion. Technical bulletin 178. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. 2-3 p.

MITASOVA, H; HOFIERKA, J.; ZLOCHA, J.; IVERSON, L., 1995. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. In: International Journal of GIS. vol. 10, no. 5, 629-641 p.

MITCHELL, J., BUBENZER, G., 1980. Soil loss estimation. In M. J. Kirkby and R.P.C. Morgan [eds]. Soil erosion John Wiley and Sons London Eng. 17-62 p.

MORGAN, R.; DAVIDSON, D., 1986. Soil erosion and Conservation. Essex, G.B. Longman Scientific & technical, 298 p.

MORGAN, R., 1997. Erosión y Conservación del Suelo (2a. ed.). (P. Urbano y J. Urbano, Trads.). Madrid, España: Mundi-Prensa. (Trabajo original publicado en 1995).

NUNES, M. C. M. & CASSOL, E. A. 2008. Estimativa de erodibilidad en entresulcos de latosolos do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, n. spe, 2839-2845 p.

NUÑEZ, J., 2006. Manual de laboratorio de edafología. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. 14-15p.

OLIVARES, B.; LOBOS, D.; VERBIST, K., 2015. Aplicación del modelo USLE en parcelas de erosión bajo prácticas de conservación de suelos y aguas en San Pedro de Melipilla, Chile. Artículo de investigación. Revista de ciencia e ingeniería. Vol. 36. N°1, pp 3-10. ISSN 1316 – 7081. ISSN Elect 2244 – 8780 Universidad de los Andes (ULA).

O'GEEN, A.; ELKINS, R.; LEWIS, D., 2006. Reducing runoff from irrigated Lands: Erodibility of Agricultural Soils, with examples in Lake and Mendocino Counties. Division of Agriculture and Natural Resources, University of California. Publication 8194. 1-6 p.

OÑATE-VALDIVIESO, F. 2004. Metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y protección de proyectos hidráulicos. [En línea]. <http://www.fronate.pro.ec/fronate/wpcontent/media/2009/04/modeloerosion_hidrica.pdf>. [Consulta: 28 Mayo 2016].

OSPINA, A., 2009. Evaluación de la calidad física e hidrológica del suelo mediante el uso de indicadores bajo diferentes sistemas de manejo en Turén, edo Portuguesa. Trabajo de ascenso Asistente, Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela. 112 p.

OUYANG, D., 2002. Technical guide to Rusle factors: K factor. NRCS – USDA State office of Michigan. [En línea] <<http://www.iwr.msu.edu/rusle/kfactor.htm>>. [Consulta: 4 mayo 2017].

OYANEDEL, N., 1992. Métodos de análisis de suelos. Departamento de Silvicultura, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 12 – 21p.

OYARZÚN, C., 1993. Evaluación del modelo USLE para predecir pérdidas de suelo en áreas forestadas de la cuenca del río Bío Bío. Instituto de Geociencias, Universidad Austral de Chile, casilla 567, Valdivia, Chile. Bosque 14(1) 45-54 p.

- PAÉZ, M.; PLÁ, I., 1999.** Evaluación de la eficiencia de índices de erodabilidad en suelos agrícolas en Venezuela. Universidad Central de Venezuela. Revista Agronomía Tropical 42 (1 – 2): 27-40 p.
- PAGLIAI, M. 2003.** Soil surface sealing and crusting-soil compaction. En: College on Soil Physics. Trieste Italy. 24 p.
- PANAGOS, P.; MEUSBURGER, K.; BALLABIO, C.; BORELLI, P.; ALEWELL, C., 2014.** Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. En: Science of Total Environment 479 – 480 (2014) 189 -200 p.
- PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K., 2015.** A new European slope length and steepness factor (LS- factor) for modeling soil erosion by water. In: “Journal Geosciences”. ISSN 2076 – 3263. DOI: 10.3390. 117-126 p.
- PELTON, J.; FRAZIER, E.; PICKILINGIS, E., 2014.** Calculating slope length factor (LS) in the Revised Universal Soil Loss Equation (Rusle).
- PERALTA, M., 1976.** Uso, clasificación y conservación de suelos. Ministerio de Agricultura, Chile, 340 p.
- PERALTA, M., 1986.** Reconocimiento semi-detallado de suelos en el sector costero de la 45IV Región, mediante el uso de "land units". Tesis Ing. Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago, Chile 211 p.
- PHILLIPS, J., 1990.** Relative importance of factors influencing fluvial loss at the global scale. American Journal of Science 290, 547–68 p.
- PISCITELLI, M; VARNI., M; SFEIR, A; ARES, G., 2010.** Valores de erodabilidad (factor K-USLE) para suelos representativos de la cuenca alta del arroyo Azul (partido de Azul-Buenos Aires). Rev.Fac.Agron. Vol 109 (1): 17- 22 p.
- POCH, R; JACOVELLA, L.; USÓN, A., 2013.** Micromorfología de costras superficiales en suelos de viña en el Anoaia – Penedès: implicaciones en el manejo de suelos. Boletín de la Sociedad Española de la ciencia del Suelo, nº 2. 169 – 177 p.

- PORTA, J.; LÓPEZ-ACEVEDO, M.; ROQUERO, C. 1999.** Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2a edición. Ediciones Mundo-Prensa, Barcelona, España. 849 p.
- PULIDO, M.; LOBO, D.; LOZANO, Z., 2009.** Asociación entre indicadores de estabilidad estructural y la materia orgánica en suelos agrícolas de Venezuela. *Revista Agrociencia* 43: 221- 230 p.
- RAMÍREZ, F.; HINCAPIE, E.; SARDEGHIAN, S., 2009.** Erodabilidad de los suelos de la zona central cafetera del departamento de Caldas. *Cenicafé* 60 (1). 58 – 71 p.
- REJMAN, J.; USOWICZ, B.; DEBICKI, R., 1999.** Source of errors in predicting silt soil erodibility with USLE. *Polish Journal of Soil Science* 32: 13-22 p.
- RENARD, K.; FOSTER, G.; WEESIES, G.; MCCOOL, D.; YODER, D., 1997.** Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, *Agriculture Handbook*, N° 703, 404 p.
- REYES, W., 2014.** Procesos de compactación en un suelo vertisol bajo cuatro condiciones de manejo en la llanura de Coro, estado falcon, Venezuela. *Bioagro* 26 (1): 39 – 48 p.
- RITTER, J., 2012.** Soil erosion: Causes and effects. OMAFRA Factsheet. Order No. 12-053 p.
- RORKE, B., 2000.** Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. In: *Geomorphology* 32 (2000) 385 415 p.
- ROSEMBLOOM, N.; SCOTT, C.; SCHIMEL, D.; SCHIMEL, D., 2001.** Geomorphic evolution of soil texture and organic matter in eroding landscapes. *Rev. Global Biogeochemical cycles*. Vol. 15. N°2, 365-381 p.
- SADZAWKA, A., 2006.** Propiedades físico-químicas de los suelos. II: Adsorción e Intercambio iónico. pp: 129 – 157. In: *Avances en el conocimiento de los suelos de Chile*. Luzio, W. y Casanova, M. (Eds.). Santiago – Chile. 393 p.

- SADZAWKA, A.; CARRASCO, A.; GREZ, R.; MORA, M.L; FLORES, H; NEAMAN, A., 2006.** Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Instituto de investigaciones Agropecuarias, Series Actas INIA N°34, Santaigo, Chile, 164 p.
- SANDOVAL, M., DÖRNER, J., SEGUEL, O., CUEVAS, J., RIVERA, D., 2012.** Métodos de análisis físicos de suelos. Universidad de Concepción. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Chillán, Chile, número 5, 80 p.
- SANTIBÁÑEZ, F., GARCÍA, A., URIBE, J., FUENTE, A., FUSTER, R., 2000.** Suelos. In: Informe País, Estado del Medio Ambiente en Chile–1999. Universidad de Chile (ed). LOM Ediciones, Santiago, Chile. 203–244 p.
- SASTRE, P., 2010.** Sistemas de Información Geográfica (SIG). Técnicas básicas para el estudio de biodiversidad. Instituto Geológico y Mínero de España. 4 – 10 p.
- SEGUEL, O.; GARCÍA, V.; CASSANOVA, M., 2003.** Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. Agricultura técnica, Vol. 63, N°3. Valdivia, Chile.
- SINGH, M.; KHERA, K., 2008.** Soil erodability indices under different land uses in lower Shiwaliks. Department of soils, Punjab Agricultural University, Ludhiana 141010, Punjab, India. Society For Tropical Ecology. International Tropical ecology 49 (2): 113-119 p.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA (SSSA). 1984.** Glossary of Soil Science terms. SSSA. Madison. 38 p
- STADTMÜLLER, T., 1994.** Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales: medidas para mitigarlo. Informe Técnico CATIE, N° 240. 62 p.
- STOCKING, M. AND MURNAGHAN, N. 2000.** Land degradation - Guidelines for field assessment. UNU/UNEP/PLEC Working Paper. Norwich: Overseas Development Group, University of East Anglia. 120 p.
- SUÁREZ, F., 1979.** Conservación de Suelos. Instituto interamericano de ciencias agrícolas. San José, Costa Rica. 36 p.

- SUÁREZ, F.1980.** Conservación de suelos, 3a. edición. San José, Costa Rica. Editorial IICA. 315 p.
- SUÁREZ, V., 1998.** Características físicas de algunos suelos derivados de curvas volcánicas del departamento de Risaralda y su relación con la conservación Chinciná, Cenicafé. Avances técnicos Cenicafé N° 257. 8 p.
- THOMAS, G.; SOROKINA, D.; SCOTT ADAMS, 1997.** Siembra directa y la calidad del suelo. V Congreso Nacional AAPRESID, Mar de Plata, 201 – 229 p.
- TORRES, A.; ACEVEDO, E., 2008.** El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los valles de Lluta y Azapa en el norte de Chile. In: IDESIA (Chile). Vol. 26, N° 3, 31-44 p.
- UNAD, 2014.** Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. [En línea] <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/30160/leccin_24_ecuacin_universal_de_la_prdida_de_suelo.html>. [Consulta: 7 de Mayo 2014].
- UNESCO, 2009.** Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile. Roberto Pizarro, Carolina Morales, Leonardo Vega, Claudio Olivares, Rodrigo Valdés, Francisco Balocchi Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°18.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2014.** Revised Universal Soil Loss equation 1.06 – Current version. [En línea].<<http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5974>>. [Consulta: 25 Marzo 2014].
- UNIVERSIDAD DE BARCELONA, 2014.** Manual de SPSS, Análisis de datos. Capítulo 5. [En línea]. <http://www.ub.edu/aplica_infor/spss/cap5-6.htm>. [Consulta: 5 de agosto 2014].
- UNIVERSIDAD DE CHILE, 1997.** Diagnóstico de la desertificación en Chile. Corporación Nacional Forestal y Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile. 399 p.

- UNIVERSIDAD DE CHILE, 2016.** Climas de Chile. [En línea]. <
<http://www.uchile.cl/portal/presentacion/la-u-y-chile/acerca-de-chile/8086/climas-de-chile>>. [Consulta: 15 de mayo 2015].
- USDA, 1999.** Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Departamento de agricultura, Servicio de investigación agrícola. Servicio de conservación de recursos naturales. Instituto de calidad de suelos.
- VAN REMORTEL, R.; HAMILTON, M.; HICKEY, R., 2001.** Estimating the LS factor for Rusle through iterative slope length processing of digital elevation data withing Arcmap grid. *Cartography*, v. 30. N° 1. 27-35 p.
- WAKINDIKI, I.I.C.; M. BEN-HUR. 2002.** Soil mineralogy and texture effects on crust micromorphology, infiltration, and erosion. *S.S.S.A.J.* 66:897-905 p.
- WISCHMEIER, W.; JOHNSON, C.; CROSS, B., 1971.** A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites. *J. Soil and Water Conservation.* 26: 189-193 p.
- WISCHMEIER, W.; SMITH, D., 1978.** Prediction rainfall erosion losses a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook 537.* U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. 58 p.
- YOMA, R. 2003.** Evaluación física de la erosión en plantaciones de *Pinus radiata* D.Don en la Reserva Nacional Lago Peñuelas, V región. Período 1998-2001. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Silvoagropecuarias. Universidad Mayor. Santiago. Chile. 110 p.
- ZACHAR, D., 1982.** Soil erosion. *Developments in Soil Science* vol. 10. VEDA. Publishing house of the Slovak academy of Sciences, Bratislava. 165 p.
- ZINCK, J., 2012.** Geopedología: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. ITC, Faculty of Geo-Information Sciencie and Earth Observation. Enschede, The Netherlands. 123 p.

6. APÉNDICES

Apéndice I. Tasas de erosión

Cuadro 4: Cuartiles de tasa de erosión USLE con zonas geográficas.

N	Min	Max	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₃ – Q ₁
Zona Norte						
36	0.15	45.60	1.26	2.38	24.68	23.42
Zona Centro						
22	3.99	99.65	20.72	37.50	55.35	17.85
Zona Centro-sur						
31	0.04	134	0.46	4.13	25.68	5.22

Cuadro 5: Cuartiles de tasa de erosión USLE MODIFICADA con zonas geográficas.

N	Min	Max	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₃ – Q ₁
Zona Norte						
36	0.17	11.64	0.86	1.73	4.15	3.29
Zona Centro						
22	0.19	23.11	0.44	6.63	7.91	7.46
Zona Centro-sur						
31	0.07	44.02	0.32	1.58	4.57	4.25

Apéndice II. Factor topográfico *LS*

Cuadro 6: Correlación y coeficiente de determinación factor *LS* y tasas de erosión.

MODELO	N	r	p-value	R ²	p-value
Zona Norte					
USLE	36	0.80	2.5e ⁻⁹	0.71	1.0e ⁻¹⁰
USLE MODIFICADA	36	0.44	0.01	0.21	0.004
Zona Centro					
USLE	22	0.78	1.6e ⁻⁵	0.55	7.7e ⁻⁵
USLE MODIFICADA	22	0.80	7.5e ⁻⁶	0.83	3.1e ⁻⁹
Zona Centro-sur					
USLE	31	0.72	5.7e ⁻⁶	0.45	3.2e ⁻⁵
USLE MODIFICADA	31	0.47	0.001	0.28	0.002

Apéndice III. Factores de tasas de erosión

Cuadro 7: Correlación y coeficientes de determinación entre factores de USLE y tasas de erosión.

Factores	N	r	p-value	R ²	p-value
USLE					
LS	89	0.86	<2.2e ⁻¹⁶	0.65	<2.2e ⁻¹⁶
C	89	0.35	0.0009	0.04	0.06
K	89	0.31	0.004	0.17	7.8e ⁻⁵
P	89	0.32	0.003	0.07	0.02
R	89	-0.04	0.73	0.007	0.42
USLE MODIFICADA					
LS	89	0.53	7.1e ⁻⁸	0.35	1.4e ⁻⁹
C	89	0.29	0.007	0.002	0.71
K	89	0.27	0.01	0.12	0.0009
P	89	0.24	0.02	0.04	0.05
R	89	0.06	0.59	0.03	0.09

Apéndice IV. Índice de concordancia Kappa de Cohen en tasas de erosión.

Cuadro 8: Índice de concordancia entre USLE y Método de Campo Visual.

		USLE							
		1	2	3	4	5	6	7	Total
VISUAL	1	7	0	0	0	2	0	0	9
	2	8	0	4	3	1	0	1	17
	3	2	4	6	4	24	7	0	47
	4	1	4	1	3	2	0	0	11
	5	2	0	0	0	0	0	0	2
	6	0	0	2	0	0	0	0	2
	7	0	0	1	0	0	0	0	1
Total		20	8	14	10	29	7	1	89
Pr (A)		Pr (B)							K
0.18		0.15							0.04

Cuadro 9: Índice de concordancia entre USLE Modificada y Método de Campo Visual.

		USLE MODIFICADA							
		1	2	3	4	5	6	7	Total
VISUAL	1	7	0	1	1	0	0	0	9
	2	7	4	3	1	2	0	0	17
	3	11	5	10	17	4	0	0	47
	4	3	4	0	2	2	0	0	11
	5	0	2	0	0	0	0	0	2
	6	0	1	1	0	0	0	0	2
	7	0	1	0	0	0	0	0	1
Total		28	17	15	21	8	0	0	89
Pr (A)		Pr (B)						K	
0.26		0.19						0.09	

Apéndice V. Índices de erodabilidad

Cuadro 10: Correlación y coeficientes de determinación entre índice K e índices de erodabilidad.

Índices	N	r	p-value	R ²	p-value
Índice de erodabilidad K					
KB	89	0.06	0.56	0.01	0.37
ISP	89	-0.44	2.1e ⁻⁵	0.16	0.0001
ISE	89	-0.56	2.3e ⁻⁸	0.21	6.6e ⁻⁶
Zona Norte					
KB	36	-0.09	0.62	0.03	0.30
ISP	36	-0.22	0.19	0.01	0.43
ISE	36	-0.48	0.003	0.24	0.002
Zona Centro					
KB	22	-0.52	0.01	0.009	0.02
ISP	22	0.008	0.97	0.005	0.77
ISE	22	-0.60	0.003	0.37	0.003
Zona Centro-sur					
KB	31	0.04	0.84	0.01	0.52
ISP	31	-0.52	0.003	0.14	0.03
ISE	31	-0.49	0.005	0.11	0.06

Apéndice VI. Carbonatos e índices de erodabilidad y tasas de erosión.

Cuadro 11: Correlación y coeficientes de determinación entre contenido de carbonatos e índices y tasas de erosión.

Índices	N	r	p-value	R ²	p-value
<u>Carbonatos</u>					
KB	89	0.09	0.09	0.10	0.02
ISP	89	0.02	0.88	0.001	0.78
ISE	89	0.61	4.1e ⁻⁷	0.56	1.1e ⁻¹¹
K	89	-0.21	0.12	0.08	0.03
VISUAL	89	0.07	0.59	3.9e ⁻⁵	0.96
USLE	89	0.58	1.9e ⁻⁶	0.13	0.005
USLE MODIFICADA	89	0.25	0.06	0.13	0.005
<u>Zona Norte</u>					
KB	36	-0.22	0.19	0.002	0.41
ISP	36	0.09	0.60	0.003	0.75
ISE	36	0.26	0.13	0.006	0.66
K	36	-0.03	0.86	0.001	0.84
VISUAL	36	-	-	-	-
USLE	36	0.14	0.41	0.22	0.003
USLE MODIFICADA	36	0.19	0.28	0.0005	0.89
<u>Zona Centro</u>					
KB	22	0.01	0.54	0.10	0.15
ISP	22	-0.14	0.54	0.0004	0.93
ISE	22	0.81	4.6e ⁻⁶	0.76	9.1e ⁻⁸
K	22	-0.64	0.001	0.27	0.01
VISUAL	22	-	-	-	-
USLE	22	-0.23	0.31	0.05	0.34
USLE MODIFICADA	22	-0.19	0.39	0.03	0.02

Apéndice VII. Contenido de materia orgánica e índices de erodabilidad y tasa de erosión.

Cuadro 12: Correlación y coeficientes de determinación entre porcentaje de materia orgánica e índices y tasas de erosión.

Índices	N	r	p-value	R ²	p-value
% Materia orgánica					
KB	89	0.02	0.84	0.01	0.32
ISP	89	0.13	0.22	0.003	0.62
ISE	89	0.95	<2.2e ⁻¹⁶	0.58	<2.2e ⁻¹⁶
K	89	-0.36	0.0004	0.03	0.09
VISUAL	89	-0.21	0.047	1.0e ⁻⁶	0.99
USLE	89	0.02	0.84	0.005	0.03
USLE MODIFICADA	89	-0.009	0.93	0.20	1.1e ⁻⁵
Zona Norte					
KB	36	0.004	0.98	0.03	0.29
ISP	36	0.08	0.62	0.001	0.85
ISE	36	0.94	<2.2e ⁻¹⁶	0.93	2.2e ⁻¹⁶
K	36	-0.33	0.04	0.24	0.003
VISUAL	36	-0.07	0.67	0.038	0.25
USLE	36	-0.47	0.004	0.08	0.09
USLE MODIFICADA	36	-0.15	0.38	0.02	0.38
Zona Centro					
KB	22	0.68	0.0007	0.16	0.07
ISP	22	-0.44	0.04	0.19	0.04
ISE	22	0.95	3.9e ⁻⁶	0.80	2.4e ⁻⁸
K	22	-0.36	0.09	0.15	0.07
VISUAL	22	-	-	0.43	0.0008
USLE	22	-0.52	0.01	0.26	0.01
USLE MODIFICADA	22	-0.27	0.22	0.002	0.86
Zona Centro-sur					
KB	31	0.15	0.43	0.005	0.70
ISP	31	-0.21	0.25	0.04	0.27
ISE	31	0.86	4.6e ⁻⁵	0.41	9.2e ⁻⁷
K	31	-0.19	0.32	0.10	0.08
VISUAL	31	-0.37	0.04	0.009	0.62
USLE	31	0.32	0.07	0.46	3.1e ⁻⁵
USLE MODIFICADA	31	0.18	0.33	0.38	0.0002

Apéndice VIII. Efecto de porcentaje de materia orgánica en tasas de erosión.

Del apéndice VII, se desprende que de las tasas de erosión analizadas solo la *Pauta de campo* tuvo una correlación significativa, mientras que *USLE* Y *USLE* modificada presentaron coeficientes de determinación significativos. A pesar de que la correlación con la tasa de erosión visual sea baja, ésta resulta ser negativa y significativa y se puede explicar ya que las estimaciones de erosión presentes en la pauta, caracteriza y clasifica en base al porcentaje de cobertura vegetal y otros indicadores de erosión física, que se pueden atribuir a la escases de vegetación y por tanto al contenido de materia orgánica, pues esta pauta fue realizada con la finalidad de que pequeños agricultores puedan reconocer visualmente problemas de erosión de manera sencilla (Stocking y Murnaghan, 2000), por lo que su baja correlación se debe a que indirectamente se relaciona el contenido de materia orgánica en el suelo.

En cuanto a las tasas de erosión, *USLE* presentó correlaciones significativas a modo general, y en las zonas norte y centro, mientras que *USLE modificada*, solo presentó un ajuste de 0.36 en la zona centro – sur, lo cual concuerda con lo visto en análisis anteriores. Su negatividad resulta de la importancia que tiene la materia orgánica en la estabilidad del suelo que le proporciona mayor resistencia a la erosión, lo que implica a que un mayor contenido de materia orgánica, menores son las tasas de erosión (Oñate-Valdivieso, 2004), lo que se suma a que *USLE* considera otros factores relacionados a la estabilidad del suelo que están vinculados con la materia orgánica, como lo son la cobertura, el relieve, la erosividad y los componentes incluidos en el factor *K*, que es su conjunto influyen en el impacto erosivo que puede tener el suelo, y por tanto la erosión no depende exclusivamente de la materia orgánica (UNESCO, 2009).

Que *USLE* no haya presentado correlación significativa en la zona centro – sur, se puede explicar a la tendencia que tiene el índice *K* con el porcentaje de materia orgánica, puesto que al no considerar porcentajes de materia orgánica superiores a 4%, descarta la posibilidad de poder reflejar los niveles de erosión en la zona centro – sur, ya que esta zona registra contenidos de materia orgánica por sobre 4% (*i.e* la localidad de nacimiento presenta porcentaje de materia orgánica de 46%).

Apéndice IX. Cobertura vegetal en índices de erodabilidad.

Cuadro 13: Comparación entre presencia y ausencia de cobertura vegetal en índices de erodabilidad.

Índices	Medianas		Chi ²	Df	p-value
	C	S			
KB	7.83	6.61	1.78	1	0.18
ISP	0.20	0.22	0.21	1	0.65
ISE	2.64	0.82	8.32	1	0.004
K	0.03	0.03	3.33	1	0.07
VISUAL	3.5	3.5	0.72	1	0.40
USLE	5.12	5.40	0.35	1	0.55
USLE MODIFICADA	2.00	2.22	0.45	1	0.50

Apéndice X. Efecto de cobertura vegetal en tasas de erosión.

La comparación entre suelos descubiertos y suelos bajo cobertura vegetal en las tasas de erosión *USLE* y *USLE modificada*, no fueron significativas. No obstante, se aprecia que suelos bajo cubierta vegetal presentan menores tasas de erosión que suelos descubiertos en ambos índices, lo cual se atribuye a que estos incorporan el factor cobertura, junto con otros componentes que están directa e indirectamente relacionados con ella, como lo son el factor topográfico, las prácticas de conservación de suelo, el factor de erosividad y el índice de erodabilidad *K*. De esta manera, la interacción entre todos los componentes, permite determinar las tasas de erosión de los sitios en estudio.

Dado lo anterior, se desprende que el factor de cobertura por sí sólo, no causa diferencias significativas entre suelos con y sin cobertura vegetal, considerando que las muestras de suelos, - con y sin cobertura -, fueron tomadas a una distancia aproximada de 50 metros, lo cual no refleja grandes cambios físicos a nivel de sitio. Oyarzún (1993) expuso conclusiones similares en su trabajo sobre medición de tasas de erosión con diferentes tratamientos post-cosecha de *Pinus radiata*, explicando que las diferencias significativas entre tasas de erosión de diferentes tratamientos de cobertura post-cosecha, sólo se pueden establecer cuando éstos se determinan en sitios con características topográficas distintas.

Apéndice XI. Efecto de carbonatos en texturas.

En la determinación de la distribución del tamaño de partículas, se comparó la textura con y sin eliminación de carbonatos, para ver el efecto de este agente cementante en las clases texturales de los suelos en estudio de las zona norte y centro, esto debido a que zonas con condiciones climáticas áridas y semi-áridas contienen importantes concentraciones de carbonatos y otras sales (Torres y Acevedo, 2008; Kumar y Babel, 2011), por causa de escasas de precipitaciones, pues el exceso de agua produce lixiviación de estos componentes solubles, - como Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y Mg^{+} -, transportándolos a través del perfil de suelo o eliminándolos completamente (Luzio *et al.*, 2009a).

La zona centro se consideró, ya que se ha evidenciado suelos con contenido de carbonatos de calcio a nivel de matriz y aún más en horizontes superficiales, por causa de aguas de riego (Luzio *et al.*, 2009b). En la Figura 11, se muestra un gráfico textural comparativo, y en el se aprecia que la mayoría de las muestras de suelo con carbonato de calcio, se concentran en las clases texturales franco arenosa y areno arcillosa, existiendo un ligero cambio en las texturas al eliminar a este agente, pues aumenta las muestras concentradas en la clases texturales Franca arenoso (12.07%) y Franca arcillo arenoso (1.72%) y disminuye la concentración de muestras en la clase textural Franca (5.17%).

Lo anterior, indica que los carbonatos sí modifican las clases texturales del suelo, concordando ello, con lo expuesto por Flores y Alcalá (s.a.), quienes indican que la presencia de carbonatos en las muestras de suelo, puede influir en la determinación de la distribución del tamaño de partículas, debido a que puede generar agregación, lo que conlleva a una mala dispersión de las partículas, presentando problemas en la cuantificación de limos y arcillas. Esto último, es muy relevante, ya que la determinación de la distribución del tamaño de partículas, es fundamental en la determinación de la estabilidad de agregados, en las tasas de infiltración, arrastre y erosión (Lobo y Pulido, 2009), y por tanto analizar la presencia y ausencia de este elemento permite ver la influencia e importancia que tiene en la estimación de procesos erosivos.

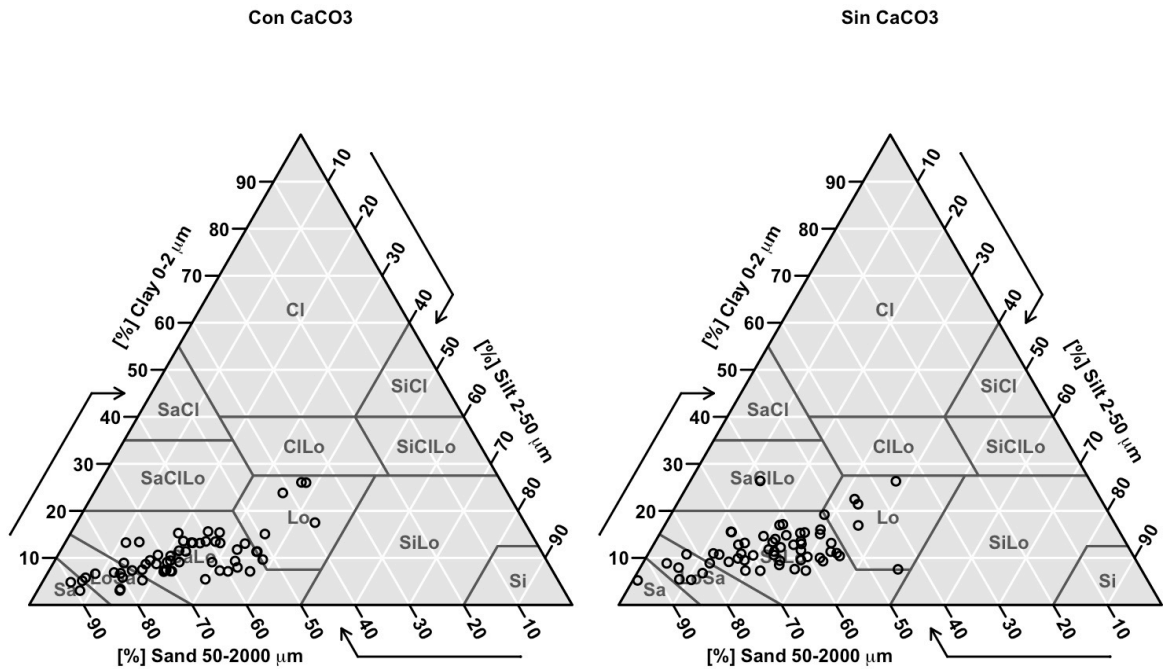


Figura 11: Comparación de texturas con y sin presencia de carbonatos.

Sa:arenoso; LoSa: franco arenosa; SaLo: areno franco; SaCILo: franco arcillo arenoso; Lo: franca; SiLo: franco limoso; Si: limoso; SaCl: arcillo arenosa; CLo: franco arcilloso; SiCILo: franco arcillo limoso; Cl: arcilloso; SiCl:arcillo limoso.

Apéndice XII. Efecto de materia orgánica en textura.

La materia orgánica ayuda a mantener a las partículas minerales unidas frente a fuentes desestabilizadoras, pues los compuestos de ésta, enlazan física y químicamente a las partículas primarias de los agregados, siendo por tanto un agente cementante de importancia para la formación de agregados estables al agua, mejorando la capacidad de absorción y retención de ésta (Kirkby y Morgan, 1991; Porta *et al.*, 1999; Casanova *et al.*, 2006).

Dado que es considerada como un agente cementante que presenta una estrecha asociación con las arcillas (Casanova *et al.*, 2004), ésta puede distorsionar la distribución del tamaño de partículas. Por lo anterior, se comparó la textura con presencia y ausencia de materia orgánica (Figura 12); como primera impresión se aprecia una mayor concentración en texturas franco arenosas, sin embargo al eliminar el contenido de materia orgánica a las muestras de suelo, se produce un cambio notorio en las clases texturales, concentrándose más en texturas Franco arcillo arenoso (15.51%), y Franco arcilloso (8.89%). Asimismo, aumentaron las texturas Arcillosas (4.45%) y al igual que las Arcillo arenosa y Franco

limoso en 2.22%, mientras que disminuyeron considerablemente las clases texturales Arena arcillosa (15.56%), Franco arenoso y arenosa (6.67%) y Franca (4.45%), lo que demuestra que la materia orgánica ejerce una fuerte influencia en la distribución del tamaño de partículas, y que es una propiedad muy importante en la susceptibilidad que puede presentar un suelo a la erosión.

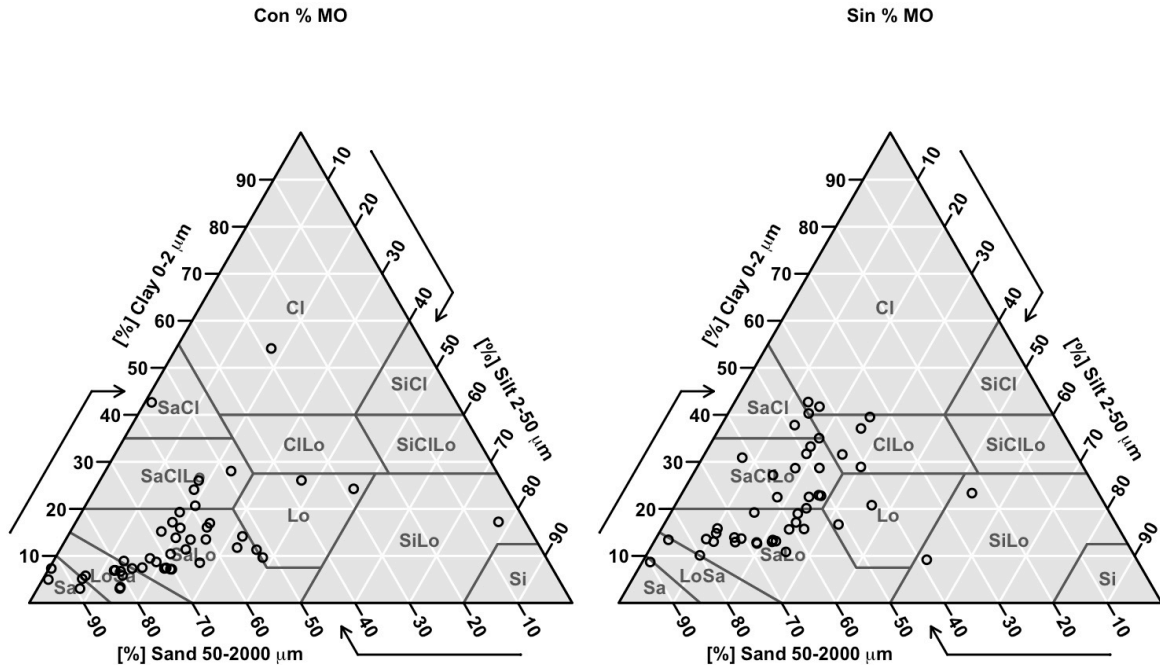


Figura 12: Comparación de texturas con y sin presencia contenido de materia orgánica. Sa:arenoso; LoSa: franco arenosa; SaLo: areno franco; SaCILo: franco arcillo arenoso; Lo: franca; SiLo: franco limoso; Si: limoso; SaCl: arcillo arenosa; CILo: franco arcilloso; SiCILo: franco arcillo limoso; Cl: arcilloso; SiCl:arcillo limoso.

Apéndice XIII.Texturas según zona geográfica.

La Figura 13 muestra las clases texturales según zona geográfica estudiada, en ella se puede apreciar que en la zona norte y zona centro predominan los suelos arenosos, areno arcillosa y franco arenosa, encontrándose en algunos sectores de la zona norte, clases texturales Francas, mientras que en la zona centro – sur, predominan las clases texturales Franco arenoso y Franco arcillo arenoso, existiendo en algunos sectores texturas Arena arcillosa y Arenosa, y menor concentración texturas Arcillo arenosa y Arcillas. Lo anterior concuerda con lo descrito por Luzio *et al.* (2009), donde menciona que suelos pertenecientes a las zonas semi-áridas del país, presentan clases texturales Arenosas, Areno francosa y en algunos casos Franca. Del mismo modo, Luzio *et al.* (2009) describe que en la zona centro

las clases texturales varían entre franca a franco arcillo limosa, y sectores precordilleranos también es posible encontrar clases texturales Francas y Franca arenosa.

El mismo autor menciona que en la zona centro – sur, es posible encontrar clases texturales Franco arenosa hasta Franco arcillo limosa. Ahora bien al realizar un análisis sobre la granulometría del suelo y su susceptibilidad a la erosión según las zonas descritas, se obtiene que tanto la zona norte como zona centro, son más susceptibles a la erosión en comparación a la zona centro – sur, ya que según lo descrito por Oñate-Valdivieso (2004) los suelos más arenosos producen aumentos significativos en la erodabilidad del suelo; asimismo Huang *et al.* (2013) mencionan en sus estudios de índices de erodabilidad de suelos, que entre mayor sea el tamaño de partícula del suelo, mayor será la erodabilidad de éste, sin embargo la erosión puede ser menor ya que involucra otros factores como cobertura vegetal y erosividad.

Por su parte, Nunes y Cassol (2008) exponen que los suelos con mayor contenido de arcilla tienden a presentar menor erodabilidad, lo que coincide con trabajos realizados por Gámez (2008), los cuales obtuvieron que suelos Franco arcillo limoso son más susceptibles a erosión hídrica, - atribuyéndose al alto porcentaje de limo que presentan -, en comparación a suelos Franco arenoso y Arcilloso, puesto que las arcillas tiene una fuerte cohesión de sus partículas, proporcionando mayor resistencia al suelo. Esto se relaciona muy bien con los resultados de las tasas de erosión estimadas para cada zona de este estudio, pues según *USLE* y *USLE modificada* la zona centro – sur, presenta menores tasas de erosión en comparación a las otras dos zonas.

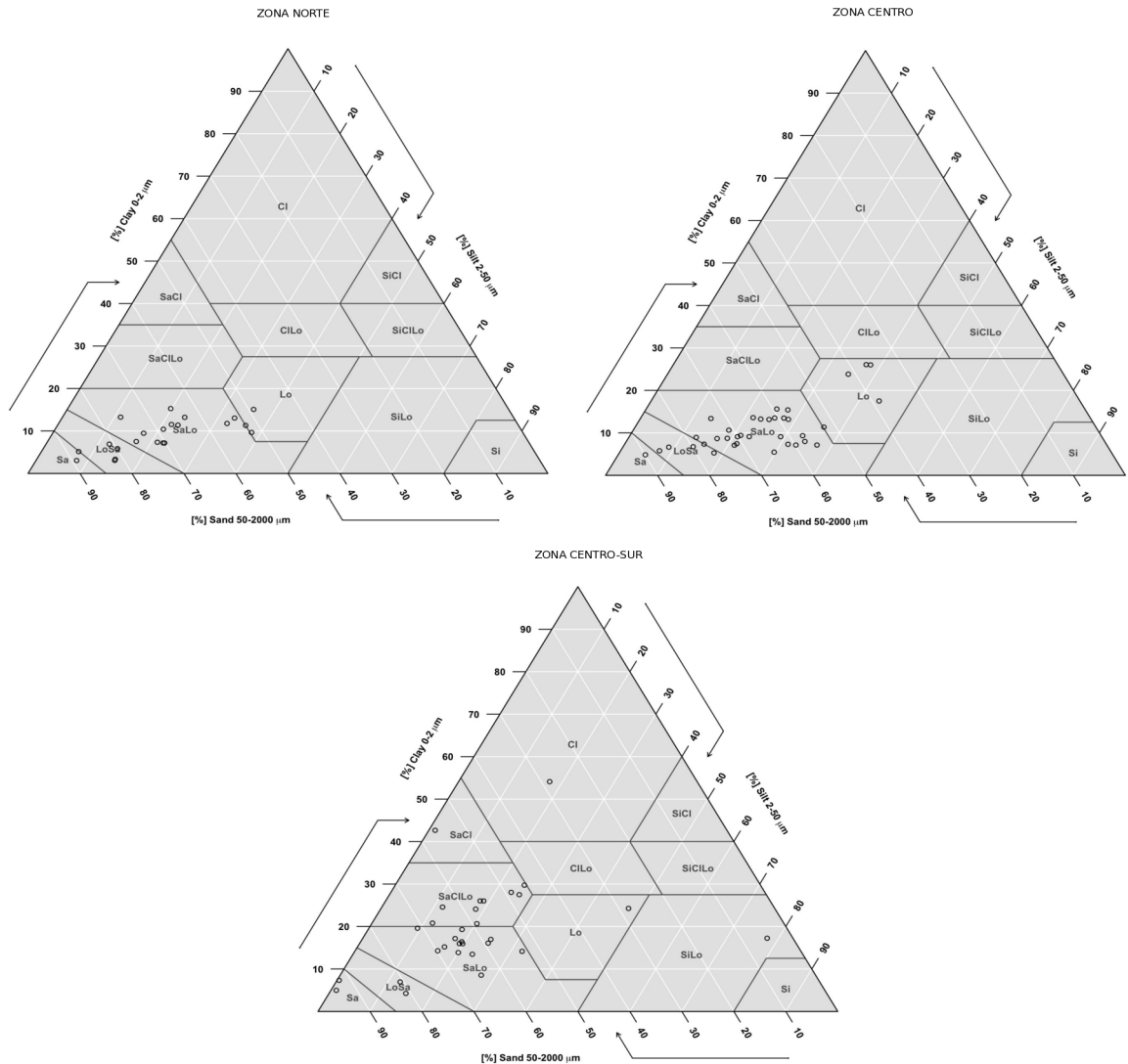


Figura 13: Comparación de texturas según zonas geográficas.

Sa:arenoso; LoSa: franco arenosa; SaLo: areno franco; SaCILo: franco arcillo arenoso; Lo: franca; SiLo: franco limoso; Si: limoso; SaCl: arcillo arenosa; ClLo: franco arcilloso; SiClLo: franco arcillo limoso; Cl: arcilloso; SiCl:arcillo limoso. LOM: lomaje; PM: piedmont; VI: valle intermontano.

Apéndice XIV. Texturas según geomorfología.

De acuerdo a las Figuras 14.A y 14.B, se puede apreciar las clases texturales según la clasificación de geofomas analizadas. En la Figura 14.A se visualiza que en conos aluviales (CA), existe una mayor concentración de clases texturales Franco arenosa, Areno

Franco y Arenosa. En cimas de cerro (CC) predominan las clases texturales Franco arcillo arenosa, seguida de Franco arenosa, Areno franco y Arenosa, mientras que en laderas de cerro (LC), las clases texturales fluctúan entre Areno franco y Franco. En llanuras aluviales (LLA) es posible encontrar texturas Franco arenosa y Areno franco y en menor proporción texturas Francas. En quebradas (QUE), la clase textural se concentra en Areno franco y mientras que en terrazas marinas (TM) se concentran en texturas Arenosas.

En la Figura 14.B encontramos las geoformas de lomaje (LOM) en la que predominan las clases texturales Areno franco y Franco arcillo arenosa, encontrándose además, texturas Franco arenosa y Areno arcillosa. En piedmont (PM) las clases texturales se concentran en Areno franco, seguido de Franco arenoso, existiendo algunas texturas Francas y Arenosas. Finalmente en valles intermontano (VI), las clases texturales fluctúan entre Areno franco, Franco arenosa y Franco arcillo arenoso.

Lo anterior, concuerda con lo descrito por Luzio *et al.* (2009) en su libro suelos de Chile, en el cual describe que suelos desarrollados en posición de abánicos aluviales, presenta texturas, - en su horizonte superficial -, generalmente Areno francosa y en algunos casos Franco. En texturas en posición de cerro varían entre Franco arcillo arenosa, Arenoso, Aranco arcilloso y Arcillosa en sectores más húmedos; mientras que en posición piedmont las clases texturales varían de Areno franco, Franco arenosa, Franco arcillo arenosa, Franco arcillo limoso, Franco arcilloso y Arcilloso. Por otro lado, en posición de lomajes es posible encontrar clases texturales Franco arenosa, Franco arcillosa, areno Franco, Franco arenoso, Franco limoso y Franco arcillo limoso. Además describe en posición de terrazas pertenecientes a sectores costeros, es posible encontrar texturas gruesas, Arenosas, Areno francosa y Franco arenosa.

Al analizar la relación entre las clases texturales y las geoformas, se debe considerar que existen otros factores, - como la pendiente y precipitaciones -, que influyen en las propiedades físicas y químicas del suelo (Dengiz *et al.*, 2007), y que en definitiva determinan la composición granulométrica de éstas, y con ello su susceptibilidad a la erosión; Rosembloom *et al.* (2007) describe que la erosión en geoformas con algún grado inclinación, genera una redistribución de las propiedades físicas y químicas del suelo, el tamaño de partículas y el carbono orgánico, los cuales disminuyen a lo largo de la pendiente, concentrándose en fondos de valle. Asimismo Kreznor *et al.* (1989) y Dengiz *et al.* (2007) comprobaron en sus estudios que la inclinación y el largo de la pendiente influyen en la velocidad del flujo de agua y en el movimiento de masas, lo que genera el transporte de arcillas y materia orgánica que decrecen pendiente abajo, mientras que el porcentaje de limo, arena y carbonatos aumenta, concluyendo que la distribución del tamaño de partículas y otras propiedades del suelo, dependen de la pendiente y de otros atributos como lo son la vegetación, fragmentos rocosos y clima que modelan el paisaje e interactúan en los procesos erosivos (Renard *et al.*, 1997).

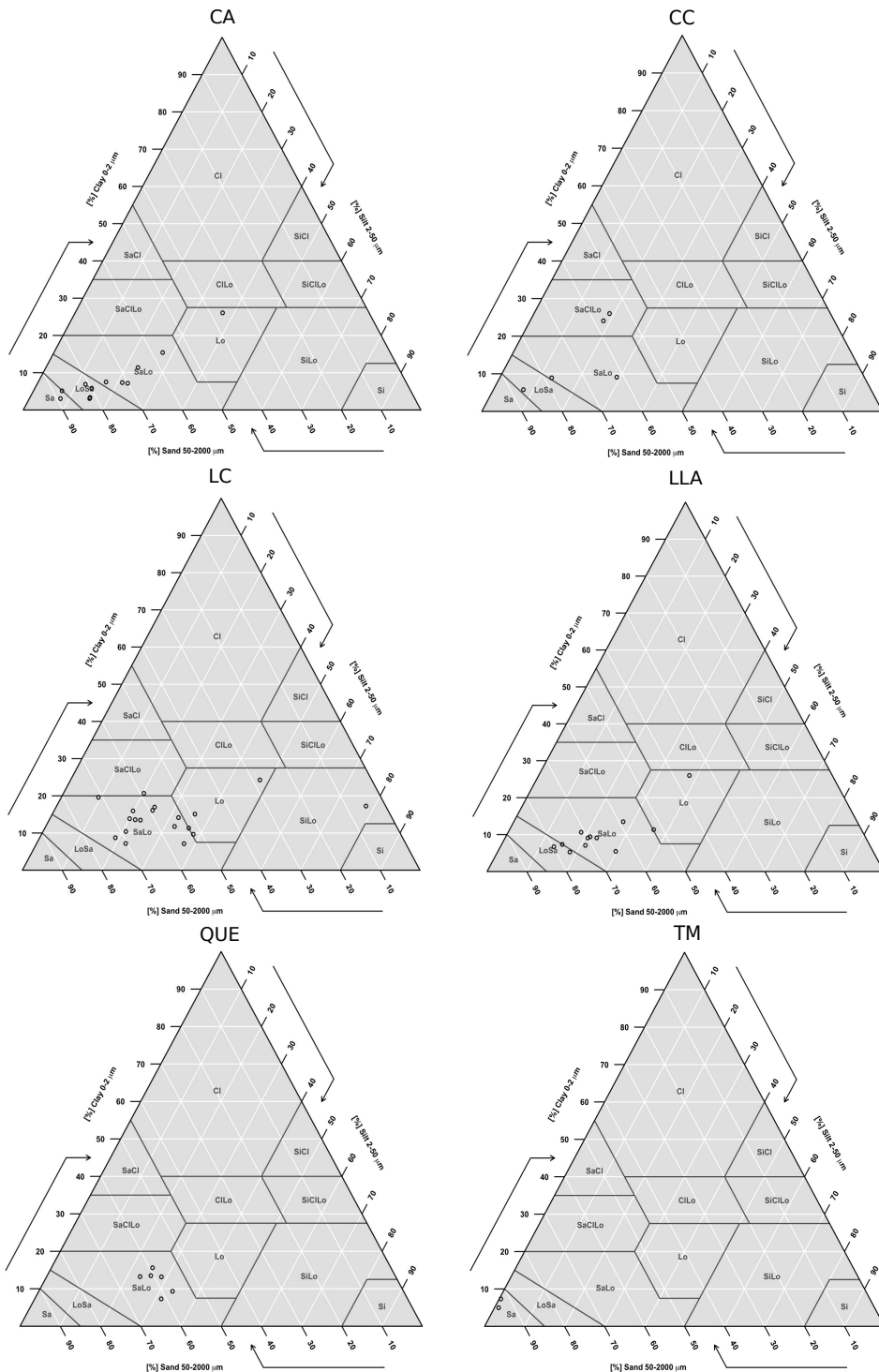


Figura 14.A: Comparación de texturas según geoformas.

Sa:arenoso; LoSa: franco arenosa; SaLo: areno franco; SaClLo: franco arcillo arenoso; Lo: franca; SiLo: franco limoso; Si: limoso; SaCl: arcillo arenosa; ClLo: franco arcilloso; SiClLo: franco arcillo limoso; Cl: arcilloso; SiCl:arcillo limoso. CA: cono aluvia; CC: cima de cerro; LC: ladera de cerro; LLA: llanura aluvial; QUE: quebrada; TM: terraza marina.

Por lo tanto es de esperar que aquellas geofomas con mayor contenido de partículas gruesas en sus clases texturales, sean afectadas por procesos erosivos condicionados por diversos factores del paisaje, como lo es una alta inclinación de pendiente que se relaciona con características de conos aluviales, piedmont, quebradas y laderas de cerro, mientras que aquellas que presentan pendientes suaves, - cima de cerro, valles intermontano, lomajes, entre otros -, que presentan texturas con mayor contenido de arcillas y materia orgánica, sean menos susceptible a la erosión.

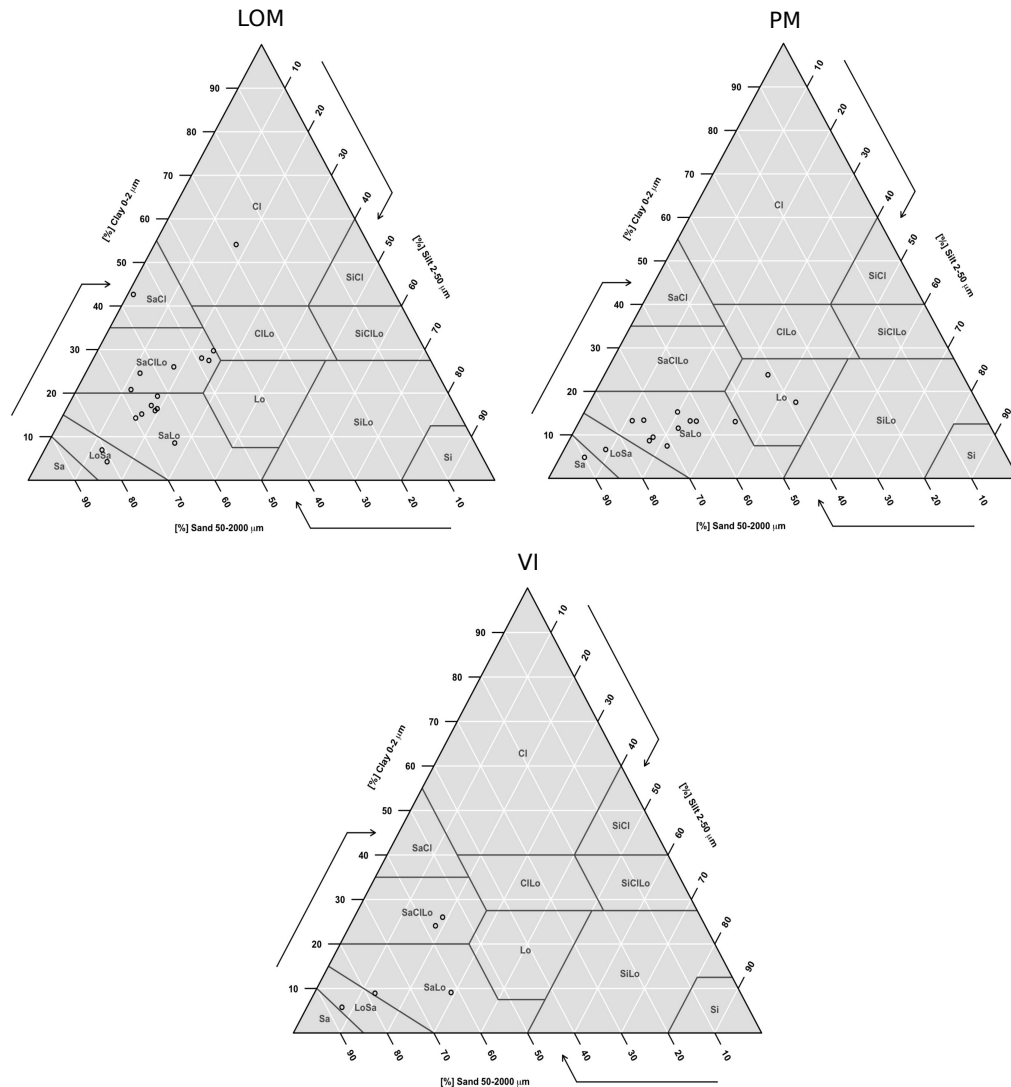


Figura 14. B: Comparación de texturas según geofomas.
 Sa:arenoso; LoSa: franco arenosa; SaLo: areno franco; SaClLo: franco arcillo arenoso; Lo: franca; SiLo: franco limoso; Si: limoso; SaCl: arcillo arenosa; ClLo: franco arcilloso; SiClLo: franco arcillo limoso; Cl: arcilloso; SiCl:arcillo limoso. LOM: lomaje; PM: piedmont; VI: valle intermontano.

Apéndice XV. Relación de índice de erodabilidad K con índices *relación mecánica de Bouyoucos* (KB) e *índice de separabilidad de partículas* (ISP).

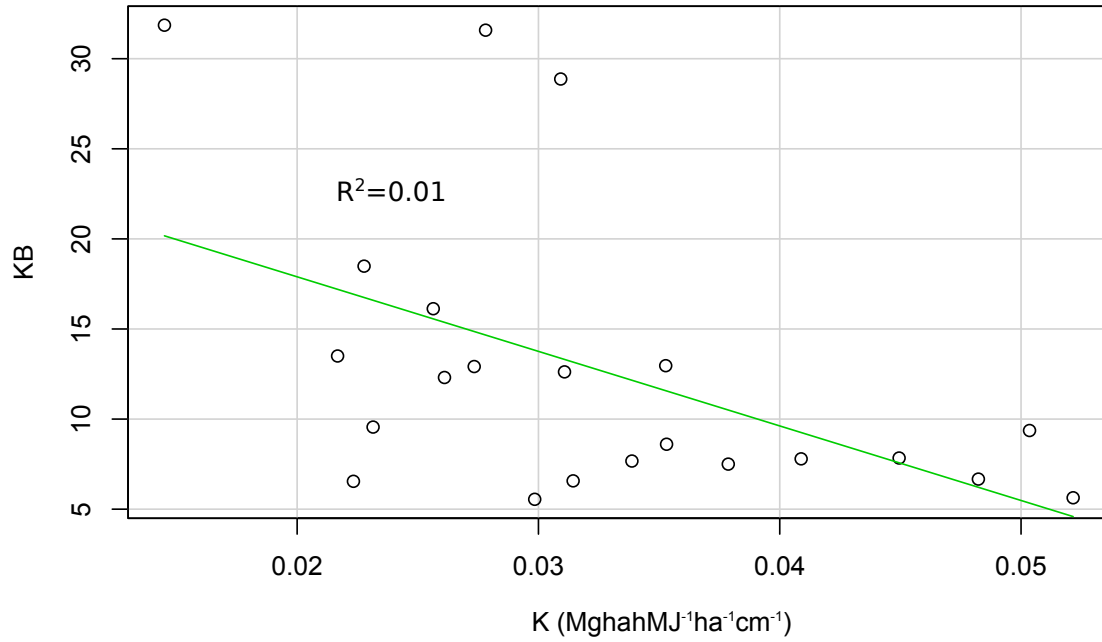


Figura 15: Relación entre el índice de erodabilidad K y *relación mecánica de Bouyoucos* en zona centro.

KB : Relación mecánica de Bouyoucos; K : índice de erodabilidad de la *USLE*.

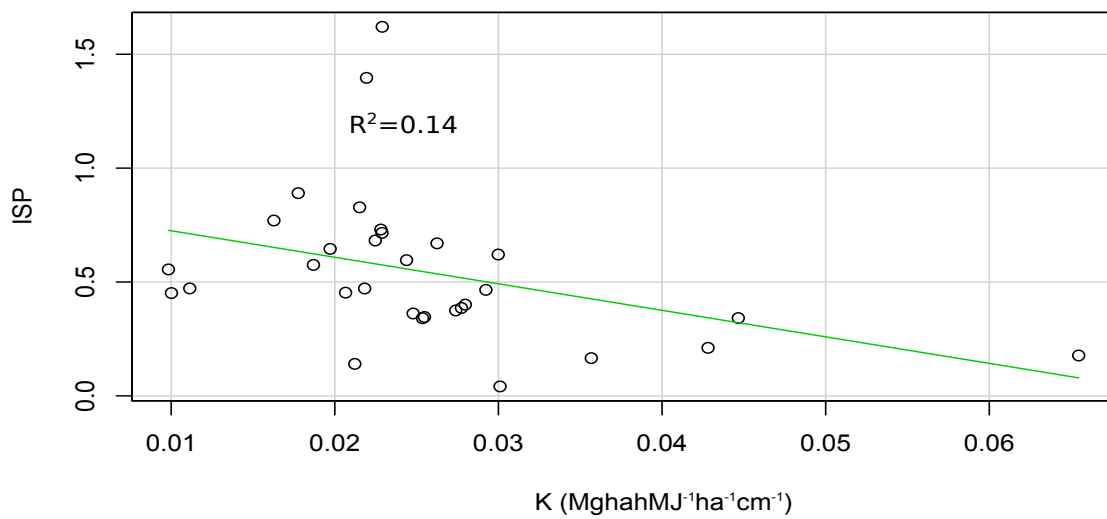


Figura 16: Relación entre índices de erodabilidad en zona centro-sur.

ISP : Índice de separabilidad de partículas; K : índice de erodabilidad de la *USLE*.

Apéndice XVI. Propiedades edáficas según zonas geográficas.

Cuadro 14: Valores medios de las propiedades edáficas determinadas con su desviación estándar.

Propiedades edáficas de las zonas de estudio

	Arena fina	Arenamuy fina	Arena	Limo	Arcilla	MO
ZN	18.89 (7.69)	17.50 (7.91)	64.50 (13.11)	24.44 (9.38)	11.06 (5.42)	3.85 (4.08)
ZC	17.20 (4.31)	12.57 (5.99)	69.52 (11.68)	21.31 (9.06)	9.18 (3.77)	10.82 (7.24)
ZCS	12.36 (4.72)	6.90 (4.27)	60.04 (17.53)	20.41(14.01)	19.55(10.34)	11.56 (9.91)

7. ANEXO

Anexo I. Caracterización de áreas de muestreo.

Cuadro 15: Áreas de muestreo y algunas características principales de éstas.

Localidad	Ubicación UTM WGS 1984	Geología ⁵	Geomorfología general	Unidades geomorfológicas (sectores)	Uso de la tierra	Tipo de suelo
<u>Zona Norte</u>						
Vallenar	322780/ 6821857	Kiag.	Cordillera de la Costa	Laderas, fondo de quebrada, quebrada y pie de monte.	Formaciones vegetales xerófitas, matorral de <i>Encelia canescens</i> , <i>Heliotropium myosotifolium</i> , matorral con suculentas de <i>Balbisia peduncularis</i> , <i>Encelia canescen</i> , <i>Heliotropium sinuatum</i> – <i>Adesmia argentea</i> .	Aridisoles, poco evolucionados, poco a moderadamente profundos, los cuales generalmente derivan de sedimentos gruesos de tipo fluvial ⁶ .
	323318/ 6822780					
	323840/ 6821907					
	324083/ 6825279					
	323990/ 6824820					
	323543/ 6823575					
P.N Fray Jorge	242670/ 6606951	Dc4.	Cordillera de la Costa.	Laderas, quebrada y pie de monte.	Especies arbustivas esclerófilas, bosque de olivillo y petrillo,	Formados a partir de material granítico, delgado a moderadamente profundo, alto contenido de arcilla (40%), francos a franco arcillosos, con alto contenido de materia orgánica (3%) sobre la superficie ⁷ .
	244918/ 6606734					
	244924/ 6606742					
	245790/ 6607131					
	245796/ 6607133					

⁵Sernageomin, 2000. Kiag: cretácico inferior alto - cretácico superior bajo (123-85Ma), roca intrusiva; Dc4: devónico - carbonífero, roca metamórfica; Qa: pleistoceno - holoceno, secuencias sedimentarias; Ki2c: cretácico inferior - cretácico superior, secuencias volcano - sedimentarias; Q1: pleistoceno - holoceno, secuencias sedimentarias; OM2c: oligoceno - mioceno, secuencias volcano - sedimentarias; Cpg: carbonífero - pérmico (328-235 Ma), rocas intrusivas; Ks1m: cretácico superior, secuencias sedimentarias; Pz4b: silúrico - carbonífero, roca metamórfica; Qm: pleistoceno - holoceno, secuencias sedimentarias.

⁶Luzio, W., 2010. Suelos de Chile, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 364 p

⁷Peralta, M., 1986. Reconocimiento semi-detallado de suelos en el sector costero de la 45IV Región, mediante el uso de "land units". Tesis Ing. Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago, Chile 211 p.

Continuación Anexo I.

Localidad	Ubicación UTM WGS 1984	Geología	Geomorfología general	Unidades geomorfológicas (sectores)	Uso de la tierra	Tipo de suelo
Las Cardas	282939/ 6651400	Qa.	Llanos de sedimentación fluvial.	Terraza fluvial.	Plantaciones de especies exóticas, <i>Eucalytus camandulensis</i> , <i>E. cadoclalix</i> , <i>Lucuma valparadisea</i> , <i>Prosopis chilensis</i> , <i>Cordia decandra</i> .	Suelos derivados de rocas graníticas, estructura bloques angulares y subangulares débiles, textura franco arenosa, buen drenaje y poca profundidad. Sustrato compactado y cementado con sílice y manganeso ⁸ .
	282930/ 6651472					
	282938/ 6651476					
	282882/ 6651529					
	271902/ 6680416					
El Sauce	297494/ 6560505	Ki2c y Kiag.	Valle interior.	Laderas.	Plantaciones de Q. saponaria, Acacia capensis, Schinus molle, Acacia caven, P. chilensis.	Textura arcillosa a franco arcillosa, bloques subangulares medios y gruesos fuertes y a veces prismática.
	297412/ 6560565					
	282938/ 6651402					

⁸Cepeda, J., 1989. Actividad temporal de tenebriónidos epígeos (Coleoptera) y su relación con la vegetación arbustiva en un ecosistema árido de Chile. Departamento de Biología y Química. Universidad de la Serena. Revista chilena de Historia Natural. 62: 115-125.

Continuación Anexo I.

Localidad	Ubicación UTM WGS 1984	Geología	Geomorfología general	Unidades geomorfológicas (sectores)	Uso de la tierra	Tipo de suelo
<u>Zona Central</u>						
Camino internacional (provincia Los Andes)	359723/ 6363855 359606/ 6363903 359673/ 6363899	Q1.	Pre-Cordillera de los Andes.	Laderas.	Bosque nativo esclerófilo	Suelo originados a partir de sedimentos moderadamente profundo, textura franca a franca limosa, entre 30 a 40 cm de profundidad presenta estratas de gravillas y gravas angulares y redondeadas, permeabilidad rápida y bien drenado ⁹ .
Catemu	313684/ 6372816 313682/ 6372826 313675/ 6372812 314332/ 6373327 314344/ 6373302 314336/ 6373340	Q1.	Valle interior.	Laderas y terrazas fluvial.	Especies arbustivas de <i>Porlieria chilensis</i>	Mollisoles de desarrollo moderado; pedregosidad superficial moderada a libre de ella, generalmente tiene buen drenaje pero puede variar de moderado a imperfecto; textura de franca a franca arenosa, bloques subangulares medios a finos, moderados a débiles ⁶ .
Cantalao	359548/ 6295746 359656/ 6295760	OM2c.	Pre-Cordillera de los Andes.	Quebradas.	Bosque de <i>Q. Saponaria</i>	Fragmentos angulares, textura franca a franca arcillo limosa, buen drenaje ⁶ .

⁹CIREN, 1997. Descripciones de suelos, materiales y símbolos: Estudio agrológico V región. Publicación n°116, Santiago, Chile.. 366 p.

Continuación Anexo I

Localidad	Ubicación UTM WGS 1984	Geología	Geomorfología general	Unidades geomorfológicas (sectores)	Uso de la tierra	Tipo de suelo
Zona Centro-Sur						
Constitución	722077/ 6041915 745334/ 6072360 745369/ 6072351 745437/ 6072474 761907/ 6059700 762279/ 6059296 762699/ 6059164	Cpg, Ks1m y Pz4b.	Cordillera de la Costa y planicies litorales.	Laderas, pie de montes y terrazas marinas.	Plantaciones de <i>Pinus radiata</i> , <i>E. globulus</i> , bosques de <i>Nothofagus glauca</i> .	Textura franco arcillo arenoso, franco arcillosa y arcillosa, bloques subangulares medios y gruesos fuertes, buen drenaje ¹⁰ .
Camino a Quillón	703105/ 5921899 716525/ 5929509	Cpg.	Depresión Intermedia.	Laderas.	Plantaciones de <i>P. radiata</i>	Textura franco limosa, franco arcillosa, franco arenosa, franca, areno francosa, arcillo limosa, franco arenosa muy fina, bloques subangulares finos, medios y gruesos desde débiles hasta fuertes, bien drenados ⁷ .

¹⁰Del Pozo, A.; Del Canto, P., 1999. Áreas agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII regiones. Serie Quilamapu N° 113. INIA Quilamapu. Ministerio de Agricultura. Chillán, Chile; Peralta, M., 1976. Uso, clasificación y conservación de suelos. Ministerio de Agricultura, Chile, 340p.

Continuación Anexo I

Localidad	Ubicación UTM WGS 1984	Geología	Geomorfología general	Unidades geomorfológicas (sectores)	Uso de la tierra	Tipo de suelo
Talcahuano	668532/ 5931605 694024/ 5852900 668559/ 5931696 663373/ 5926075 664455/ 5926075 664452/ 5926078 664885/ 5926603 664931/ 5926547	Qm.	Planicies Litorales.	Laderas.	Plantaciones de <i>P. radiata</i> junto a <i>Acacia</i> <i>dealbata</i> .	Bloques subangulares finos, medios y gruesos, textura variable tales como franco limosa, franco arcillosa, arenosa, franca, areno francosa, arcillo limosa y franco arenosa muy fina ⁷ .
Concepción	674327/ 5921312	Cpg.	Llanos de sedimentación fluvial.	Laderas.	Plantaciones de <i>P. radiata</i> junto a <i>Acacia</i> <i>dealbata</i> , <i>E.</i> <i>globulus</i>	textura variable tales como areno francosa, franco arenosa, franco limosa, y franco arcillo limosa, drenaje libre, bloques subangulares de tamaños variables ¹¹
Nacimiento	693719/ 5852993 693720/ 5853021 693944/ 5852940 694024/ 5852900 694024/ 5852875	Cpg.	Cordillera de la Costa.	Laderas.	Bosque nativo de <i>Q.saponaria</i> , <i>Peumus</i> <i>boldus</i> , <i>Cryptocarya</i> <i>alba</i> .	Roca metamórfica, bloques subangulares medios fuertes, clase textural fina a muy fina ⁸ .

¹¹ Luzio, W.; Casanova, M.; Seguel, O., 2009. Suelos de la Zona Mediterránea Húmeda (desde 37° 45'LS hasta 43°00'LS). Pp: 195-261 In: Suelos de Chile. (Luzio, W., Editor). Universidad de Chile.

Anexo II.Pautas de evaluación de campo.

Cuadro 16:Indicador de acuerdo al tiempo de ocurrencia (Casanova, 2008)

Indicador de erosión	Descripción breve	Clas e ^a
Pedestales	Describe cráteres creados por las gotas de lluvia y columnas de suelo protegidas por piedras, raíces o residuos de cultivo. Se encuentra bajo y alejados de las canopias.	A
Lavado superficial	Marcado por la escorrentía que lleva a superficies suavizadas en la dirección del flujo.	A
Canalículos	Canales continuos o discontinuos, desarrollados después de lluvias intensivas.	A
Raíces expuestas	Exposición de raíces que el suelo superficial es movido por la escorrentía y el efecto de las gotas de lluvia.	A/P
Sedimentación	Identifica sepultura de cultivos/pastos o depositación de un "suelo nuevo". Marcado por zonas fértiles o infértiles. El material podría ser rico en nutrientes o ser arenoso/gravoso.	A
Estructuras de conservación	Marcadas por bosquetes en las estructuras de conservación, implicando que la escorrentía fue excesiva para ser contenida por ellas.	A
Pedregosidad ^b	Fragmentos sueltos en superficie, indican remoción de suelo.	P
Afloramientos rocosos	Rocas parcialmente expuestas. Indican que el suelo ha sido removido por escorrentía.	P
Cárcavas	De mayores dimensiones que los canalículos	P
Cambio de color de suelo superficial	Implica remoción de horizontes superficiales, dejando expuestos los inferiores.	P
Suelo suelto	Implica suelos propensos a erosión eólica y fácilmente afectados por escorrentía, de escasa capacidad de retención de agua, sin ocupar grandes áreas.	P

^aA: Indicador de erosión actual; P:Indicador de erosión pasada.

^b principalmente para superficies de suelos con escasos o sin fragmentos gruesos (< 0.01% del area) antes de ser cultivadas.

Cuadro 17: Indicador según tipo de erosión (Casanova, M., 2008).

Indicadores	Erosión hídrica	Erosión eólica	Erosión en pendiente
Canalículos y cárcavas	X		
Pedestales	X	X	
Capa de fragmentos gruesos en superficie (armour layer)	X	X	
Acumulaciones de suelo alrededor de grupos de plantas o pendiente arriba sobre árboles, cercos y otra barrera	X	X	
Depósitos de suelo a bajos gradientes de pendiente	X		
Raíces o material parental expuestos	X	X	X
Agua con sedimento/flujo de barro durante y luego de eventos de lluvia	X		
Sedimentación en cauces y reservorios	X		
Nubes/tormentas en polvo		X	X
Capas de arena en superficie		X	
Surcos paralelos en suelo arcilloso u ondulaciones en suelo arenoso		X	
Sitios desnudos o estériles	X	X	
Síntomas de deficiencia/toxicidad de nutrientes en plantas	X		
Decrecimiento de rendimientos	X	X	X
Cambios de especies vegetales	X		
Profundidad de raíces restringida	X		X
Diminución de la materia orgánica del suelo (colores claros)	X		
Aumento de tamaño de escarpes grietas de tensión, especialmente aquellas por sobre el escarpe principal.			X
Inclinación de estructura y árboles, árboles muertos y raíces estiradas a través del escarpe y en grietas de tensión.			X
Cambios en la curvatura y microrelieve superficial			X
Cambios en el patrón normal de drenaje			X
Alcantarillas o estructuras evacuando escorrentía a sitios inestables.			X

Cuadro 18: Indicador de erosión a nivel de campo (Stocking y Murnaghan, 2000)

Tasa de erosión Mgha-1	Clase	Indicadores
<1	Natural	Ninguna evidencia superficial de erosión; terreno bien protegido por cubierta vegetal (90-10%); muy baja concentración de sedimentos en la escorrentía, la que aparece clara.
1---2	Muy ligera	Ninguna evidencia superficial de erosión; terreno protegido por cubierta vegetal (70-90%); muy baja concentración de sedimentos en la escorrentía, la que aparece de clara a ligeramente terrosa.
2---5	Ligera	Alto de encostramiento superficial; canaliculos espaciados cada 50-100 m; 30-70% de cobertura vegetal; riesgo ligero de polución si la escorrentía descarga directamente a los cursos de agua.
5---10	Moderada	Evidencia de lavado superficial; canaliculos espaciados cada 20-50 m; raíces de os árboles expuestas marcan el nivel de la superficie original del suelo; encostramiento superficial ligero a moderado; 30-70% de cobertura vegetal; riesgo de polución si la escorrentía descarga directamente a los cursos de agua.
10---50	Alta	Red continua de canaliculos espaciado cada 5-10 m o cárcavas profundas cada 50-100 m; encostramiento superficial extenso; <30% de cobertura; peligro de polución y sedimentación aguas abajo.
50---100	Severa	Terreno muy marcado por red continua de canaliculos espaciados cada 2-5 m o cárcavas cada 20 m; sedimentos principalmente de material grueso; suelo desnudo; limo en los cuerpos de agua (siltación); daño a caminos por erosión y sedimentación; riesgo de flujo de barro.
100-500	Muy severa	Terreno muy marcado por red continua de canaliculos con cárcavas cada 5-10 m; fuerte encostramiento; suelo desnudo severa saltación; problemas de polución, inundación y, eutroficación aguas abajo.
>500	Catastrófica	Red extensa de canaliculos y cárcavas; cárcavas grandes (>100 m ²) cada 20 m; gran parte de horizontes superficiales han sido removidos; severo daño por erosión, polución, inundación y sedimentación aguas abajo.

Anexo III. Pautas de asignación para factor C en modelo USLE.

Cuadro 19: Valores C para terrenos forestales sin alterar.

Porcentaje de cobertura arbórea y sotobosque	Porcentaje de cobertura de la hojarasca	Factor C
100 – 75	100 – 90	0.0001 – 0.001
70 – 45	85 – 75	0.002 – 0.004
40 – 20	70 – 40	0.003 – 0.009

Cuadro 20: Valores de factor C para praderas permanentes, terrenos, baldíos y bosques pastoreados.

Cobertura aérea tipo y altura	Porcentaje de cobertura aérea	Cubierta superficial en contacto con el terreno % de suelo cubierto						
		Tipo	0	20	40	60	80	95+
No apreciable	-	G	0.45	0.20	0.10	0.042	0.012	0.003
		W	0.45	0.24	0.15	0.091	0.043	0.011
Herbáceas, pastos largos o matorral con arbustos medios de caída de gotas menor a 0.90 m	25	G	0.36	0.17	0.09	0.038	0.013	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.083	0.041	0.011
	50	G	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		W	0.26	0.16	0.11	0.076	0.039	0.011
	75	G	0.17	0.10	0.06	0.032	0.011	0.003
		W	0.17	0.12	0.09	0.068	0.038	0.011
Arbustos o matorrales con altura media de caída de gotas de 1.95 m.	25	G	0.40	0.18	0.09	0.04	0.013	0.003
		W	0.40	0.22	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	G	0.34	0.16	0.08	0.038	0.012	0.003
		W	0.34	0.19	0.13	0.082	0.041	0.011
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
		W	0.28	0.17	0.12	0.078	0.040	0.011
Árboles pero sin apreciable cubierta o de matorral de altura media de caída de gota de 4 m.	25	G	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		W	0.42	0.23	0.14	0.089	0.042	0.011
	50	G	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.39	0.21	0.14	0.087	0.042	0.011
	75	G	0.36	0.17	0.09	0.039	0.013	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.084	0.042	0.011

G: cubierta superficial está compuesta por pastos o matorral en descomposición; W: la cubierta superficial está compuesta por herbáceas con poca cobertura radicular o residuos no descompuestos.

Cuadro 21: Valores de factor C para áreas de bosques alterados mecánicamente o con métodos de preparación de sitio (Adaptado de tabla 12 del manual USLE, Wischmeier y Smith, 1978).

Preparación de sitio	Cobertura de mulch	Condición del suelo y cobertura de maleza							
		Excelente		Buena		Regular		Pobre	
		NC	WC	NC	WC	NC	WC	NC	WC
Discado, rastrillado o preparado para semillas	0	0.52	0.2	0.72	0.27	0.85	0.32	0.94	0.36
	10	0.33	0.15	0.46	0.20	0.54	0.24	0.60	0.26
	20	0.24	0.12	0.34	0.17	0.40	0.20	0.44	0.22
	40	0.17	0.11	0.23	0.14	0.27	0.17	0.30	0.19
	60	0.11	0.08	0.15	0.11	0.18	0.14	0.20	0.15
	80	0.05	0.04	0.07	0.06	0.09	0.08	0.10	0.09
Quemas	0	0.25	0.10	0.26	0.10	0.31	0.12	0.45	0.17
	10	0.23	0.10	0.24	0.10	0.26	0.11	0.36	0.16
	20	0.19	0.10	0.19	0.10	0.21	0.11	0.27	0.14
	40	0.14	0.09	0.14	0.09	0.15	0.09	0.17	0.11
	60	0.08	0.06	0.09	0.07	0.10	0.08	0.11	0.08
	80	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.06	0.05
Trituración de residuos	0	0.16	0.07	0.17	0.07	0.20	0.08	0.29	0.11
	10	0.15	0.07	0.16	0.07	0.17	0.08	0.23	0.10
	20	0.12	0.06	0.12	0.06	0.14	0.07	0.18	0.09
	40	0.09	0.06	0.09	0.06	0.10	0.06	0.11	0.07
	60	0.06	0.05	0.06	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05
	80	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04

NC: sin vegetación viva; WC: con un 75% de pastos y malezas, implicando una altura media de goteo de 1.27 m.

Cuadro 22: Valores para el sub-factor de la cubierta del dosel (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984).

Altura del dosel (m)	Porcentaje de suelo desnudo cubierto por algún dosel										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0.5	1.0	0.91	0.83	0.74	0.66	0.58	0.49	0.41	0.32	0.24	0.16
1.0	1.0	0.93	0.86	0.79	0.72	0.65	0.58	0.51	0.44	0.37	0.30
2.0	1.0	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
4.0	1.0	0.97	0.95	0.92	0.90	0.87	0.84	0.82	0.79	0.76	0.75
6.0	1.0	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.92	0.90	0.89	0.87	0.85
8.0	1.0	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.95	0.94	0.93	0.83	0.92
16.0	1.0	1.0	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96
20.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Cuadro 23: Valores para sub-factor de almacenamiento *in-situ* en el cual las características enunciadas son sistemáticamente continuas espacialmente (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984).

Situación	Valor de sub-factor
Ladera sin depresiones, plana en superficie	1
Almacenamiento entre agregados de suelo de 2.5 cm de diámetro.	0.9
Almacenamiento entre agregados de suelo de 5 cm de diámetro.	0.8
Almacenamiento entre agregados de suelo de 10 cm de diámetro.	0.7
Almacenamiento entre agregados de suelo de 15 cm de diámetro.	0.5
Almacenamiento en huellas de tractor ubicados en contra de la pendiente principal.	0.8
Almacenamiento en cavidades dejados por tocones o por la marca de un aspa de arado.	0.8
Almacenamiento en represas creadas por residuos vegetales o trozos de fuste o ramas ubicadas contra pendiente principal.	0.8
Almacenamiento en sectores arados o excavados en contra pendiente principal con poco suelo desnudo y más hojarasca, hendidura de 15 cm.	0 – 0.2
Almacenamiento en sectores de arados o trabajo con hendidura de 2.5 cm, en contra pendiente principal, con suelo desnudo en áreas entre hendidura.	0.8
Almacenamiento en sectores arados a favor de la pendiente principal.	0.9

Cuadro 24: Valores para el sub-factor de la secuencia de saltos en el terreno (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984).

Pendiente (%)	Porcentaje de la ladera con estructura de saltos										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	1.0	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.94	0.93	0.92
6	1.0	0.97	0.94	0.92	0.89	0.86	0.84	0.81	0.78	0.76	0.73
7	1.0	0.96	0.92	0.88	0.84	0.80	0.75	0.71	0.67	0.63	0.59
8	1.0	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.69	0.64	0.59	0.54	0.49
9	1.0	0.94	0.89	0.83	0.77	0.71	0.65	0.60	0.54	0.48	0.42
10	1.0	0.94	0.87	0.81	0.75	0.68	0.62	0.56	0.49	0.43	0.36
12	1.0	0.93	0.85	0.78	0.71	0.63	0.56	0.49	0.42	0.34	0.27
15	1.0	0.92	0.84	0.75	0.67	0.59	0.51	0.43	0.34	0.26	0.18
20	1.0	0.91	0.8	0.74	0.65	0.56	0.47	0.38	0.29	0.20	0.11
30 y más	1.0	0.91	0.81	0.72	0.63	0.53	0.44	0.35	0.25	0.15	0.06

Cuadro 25: Valores de sub-factor de labranza en contorno (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984).

Pendiente %	Siguiendo la curva de nivel	Grado de desviación respecto a la curva de nivel.				
		15	30	45	60	90
0 – 2	0.80	0.88	0.91	0.94	0.96	1.0
3 – 7	0.70	0.82	0.87	0.91	0.94	1.0
8 – 12	0.80	0.88	0.91	0.94	0.96	1.0
13 – 18	0.90	0.94	0.96	0.97	0.98	1.0
19 – más	1.00	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Cuadro 26: Valores para el efecto combinado de los sub-factores de proporción de suelo desnudo, raíces finas y reconsolidación del suelo en suelos forestales sin labranza (adaptado de Dissmeyer y Foster, 1984).

% de suelo desnudo	Porcentaje de suelo desnudo con densa red de raíces finas en los primeros 3 cm de suelo										
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.0004	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0010	0.0012	0.0014	0.0016	0.0018
2	0.0008	0.0008	0.0060	0.0012	0.0014	0.0017	0.0020	0.0023	0.0027	0.0031	0.0036
5	0.0030	0.0030	0.0030	0.0040	0.0050	0.0060	0.0070	0.0080	0.0090	0.0110	0.0120
10	0.0050	0.0050	0.0060	0.0080	0.0090	0.0110	0.0130	0.0150	0.0170	0.0200	0.0230
20	0.0110	0.0120	0.0140	0.0170	0.0200	0.0240	0.0280	0.0330	0.0380	0.0440	0.0500
30	0.0170	0.0180	0.0200	0.0250	0.0290	0.0360	0.0420	0.0500	0.0590	0.0650	0.0770
40	0.0230	0.0240	0.0270	0.0340	0.0420	0.0490	0.0580	0.0680	0.0780	0.0920	0.1040
50	0.0360	0.0320	0.0380	0.0450	0.0540	0.0640	0.0740	0.0880	0.1030	0.1180	0.1350
60	0.0370	0.0380	0.0430	0.0550	0.0670	0.0770	0.0920	0.1090	0.1270	0.1470	0.1670
70	0.0470	0.0490	0.0540	0.0680	0.0830	0.0980	0.1170	0.1380	0.1610	0.1870	0.2120
80	0.0550	0.0580	0.0660	0.0810	0.0980	0.1150	0.1410	0.1640	0.1920	0.2210	0.2520
85	0.0660	0.0680	0.0780	0.0950	0.1150	0.1380	0.1650	0.1950	0.2280	0.2640	0.3000
90	0.0750	0.0800	0.0890	0.1150	0.1330	0.1570	0.1870	0.2220	0.2600	0.3010	0.3420
95	0.0860	0.0900	0.1020	0.1250	0.1550	0.1820	0.2170	0.2550	0.2980	0.3450	0.3920
100	0.0990	0.1040	0.1700	0.1440	0.1800	0.2070	0.2480	0.2930	0.3420	0.3960	0.4500

Cuadro 27: Valores para el sub-factor de raíces finas para el caso de plantas invasoras en terrenos forestales labrados.

Porcentaje de suelo desnudo con raíces	Valor de sub-factor
0	1
10	0.87
20	0.76
30	0.65
40	0.56
50	0.47
60	0.46
70	0.34
80	0.28
90	0.24
100	0.22

Anexo IV. Pauta de asignación para factor de prácticas de conservación.

Cuadro 28: Factor P de prácticas de conservación.

Porcentaje de pendiente	Cultivo en contorno o curvas de nivel		P para cultivo en terraza
	P*	Longitud máxima de ladera (m)	
1 – 2	0.60	122	0.12
3 – 5	0.50	91	0.10
6 – 8	0.50	61	0.10
9 – 12	0.60	37	0.12
13 – 16	0.70	24	0.14
17 – 20	0.80	18	0.16
21 – 25	0.90	15	0.18

* Se pondera por 0.8 si se considera contornos realizados con pilas de residuos

