

Justificación

Entre los principales problemas de la subcuenca de Yesera es la falta de datos que cuantifiquen y otorguen información base para ser proporcionada a los habitantes del área, para poder tomar medidas de mitigación principalmente en cuanto al deterioro notorio y la degradación de los recursos naturales, debido al mal uso de las áreas inapropiadamente utilizadas mediante medidas como la expansión de la frontera agrícola, tala indiscriminada de bosques y especies nativas del área a tratar, el ganado, las cuales son las que tienen un mayor impacto negativo en el área.

El estudio actual determinara el grado de daños, afectación, erosión en la subcuenca Yesera, en beneficio a la comunidad, generando un aporte al sistema medio ambiental del municipio de Cercado, para que el mismo opte por medidas mitigativas y preventivas en favor a las áreas afectadas para aplicar estrategias que rehabilitasen y recuperen los suelos erosionados.

El método usado para la aplicación de la USLE, empleando la fórmula para la obtención de datos se aplicó el uso del SIG (Sistema de información geográfica), se utilizó el software ArcGIS el cual da la posibilidad de determinar el tipo de erosión considerando los índices de vegetación en la subcuenca Yesera en mayor medida.

Objetivos

Objetivo general

Caracterizar el grado de erosión actual de suelos a partir de la combinación del sistema USLE y técnicas de adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis y distribución espacial de información georreferencial.

Objetivos específicos

- Determinar los factores necesarios para aplicar la fórmula Universal de Pérdida de Suelo (USLE) mediante el uso de herramientas geoespaciales del software ArcGIS 10.3, para la subcuenca de Yesera.
- Estimar la pérdida de suelos por erosión hídrica aplicando la Ecuación Universal en la subcuenca de Yesera Tarija.
- Elaborar mapas de la erosión actual a fin de contar con una herramienta de planificación y gestión integral de los recursos naturales, a través de la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE) y técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Capítulo I

Revisión Bibliográfica

1.1. Manejo de Cuencas hidrográficas

Una cuenca es el área de terreno que drena hacia una corriente en un lugar dado. En realidad, es el área de captación de agua en un río. Asimismo, se lo considera como una unidad homogénea que es factible de ser manejada bajo un concepto ambiental-sistemático. Espinoza D. (2005).

El MIC (Manejo integrado de cuencas) es el conjunto de acciones conducentes al uso y aprovechamiento de los recursos naturales de la cuenca. Plan Nacional de Cuencas – Ministerio de Medio Ambiente y Agua, (2019)

El manejo integral de cuencas hidrográficas es un conjunto de esfuerzos que tienden a identificar y aplicar opciones técnicas, socioeconómicas y legales, para establecer una solución a la problemática causada por el deterioro y mal uso de los recursos naturales renovables, así como de las cuencas hidrográficas, y lograr un mejor desarrollo de la sociedad humana y mejorar la calidad de vida de su población Francke (2002).

1.2. Conservación de suelos

Considerando que es necesario una medida preventiva para ofrecer mejor calidad e índices de vida a los habitantes, al igual que seguridad ambiental como alimentaria se realizan métodos apropiados del manejo de tierras los mismos que ayudan a una intervención de la degradación del factor suelo, agua, y factores biológicos con fines político, económicos y sociales.

Los efectos que llegan a producir la degradación de suelos son numerosos, entre ellos se incluye la disminución de la fertilidad del suelo, elevación de acidez, salinidad, alcalinización, deterioro de la estructura del suelo, erosión eólica e hídrica acelerada, pérdida de la materia orgánica y de biodiversidad. Se ha de tomar medidas para recuperar la productividad de suelos degradados.

Muchas son las propiedades del suelo que influyen en la conservación del suelo y el

agua, ya que afectan el control de la erosión. Montes M. Domínguez y E. Ventura. (2001).

1.2.1. Topografía

La topografía es un término utilizado para describir el estudio detallado de la superficie de la tierra. Este estudio, incluye cambios en la superficie, como montañas y valles, así como las características de ríos y carreteras.

La topografía es una ciencia encargada del conjunto de procedimientos, con la finalidad de determinar las posiciones relativas de los puntos sobre la superficie de la tierra y debajo de la misma, mediante combinación de medidas, basado con un proceso el cual considera 3 fundamentales elementos los cuales son: Distancia, elevación y dirección. Wischmeier W. H ; Smith, D. D. (1978).

1.2.2. Profundidad

Afirmando que la profundidad de los límites superiores e inferiores de cada horizonte del suelo se reporta en centímetros; se mide desde la superficie (incluyendo cobertura orgánica y mineral) del suelo hacia abajo.

Los suelos profundos favorecen el almacenamiento de agua y el desenvolvimiento de las plantas, por lo que existe mayor protección contra la erosión. Wischmeier W. H ; Smith, D. D. (1978).

1.2.3. Permeabilidad

La permeabilidad es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire y es una de las cualidades más importantes que han de considerarse para la erosión de suelos. Un área con un tipo de suelo impermeable perderá poca agua por filtración. Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración.

Está asociada a la capacidad de infiltración del suelo, que determina cuánto de agua de lluvia almacena y cuanto se pierde por escorrentía. Mc.Cool, et. al. (1989)

1.2.4. Fertilidad

La fertilidad del suelo es la capacidad del mismo terreno para tener un desarrollo sustentable el crecimiento de las plantas.

El estado de fertilidad de una zona es el resultante de numerosos componentes que dependen del medio que lo rodea, e intervención humana.

Se debe considerar que un buen desarrollo de las plantas proporciona una mayor protección al suelo contra la erosión. Mc.Cool, et. al. (1989)

1.3. Los bosques y la erosión

1.3.1. Bienes y servicios que presta el bosque

Entre una de las técnicas de desarrollo humano se obtiene materia prima de los bosques, buscando un mejor estilo y calidad de vida, donde se obtiene productos forestales maderables o productos forestales no maderables.

Los bosques son una fuente de ingreso necesaria básica necesaria para la obtención de bienes y servicios. Los árboles, arbustos de los bosques cumplen con una importante función en la vida diaria de las comunidades rurales al ser una fuente de madera, leña, alimentos, forraje, aceites, gomas, resinas, látex y productos farmacéuticos, asimismo contribuyen a la conservación de suelos y el agua, además de ser lugares que tienen valores estéticos, culturales y religiosos. FAO (1995).

1.3.2. Cobertura vegetal

La rotación de cultivos y el uso de cultivos de cobertura para incrementar la materia orgánica del suelo reducen la erosión y devuelven la diversidad biológica al suelo, con

sus diferentes sistemas radiculares, optimiza la red de canales de las raíces, propiciando el incremento de la penetración del agua y la capacidad del suelo para el mantenimiento de la humedad, así como una mayor disponibilidad de agua para uso del cultivo, en suelos más profundos (Benítez y Castellanos 2003).

Una cobertura permanente protege la superficie del efecto negativo del impacto de las gotas de lluvia. Esto reduce la formación de costras y la susceptibilidad a la erosión, y mejora la porosidad en la superficie. También reduce la pérdida directa de agua por la evaporación al igual que mantiene un suministro de alimento continuo para los organismos del suelo, desde microbios hasta gusanos Benítez y Castellanos (2003).

1.4. Componentes del ciclo hidrológico

1.4.1. Ciclo hidrológico

Es una sucesión de etapas que atraviesa el agua y es repetitivo de ahí el cíclico, donde el agua pasa desde la tierra hacia la atmósfera y el mismo vuelve mediante un proceso de evaporación desde el suelo, al igual que distintas zonas acuáticas como mares, continentes, continuando con la condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y reevaporación.

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte re circulatorio e indefinido o permanente, este movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía para elevar el agua (Evaporación); la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (Precipitación y escurrimiento). Chereque (1989).

1.4.2. Infiltración

Resumiendo, es el paso del agua de la superficie del suelo hacia el interior de éste, a través de poros y espacios vacíos, por acción de la gravedad o capilaridad Calvo (1996).

La infiltración es el proceso y la cuantificación de la penetración de aguas desde la superficie hacia el interior del terreno. Cuando el nivel freático está a cierta profundidad, la parte de infiltración, que se convierte en recarga, tarda un tiempo más o menos largo en llegar al acuífero. El agua en tránsito descendente es una recarga en tránsito o agua de percolación Alcalá (2005).

Este es un factor de suma importancia ya que la capacidad de retención acuífera hace que exista un mayor o menor escurrimiento superficial el cual avanza hacia la red hidrológica del agua, esta toma a consideración la estructura y textura edafológica.

Calvo (1996).

1.4.3. Erosión hídrica

Es la remoción del suelo por lluvia y escorrentía superficial. Dicho de otro modo, es la acción de desprendimiento de las partículas de suelo y su transporte por el agua de escurrimiento sobre el terreno. Calvo (1996).

Esta al encontrarse en un movimiento acuífero realiza movimientos edafológicos a los factores como los nutrientes, la materia organica.

1.5. Tipos de erosión hídrica

1.5.1. Escurrimiento difuso

Ambos explican que, al hacer parte del agua producida por la lluvia, esta se junta o se propaga en la superficie del suelo para producir un “escurrimiento difuso” es el desplazamiento corto que experimenta las partículas que son transportadas por el agua superficial, aun en terrenos de pendientes suaves y con cobertura vegetal. Cuando el escurrimiento difuso es intenso y corresponde a un arrastre uniforme casi imperceptible de delgadas capas de suelo, bajo la acción de un manto de agua, se conoce como escurrimiento laminar. Yanchapaxi y Pozo. (1993)

1.5.2. Erosión Laminar

Este tipo de erosión hídrica ocurre cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad de infiltración del suelo y resulta en la pérdida de las partículas más finas del suelo que contienen nutrientes y materia orgánica.

Tiene déficit de visibilidad por la cantidad de tierra transportada, removida, en el proceso acuático lluvioso, pero hay que considerar que esta lamina con el pasar del tiempo puede llevar a ser bastante considerable, y tiene un grado de importancia por ser poco considerada por su perceptibilidad. FAO (1995).

1.5.3. Erosión en surcos

Este tipo de erosión es notorio debido a que las lluvias por lo general o distintas zonas donde el agua se acumula en un mismo lugar, la cual es arrastrada y llega a formar unos huecos denominados zanjillas a lo largo de la subcuenca, donde depende la posición y formación del terreno. FAO (1995).

1.5.4. Erosión en cárcavas

Bastante importante el anterior subtítulo debido a que este tipo de erosión se ocasiona cuando el agua reunida en los surcos ha tenido un tiempo de acumulación que la misma lleva al arrastre más tierra, donde se forman zanjas de un gran tamaño, el cual se ramifica y adquiere profundidad con la adquisición acuífera. FAO (1995).

1.5.5. Erosión regresiva o remontante

Este proceso de propagación es de factor fluvial, el cual avanza hacia una parte alta, el cual llega a una expansión de una cuenca, por lo general tiene presencia en zonas donde hay un área de drenaje en resumido una razonable esorrentía, esto provoca el cauce el cual puede llegar a arrastrar entre si grava y rocas.

Una vez formado los surcos, las cárcavas y derrumbes, la concentración del agua que escurre por ellos hace retroceder la erosión, aumentando su tamaño y longitud hacia arriba hasta llegar en ocasiones a la coma de las laderas, a todos estos factores acompaña también un proceso de equilibrio del relieve del terreno. FAO (1995).

1.5.6. Terracetos o pata de vaca

Con el pasar de los años el criado de animales para pastoreo entre otras, hace que el suelo sufra un desgaste hacia la cobertura vegetal el cual es el culpable del inicio de los surcos y que terminan en cárcavas.

Son los cambios en zigzag dejados en los suelos descubiertos por la intervención humana (potreros) en diferentes grados de pendiente, donde se produce por el paso continuo del ganado (sobre pastoreo). FAO (1995).

1.5.2. Erosión eólica

El factor del viento tiene una acción sobre la superficie terrestre, esto depende de factores como la dirección, la velocidad de este, además de la fuerza.

La erosión eólica es causada por el viento en terrenos sueltos, localizado en regiones con variaciones altas de temperatura, poca precipitación y predominio de vientos fuertes. FAO (1995).

1.6. Factores que originan la erosión hídrica

1.6.1 Factores climáticos

Reafirmando que son de suma importancia, en especial el tema precipitación, la intensidad en la que se presenta, sin olvidar la intensidad, el tiempo de su duración.

Todo esto ya que cuando la lluvia presenta características notorias como presentarse en bastante cantidad o intensa, a lo normal en esa zona para la infiltración de aguas en el

suelo se puede observar que este generará escorrentía lo cual con el pasar del tiempo será erosión.

1.7. Factores que inciden sobre la erosión

Tomando en cuenta que en el factor erosión edafológica se presentan 2 factores que llegan a incidir en el mismo los mismos son: La erosividad y la erodabilidad.

Los factores que controlan el sistema de erosión (del suelo) son: la erosionabilidad del suelo, la erosividad del agente erodante, el tipo de cobertura vegetal y los diversos factores socioeconómicos. Figueroa (1979).

- **Erodabilidad**

Susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica (*SEH*) es determinada primordialmente por el potencial erosivo de la lluvia, por la inclinación del terreno o grado de pendiente, por la superficie y posición de captación o (área) de impacto de la lluvia, por las cubiertas en su superficie y acción antrópica. FAO (1995).

Esta varía en las zonas de estudio ya que función de las texturas edafológicas, la estabilidad de los agregados, el grado de resistencia al corte, su capacidad de infiltración además el contenido de materia orgánica y cementantes químicos del suelo.

- **Erosividad**

Acorde al trabajo de investigación en el modelo USLE, en el cual la relación entre pérdida de suelo, erosividad de la precipitación y tipo de suelo, se corrige con información de la pendiente y longitud de la ladera, cubierta vegetal y medidas de control de la erosión del suelo. USLE, y su versión revisada RUSLE Hernandez. E (1993).

La erosividad de la lluvia puede evidenciar diferentes patrones según la estacionalidad de determinados climas, como la zona geográfica ubicada, en términos de magnitud y relación con la cantidad total de precipitación. Ibáñez A., Moreno R., & Gisbert B. (2010).

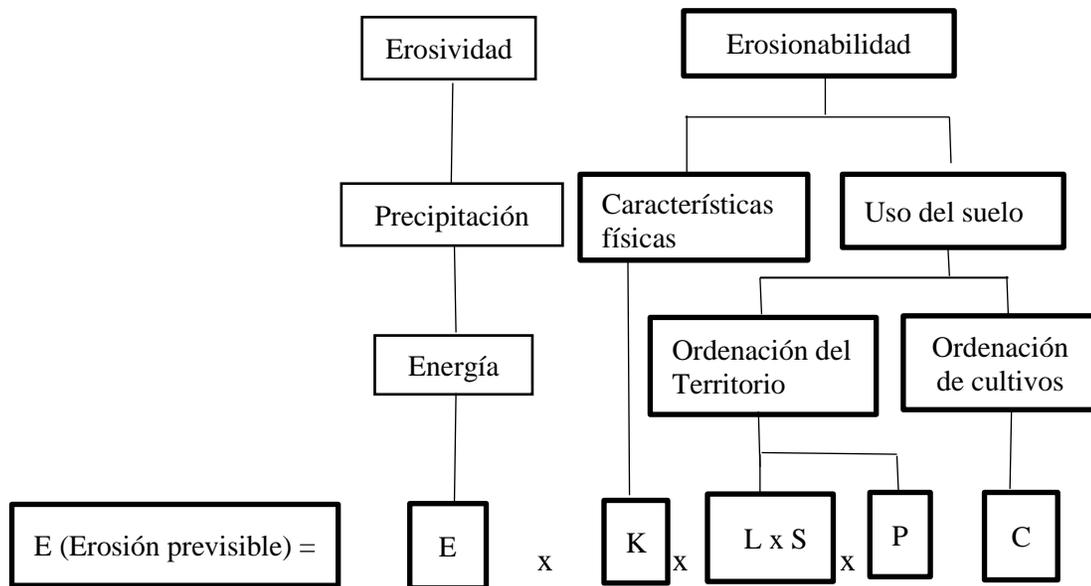
Las gotas de lluvia compactan la superficie del suelo y las salpicaduras y el flujo del agua desprenden partículas de este, estos procesos pueden sellar las superficies, con lo que disminuye la tasa de infiltración del agua en el suelo. Si cae más lluvia de la que puede infiltrarse en el referido suelo, se producen escorrentías. Kirkby (1998).

1.8. Modelo USLE

Profundamente alarmados por la existente erosión a simple vista notoria en la zona de estudio, la cual sucesivamente encadena en pérdida política, económica y social a los habitantes de la zona los cuales se manifiestan mediante la disminución de las zonas cultivables, la fertilidad de los suelos, la capacidad de retención de zonas inundables o incluso puede la colmatación y eutrofización de masas de agua. Por tanto, el estudio de la erosión del suelo resulta especialmente importante en ámbitos como la agricultura, la explotación forestal, la hidrología y demás ciencias relacionadas con el medio ambiente. Pacheco; Marcano, & Xartaya, (2014)

Uno de los métodos más utilizados para su cálculo y que ha tenido mayor aceptación y difusión ha sido la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE), que establece seis factores diferentes como los responsables de las pérdidas anuales de suelo los cuales son:

Figura #1



Los cuales tienen características:

1. Identificar las zonas en las que se genera mayor cantidad de sedimentos a través de los valores de áreas homogéneas en R, K, LS, C, y P)
2. Identificar las causas por las que se producen las pérdidas de suelos (a través de los valores de R, K, LS, C y P de cada área homogénea)
3. Implantar las medidas de conservación más adecuadas para reducir las pérdidas de suelo por erosión hídrica laminar y entre regueros.

La ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) fue propuesta para calcular la erosión laminar y en canalillos (Wischmeier y Smith, 1978) y está definida como:

$$A = RKLSCP$$

donde, y de acuerdo con el sistema métrico internacional de unidades (Foster et al. 1981). A es la tasa de erosión anual por unidad de área, R es el factor de erosividad de la lluvia, K es el factor de erosionabilidad del suelo, L es un factor de longitud de la pendiente, S es un factor del grado de la pendiente, C es un factor de cultivo y manejo

del cultivo, y P es un factor de prácticas de manejo.

Esta ecuación universal es un modelo que cuantifica de manera empírica, con el cual se calcula o predice el estado actual de la erosión edafológica.

Toma de datos de ingreso varios factores que intervienen en procesos de erosión como la erodabilidad, erosividad, las características de relieve, el uso de suelos y prácticas de conservación que mediante algoritmos estiman la pérdida de suelo en toneladas por año. Wischmeier, (1978).

1.8.1 Erodabilidad (Factor K)

Erodabilidad es la susceptibilidad del suelo a la erosión, es junto con el factor de erosividad el más importante para el cálculo de la pérdida de suelo. Su cálculo requiere de mucho tiempo, equipos y mano de obra haciendo de este factor altamente costoso por lo que se busca modelar la erodabilidad a partir de relaciones estadísticas, resultados experimentales y propiedades del suelo. Echeverria et al, (2006).

La erodabilidad o factor K, es una medida de la susceptibilidad del suelo al desprendimiento y transporte de sus partículas, la cual está influenciada por numerosas propiedades, tales como textura, estabilidad estructural, contenido de materia orgánica, mineralogía de arcillas y constituyentes químicos, entre otros.

$$K = 1,313 * [2,1 P^{10-4} * (12-MO) * M^{1,14} + 3,25 * (S-2) + 2,5 * (p-3)] / 100$$

Donde:

MO: Contenido en materia orgánica (%)

S: Código de la estructura del suelo

P: Código de permeabilidad

M: Factor dado por el producto de la suma de los porcentajes de limo y arena muy fina con la suma de los porcentajes de arena y limo. En términos matemáticos M corresponde a $(\% \text{ limo} + \text{ arena muy fina}) * (100 - \% \text{ arcilla})$.

1.8.2. Longitud de inclinación de pendientes (Factor L)

Por longitud de la pendiente se concluye como la distancia existente en el punto de inicio el cual llega hasta donde el punto donde esa gradiente es reducido y la deposición comienza, o al igual el escurrimiento llega a concentrarse en alguno de los canales.

La inclinación de la pendiente se refiere a la gradiente que existe en la pendiente siendo que a mayor inclinación existe una mayor erosión. Antezana, (2001).

La fórmula para utilizarse para el cálculo del factor L es:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m$$

Donde:

L= factor longitud de pendiente

λ = Longitud de pendiente en metros, de manera horizontal no la paralela a la superficie del suelo

22,13= Longitud en metros de la parcela estándar de la EUPSR

m= exponente que depende de la pendiente.

1.8.3. Grado de pendiente (Factor S)

En cuanto a la topografía como se mencionaba 2 factores son importantes el factor S hace hincapié a la erosión y esta netamente incursionado con el grado de la pendiente (S) del terreno, en él es claro la influencia de la erosión debido a que la misma presenta incremento en lugares con pendiente pronunciada.

La fórmula para utilizar para la obtención de dicho factor es:

$$S = 0,065 + 0,045s + 0,0065s^2$$

Donde

S = es la pendiente en porcentaje

1.8.4. Cobertura del suelo (Factor C)

La cobertura de la capa del suelo esta denominada por el factor C en el modelo espacial USLE, en este observamos el manejo que las tierras son utilizadas en ese entorno, en cuanto a su medición es como el potencial existente de pérdida de suelo en un determinado lapso.

Se debe considerar que este cálculo es de suma importancia ya que con el mismo determinamos la cobertura vegetal existente en la zona además de cuál es el uso de esas tierras.

En las tablas elaboradas por Wischmeier y Smith, se contemplan 5 periodos significativos: Los labores preparatorias (suelo desnudo) , desde la siembra hasta el inicio de la nascencia (suelo desnudo) , el período de consolidación o establecimiento del cultivo (suelo poco protegido) , igual el período de máximo desarrollo o vegetativo (protección máxima) y desde la recolección hasta la siguiente siembra (suelo desnudo, sembrado o protegido por rastrojo).

$$C = \frac{\sum_1^5 t_i C_i}{12}$$

donde t está expresado en meses.

1.8.5. Coeficiente de erosividad (Factor R)

La erosividad de las precipitaciones es muy difícil de cuantificar ya que se requieren datos pluviográficos de un área determinada. Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología para estimar la erosividad de las precipitaciones, factor R en la Ecuación de Pérdidas de Suelo Universal, modelo USLE Mc.Cool, et. al. (1989). Es un factor relacionado con el clima y se define como la capacidad de la lluvia para generar erosión, por tal motivo se denomina factor de erosividad. Para el cálculo de este factor se correlacionarán los datos de precipitación anual (P) con los valores R estimados, utilizando la información de la intensidad de la lluvia disponible Mc.Cool,

et. al. (1989).

Entre una de las metodologías se debe considerar los datos pluviográficos de la zona experimental, para determinar la lluvia diaria y el valor del Factor R diario, y agrupando por meses para el modelo que más se ajusta.

1.8.6. Coeficiente de erodabilidad (Factor K)

Un factor con dificultad de obtención por el tamaño de las muestras a observar ya que la carencia de datos en particular es obtenida a través de una base correlacionada con textura de la superficie edafológica.

Los suelos son susceptibles a erosionarse debido a las partículas que lo componen, de la materia orgánica, la permeabilidad, la estructura, en particular del tamaño de los complementos. Debido a la carencia de datos para la evaluación de este factor. FAO (1995).

1.9. Efecto de la cobertura vegetal

Tomando en cuenta que esta sirve como filtro y propicia el paso lento del agua al momento de desplazarse sobre la superficie. También evita el desprendimiento de las partículas del suelo y lo protege del impacto directo de las gotas de lluvia. Hernández E. (1993).

La cubierta viva o inerte aporta una gran capacidad protectora sobre el suelo, al actuar como una capa de revestimiento que evita que las gotas de lluvia impacten directamente contra la superficie desnuda del mismo. Pero, además, la cobertura del suelo supone una barrera física para la escorrentía en zonas con pendiente. La presencia de cobertura sobre la superficie del suelo supone también una pantalla ante la incidencia directa de los rayos del sol, reduciendo la insolación sobre el mismo. Hernández E. (1993).

Existen dos tipos de cobertura vegetal, la foliar ubicada a nivel del dosel o follaje de las plantas, y basal que es la que se encuentra a nivel del suelo. Hernández E. (1993).

1.9.1. Índices de vegetación

En torno a los Índices de Vegetación se interpretan como las combinaciones de las bandas espectrales las cuales provienen y presentan registros vía satélites de Teledetección, que tienen como función principal realzar la cubierta vegetal en función de su respuesta espectral y atenuar los detalles de otros componentes como el suelo, la iluminación, entre otros. FAO (1995).

Considerando que los mismos funcionan como indicadores de la abundancia relativa y la actividad de la vegetación en estado verde, las cuales incluyen indicaciones relativas al índice de área foliar (LAI), el porcentaje de cobertura vercosa, biomasa verde, el contenido de clorofila, radiación activa fotosintéticamente absorbida. FAO (1995).

Los Índices de Vegetación, son imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales. El resultado permite obtener una nueva imagen donde se destacan gráficamente determinados píxeles relacionados con parámetros de las coberturas vegetales: densidad, índice de área foliar y actividad clorofílica. FAO (1995).

1.10. Teledetección

La teledetección es la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra. Montes M, Domínguez; M Ventura E. (1999).

1.10.1. Sistemas de información geográfica

El campo de los sistemas de información geográfica (SIG) comenzó en los años sesenta, mientras emergían las computadoras y los primeros conceptos de geografía cuantitativa y computacional.

Se debe considerar que un SIG o igual conocido por sus siglas en inglés Geographical Information System es una herramienta para trabajar con información georreferenciada. La información georreferenciada es aquella que viene acompañada de una posición geográfica. Con el SIG es permisible realizar una serie de operaciones: Lectura, edición, almacenamiento y gestión, de manera general, de datos espaciales, análisis simples o complejos, que genera resultados gráficos, de mapas.

Las principales cuestiones que puede resolver un sistema de información geográfica, ordenadas de menor a mayor complejidad, son: Localización, condición, tendencia, rutas, pautas, modelos. Montes, M, Domínguez, M., Ventura E. (1999).

1.10.2. Geomática

La técnica o herramienta tradicional para almacenar y presentar datos espaciales, así como para analizarlos, es el mapa. El mapa ha sido uno de los fundamentos importantes de los SIG. El mapa ha sido fuente de datos, así como también, una estructura para almacenarlos y un instrumento de análisis y de despliegue. G. Monroy; M. Cortes y C. Reyes, (2005).

Con el fin de integrar también otras actividades científicas cuyos desarrollos habían estado aconteciendo de manera paralela y con significativos puntos de contacto, como son la Cartografía, la Geodesia y la Topografía.

Esta toma realce debido a la integración sistemática de estas herramientas ampliando el sistema esto hizo que la Geomática sea integrada y reconocida como las Ciencias de los Sistemas de Información Geoespacial.

En la Geomática, se integra la Cartografía, la Geodesia, la Topografía, la Fotogrametría, la Percepción Remota, el Tratamiento Digital de Imágenes, así como

los Métodos de Sistemas y las Matemáticas requeridas para enfrentar la modelación y solución de los problemas geoespaciales.

1.10.3. Programa espacial Landsat 8

El programa estadounidense Landsat es un programa conjunto entre la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) que ofrece el catálogo más amplio de observaciones de la Tierra a nivel global. Desde su lanzamiento en 1975 hasta el día de hoy, continúa sirviendo imágenes de gran valor científico sobre nuestro planeta.

Esto da lugar al origen al programa Landsat, el cual se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

1.10.4. Sensor Operational Land Imager (OLI)

A lo que respecta OLI utiliza un tipo de sensor "pushbroom" ensamblado por una serie de baterías larga de detectores, tiene más de 7.000 detectores por banda espectral, alineados en su plano focal en su respectivo ancho de banda que ayuda con mejor información de la superficie terrestre con menos partes móviles.

En cuanto a las imágenes que otorga tienen una resolución espacial de 49 pies (15 m) pancromáticas y 98 pies (30 metros) (Incluido el visible, infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta) a lo largo de 115 millas (185 kilómetros) de ancho de imagen, lo cual hace posible varias zonas de la tierra sean cubiertas con el tamaño de resolución, el cual permite con facilidad distinguir características de intervención. Wischmeier, W. H, C. B. Jonson, and B. V. CROSS, (1971)

1.10.5. Wordlclim

WorldClim es un sitio que reúne conjuntos de datos climáticos a nivel mundial con una resolución espacial de 1km² aproximadamente en la línea del Ecuador.

Estos datos pueden ser utilizados para crear mapas y modelar con Sistemas de Información Geográfica (SIG) tales como [QGIS](#), [DIVA-GIS](#), [gvSIG](#), entre otros, los datos se encuentran en el Sistemas de Coordenadas WGS 1984 EPSG: 4326.

Para la [precipitación](#) y [temperatura](#), ofrece los datos en promedio, máximo y mínimo. Es importante mencionar que, para las variables de temperatura, los valores se encuentran en grados Celsius (°C) multiplicados por 10, esto con el objetivo de evitar el uso decimal para crear archivos. F.A.O, (1995).

Capítulo II

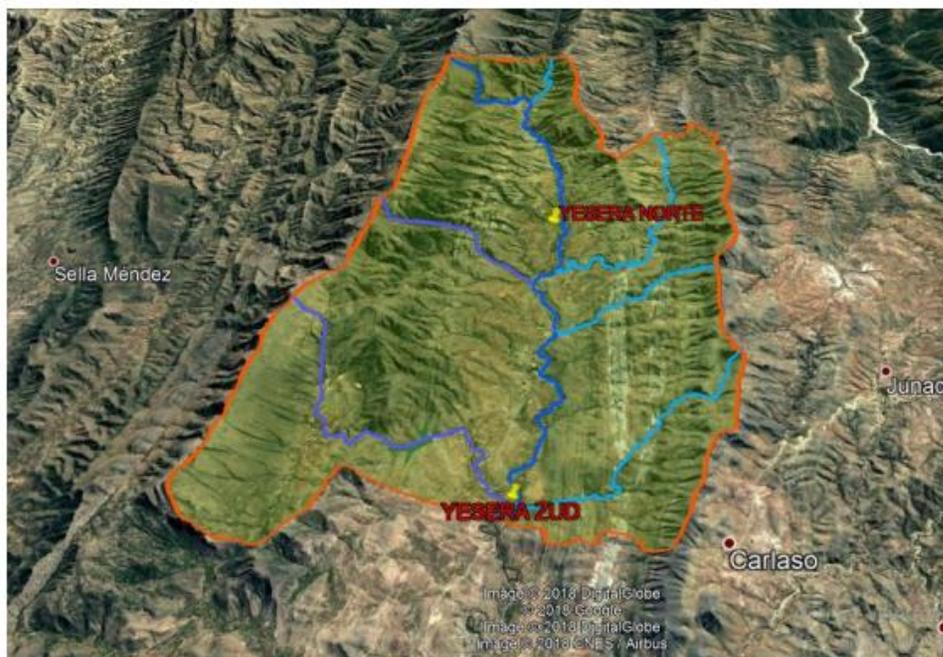
Descripción Del Área De Estudio

2. Ubicación

La investigación se realizó en la subcuenca Yesera ubicada en Municipio de Cercado Tarija, Provincia Cercado, en el Departamento de Tarija, se compone por las Comunidades de Yesera Centro, Yesera Sur, Yesera Norte, Yesera San Sebastián, Caldera Grande y Chiguaypolla. Geográficamente se encuentra ubicada entre los paralelos 21°17'20" y 21°28' 10" de Latitud Sur y meridianos 64°29'46" y 64°38'27" de Longitud Oeste, Altitud media: 2.200 m.s.n.m. La subcuenca Yesera forma parte de la cuenca hidrográfica del Río Santa Ana, a su vez ella tributa a la cuenca del río Tarija de Codificación pfafstetter 85898. La subcuenca tiene una superficie de 211.3 Km².

Figura #2

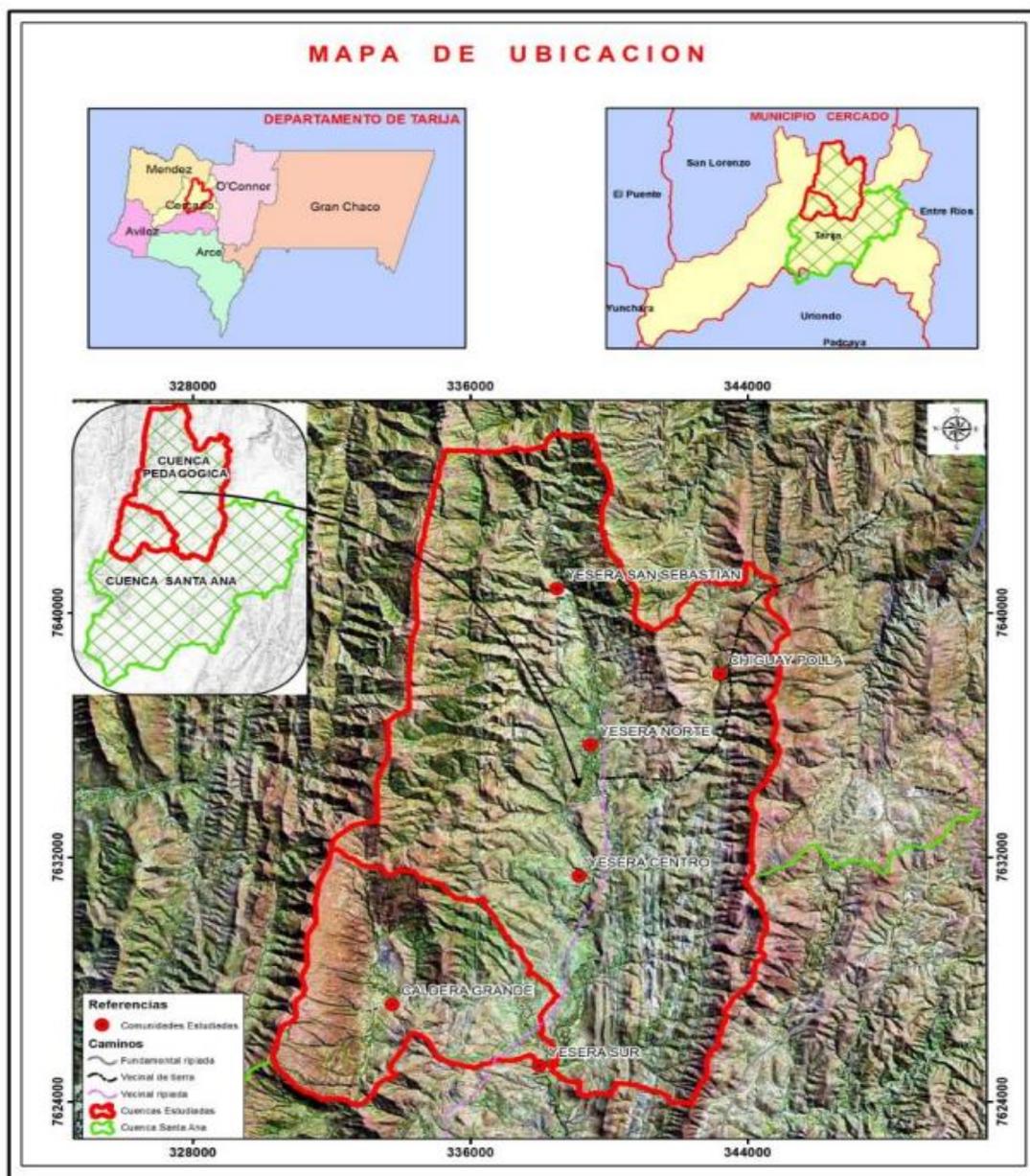
Subcuenca rio Yesera.



Nota. Hiza E. (2022) Desarrollo de capacidades locales y académicas en GIRH-MIC e investigación acción en la cuenca pedagógica Yesera municipio de Cercado – Tarija, Bolivia.

Figura #3

Mapa de ubicación de la zona de la subcuenca de Yesera



Nota. Hiza E. (2022) Desarrollo de capacidades locales y académicas en GIRH-MIC e investigación acción en la cuenca pedagógica Yesera municipio de Cercado – Tarija, Bolivia.

2.1. Características biofísicas

2.1.1. Aspectos físico-naturales

Conforme a la subcuenca de Yesera, el área se caracteriza de formas alongadas con cimas subredondeadas, irregulares, cuyas divisorias de aguas son perfectamente discernibles; la disección varía de moderada, fuerte a muy fuerte, donde las pendientes varían desde fuertemente escarpado de 30 a 60% a extremadamente escarpado > 60%. La cantidad de piedras y rocas superficiales varía desde poca a mucha. El material a partir del cual han sido modeladas las serranías es preponderantemente de origen sedimentario, como areniscas, lutitas, limonitas y arcillita, con intercalaciones de rocas metamórficas como cuarcita Espinoza (2005, Pag;35)

El torno a un aspecto geomorfológico comprende laderas en areniscas, lutitas, limonitas y diamictitas, cubierto con vegetación de matorral ralo, bajo a medio, mayormente caducifolio, deciduo por sequía, montano y vegetación herbácea, semidensa, graminoide, baja, mixto, montano. El paisaje geomorfológico comprende abanicos y pequeños valles sobre depósitos fluviolacustres, cubiertos con vegetación de matorral denso a semidenso, alto, xeromórfico, deciduo por sequía, montano y áreas antrópicas, Espinoza (2005, Pag; 36).

2.1.2. Paisaje

La subcuenca de Yesera se caracteriza por presentar un paisaje típicamente de valle seco, con elevaciones que no sobrepasan los 3.000 msnm, por lo que, las serranías circundantes son levemente suaves.

Las colinas presentan a nivel de paisaje de altas, medias y bajas, presentando normalmente, cimas subredondeadas a redondeadas, con divisoria de aguas poco discernibles Espinoza (2005).

El paisaje geomorfológico son laderas en cuarcitas, areniscas y conglomerados cubierto con vegetación herbácea densa, graminoide baja, arbustiva, subalpino y vegetación

herbácea semidensa, graminoide baja, mixto, montano (Espinoza, 2005).

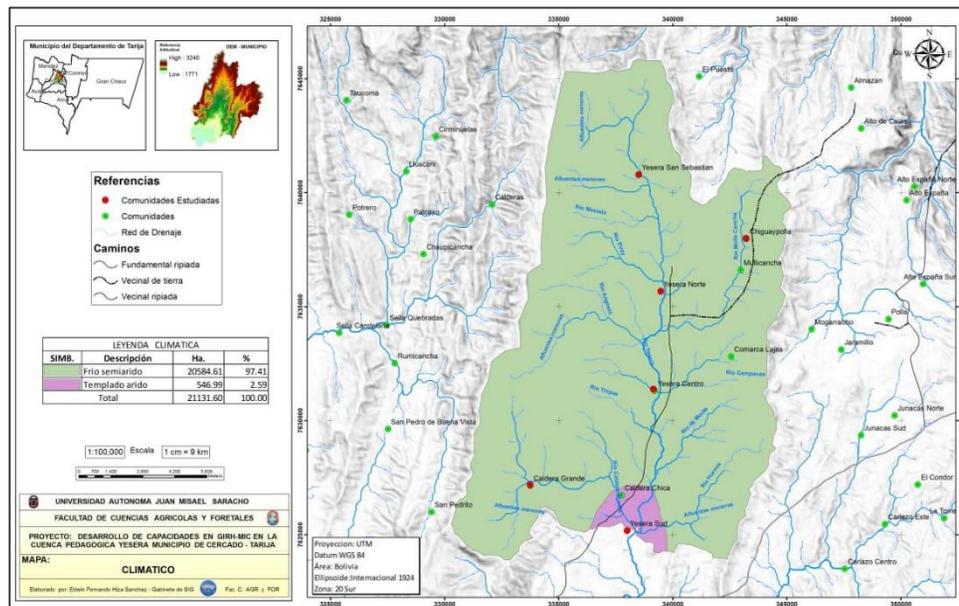
2.1.3. Clima

La subcuenca Yesera, por su configuración se puede mencionar que está caracterizado por presentar un clima templado árido de verano e invierno frío semiárido (ver mapa climático). En cuanto a los registros de datos climáticos de la subcuenca de intervención, se consideró la estación meteorológica de Yesera Norte y Yesera Sud que se encuentran en el área de estudio.

Precipitación media mensual: La precipitación media mensual del área de intervención es de 55,1 mm, lo cual clasifica al lugar como un clima templado medianamente seco. En cuanto a la precipitación anual promedio es de 661,9 mm.

Figura #4

Mapa climático de la subcuenca de Yesera



Nota. Hiza E. (2022) Desarrollo de capacidades locales y académicas en GIRH-MIC e investigación acción en la cuenca pedagógica Yesera municipio de Cercado – Tarija, Bolivia.

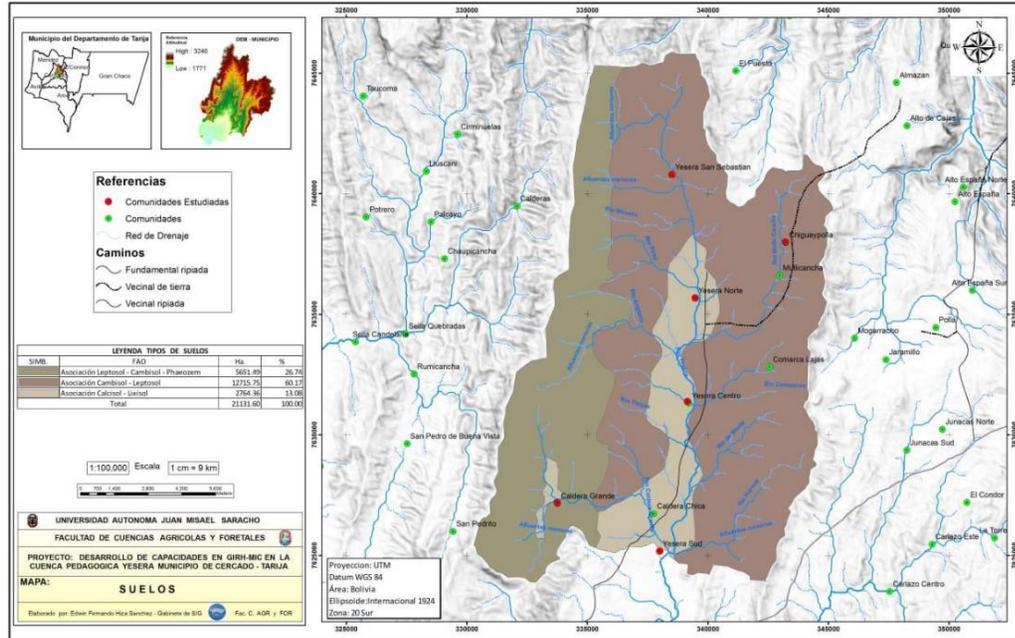
2.2. Geología

2.2.1. Suelos

Los suelos del área de influencia están caracterizados en unidades fisiográficas bien definidas, el material parental de los suelos, en su mayoría es procedente de rocas del periodo Triásico y Cretácico, encontrándose en su litología formada por areniscas, lutitas y limonitas. Las características físicas de los suelos varían dependiendo la zona, pero de manera general se puede decir que los suelos ubicados en los complejos montañosos son poco profundos, generalmente tiene un contacto lítico próximo y se evidencia presencia de afloramientos rocosos, siendo su textura de pesada mediana. Los suelos ubicados en la zona de pie de monte y terrazas aluviales son moderadamente profundos, particularmente en las terrazas sobresalientes, Espinoza, (2005).

Figura #5

Mapa de suelos de la subcuenca de Yesera



Nota. Hiza E. (2022) Desarrollo de capacidades locales y académicas en GIRH-MIC e investigación acción en la cuenca pedagógica Yesera municipio de Cercado – Tarija, Bolivia.

2.3.1. Medio económico social

Las actividades económicas productivas de sustento para las familias de la zona de la subcuenca de Yesera se encuentran fuertemente relacionadas con la producción agrícola y pecuaria la cual tiene una estructura de agricultura combinada entre tradicional y mecanizada, ganadería y venta de fuerza del trabajo temporal. (Espinoza, 2005).

Capítulo III

Materiales y Métodos

3. Materiales

3.1. Software

Computadora con los programas y aplicaciones:

- ArcGIS.
- ArcMap.
- Spatial Analyst.
- ArcToolbox.
- Analysis Tolls.
- Data Management Tools.

3.1.2 Material de gabinete

- Computadora.
- Imágenes Satelitales Landsat 8.
- GPS (Sistema de posicionamiento global).

3.2. Cartografía digital base utilizada

Tomando en cuenta la técnica necesaria para la elaboración cartográfica, se inicia recopilando información existente de diversos lugares confiables y verídicos en distintas capas digitales, donde se debe tener en cuenta que es necesario (Formato Shape) posteriormente todas las imágenes deben ser re proyectadas en el sistema de coordenadas WGS 84, UTM en la zona 20 S (Zona donde se encuentra Bolivia y por ende el área de estudio) todo esto con la finalidad de tener una homogeneidad en el sistema de proyección y poder continuar con la elaboración del trabajo.

3.2. Metodología

3.3. Datos necesarios para la elaboración de mapas

3.3.1. Metodología para el procesamiento de imágenes satelitales

Tomando en cuenta que con ayuda del ArcGIS 10.3, donde se aplica los recortes a las imágenes satelitales de la zona de estudio y con ayuda de información recopilada se aplica la delimitación de la subcuenca Yesera, con ayuda de imágenes satelitales obtenidas a través de Landsat 8 donde se considera las bandas 4, 5 y 6, todo esto con la finalidad de obtener el Índice de Vegetación (NDVI).

3.3.2. Información vectorial

El modelo vectorial es una estructura de datos utilizada para almacenar datos geográficos, todo este es representado mediante puntos, líneas y polígonos, es representado mediante las letras x, y además de la z, en algunas situaciones, para tener una característica puntual puede describirse a través de un punto, y la lineal puede almacenarse de puntos y coordenadas, las poligonales pueden almacenarse como un circuito cerrado de coordenadas.

3.3.3. Información ráster

Los datos ráster se utilizan en una aplicación SIG cuando se desea mostrar información que es continua a través de un área y no puede ser dividido fácilmente en entidades vectoriales.

3.3.4. Slope (Pendiente)

Se considera la pendiente (Gradiente, o la tasa de cambio máximo en valor z) de cada celda en una superficie de 30 píxel.

3.3.5. Flow Direction (Dirección del flujo)

Se crea una trama de la dirección del flujo de cada célula, observando a su alrededor más cercano que se encuentra más empinada ladera abajo.

3.3.6. Flow Accumulation (Acumulación del flujo)

En las celdas existentes se crea una trama de flujo donde se encuentra acumulado, en algunas ocasiones por diversas razones se puede aplicar la dirección del flujo de entrada de la trama.

La trama de entrada que muestra la dirección del flujo de salida de cada célula.

3.3.7. Ráster Calculator (Calculadora ráster)

Ejecuta el factor algebraico en los mapas utilizando la sintaxis de Python en una interfaz similar a la calculadora, por ende, tiene y esta denominada como expresión de álgebra de mapas.

La expresión se compone mediante la especificación de los insumos, los valores, los operadores y las herramientas a utilizar.

Utilice la lista Capas y variables para seleccionar los datasets y las variables a utilizar en la expresión. Los valores numéricos y los operadores matemáticos se pueden agregar a la expresión haciendo clic en los botones respectivos.

Se calculan los factores de la fórmula e índices de vegetación (NDVI) con la combinación de bandas del Landsat 7 y Landsat 8.

3.3.8. Álgebra de mapas

La técnica de álgebra de mapas en ArcGIS consiste en crear un mapa ráster para cada uno de los componentes de la USLE; una vez creado los mapas, se realiza una multiplicación entre ellos. Esto se hace con la extensión Spatial Analyst de ArcGis por medio de uso de la herramienta Raster Calculator según Pacheco; Marcano, & Xartaya, (2014).

3.3.9. Análisis de las imágenes satelitales

En la metodología para la obtención de información mediante las imágenes satelitales se puede considerar 2 grupos:

- 1.- Obtención de información basada en el tratamiento automático o semiautomático por parte del ordenador o sistema.
- 2.- Obtención de información basada en análisis de interpretación de datos conflictos en las variables características espectrales.

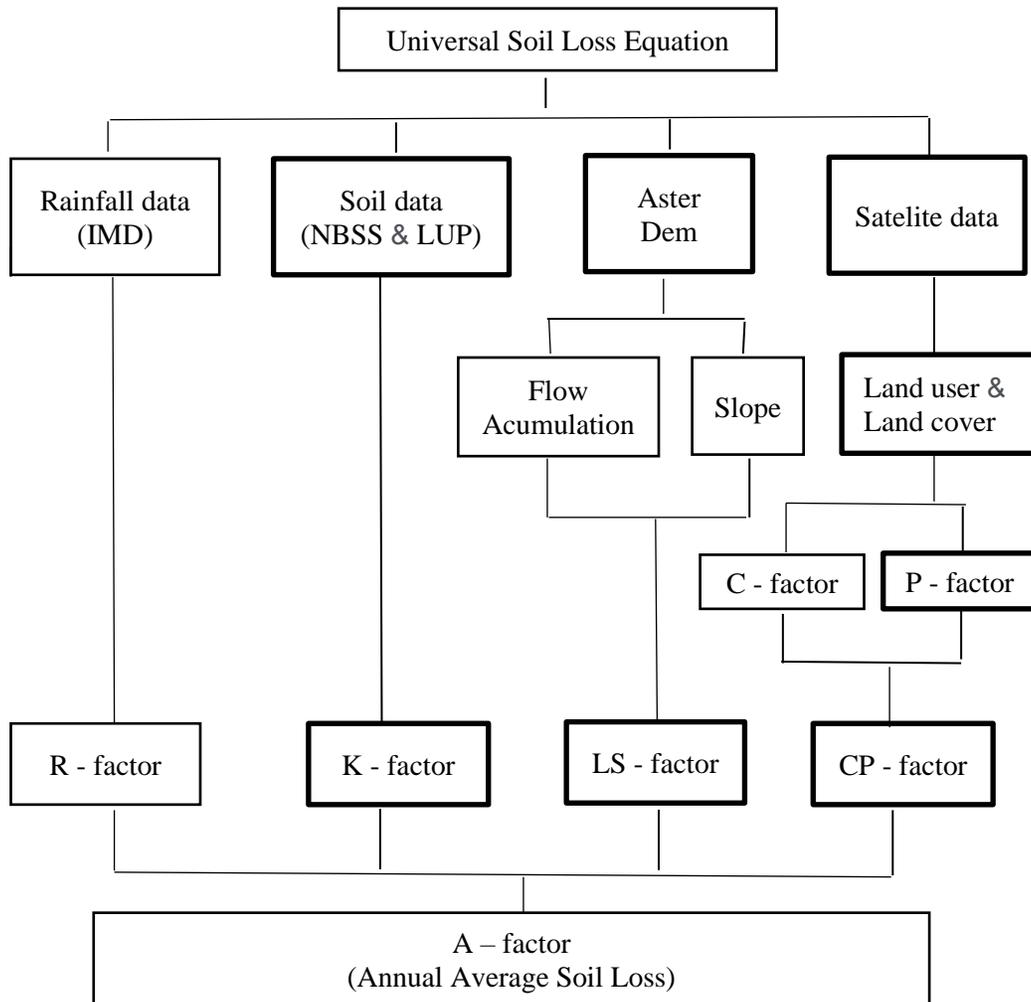
Además de la visualización características de las imágenes a ser interpretadas por variables características como los colores, tonos, patrones especiales.

3.3.10. Corrección geométrica

Todo esto nos da una imagen tipo ráster, en la cual se observa una gama y paleta de colores las cuales hacen referencia a la cobertura vegetal, suelos con coberturas vegetal media y la alta cobertura vegetal.

3.4. Metodología para el cálculo de riesgos de erosión

Figura #7



WISCHMEIER, W. H., C. B. JONSON, and B. V. CROSS. (1971).

Factor R = Erosividad de la lluvia.

Factor K= Erosionabilidad del suelo.

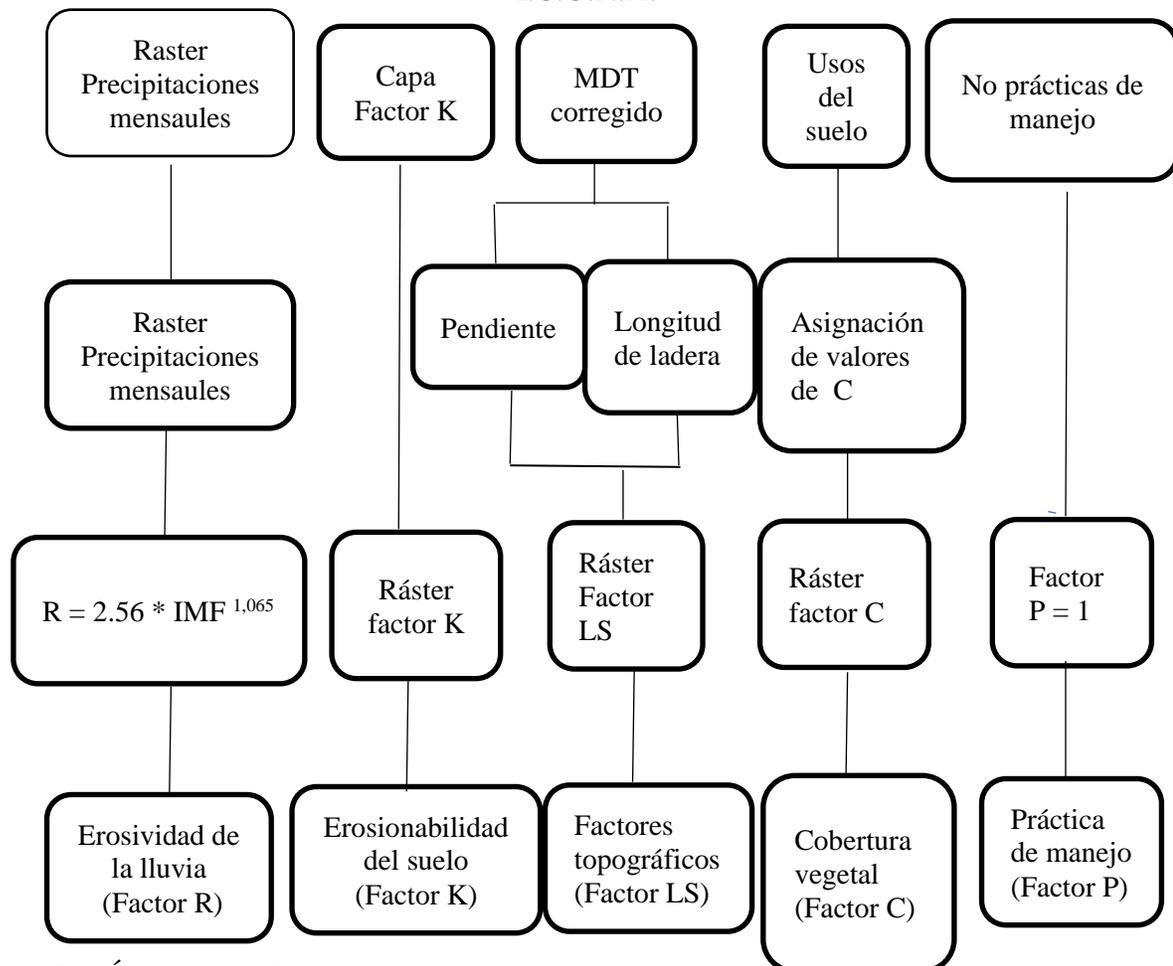
Factor S= Grado o pendiente.

Factor L= Longitud.

Factor C= Indice de la cobertura vegetal.

Factor P= Practicas de manejo.

Figura #8
I.C.O.N.A.



BENÍTEZ, J. CASTELLANOS, A. (2003).

Este trabajo se aplica mediante el manejo de sistemas de información geográficos SIG con una variante técnica de proceso de imágenes, para determinar conclusiones mediante la visualización y análisis de la cartografía y la lectura interpretadora de las mismas.

En torno a los riesgos de erosión en general en las diversas partes de la subcuenca, se debe considerar que la geología, pendiente deben ser los mismos ya que para que exista un cambio significativo en los mismos tiene que ser un transcurso mayor de años, en cuanto a la vegetación se toma el respectivo año del cual se realiza el estudio además de las precipitaciones.

En cuanto a la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) en ArcGIS se trabaja de manera personal cada factor de la fórmula con su ráster.

3.4.1. Factor R de erosividad de lluvia

El factor de Erosividad (R) representa la capacidad de la lluvia para producir erosión. Se calculó en base a la energía cinética de la precipitación, que es en definitiva la energía capaz de desagregar el suelo en las partículas individuales que posteriormente serán transportadas por la salpicadura o por la escorrentía, la erosión generada por una tormenta es directamente proporcional al producto de la energía cinética de la tormenta por su intensidad (EI). La relación es lineal, y el efecto aditivo Ibáñez Asensio, Moreno R. & Gisbert B, (2010).

La Erosividad R, se calculó para un periodo anual en el que se estimó la energía de una lluvia promedio de la cuenca y la intensidad máxima para 30 minutos de lluvia que sea típica en la microcuenca, y a su vez se determinó la cantidad de eventos de lluvia erosiva (según Wischmeier & Smith, se considera como evento de lluvia erosiva a una precipitación igual o mayor a 13,7mm, durante un lapso no mayor a 6 horas entre el evento anterior y posterior) promediadas para un año, todo esto en base a un análisis exhaustivo a datos meteorológicos de la Estación Yesera dependiente del SENAMHI, para poder ser adaptados a la fórmula general:

$$R = \frac{\sum(EI30)}{N}$$

Donde: E: Total de Energía cinética de todos los eventos de lluvia (MJ/m²).

I30: Intensidad Máxima de lluvia para 30 minutos (mm/hr).

N: Número de datos obtenidos.

Donde se estima la energía cinética que reemplaza a la de Wischmeier (1958), debido a que está basada en más datos y funciona mejor a bajas intensidades:

$$E = \sum e$$

$$e = 0,29 * [1 - 0,72 * \exp(-0.05(I))]$$

Donde:

e = energía de un evento de lluvia (Mj/Ha.mm)

I = Intensidad promedio de un evento de lluvia diaria (mm/hr).

Por lo que primero se obtuvo el dato para una Intensidad promedio: Para determinar la Intensidad promedio de un evento de lluvia diaria se procedió a analizar los datos del SISMET – SENAMHI para el periodo de estudio 1977-2017, obteniendo una precipitación media multianual de 665.6mm.

Se realizó el cálculo para las estaciones de Yesera Norte y Yesera Sur, obteniendo:

Cuadro #1

| | Yesera Norte | Yesera Sur |
|------------|---------------------|-------------------|
| I(24hrs) | 2.1600000 | 1.7000000 |
| N(Ev) | 36 | 36 |
| e | 0.10257536 | 0.09821464 |
| $E=\sum e$ | 3.69271288 | 3.53572686 |

La intensidad máxima para 24hrs, se obtuvo a partir de las precipitaciones máximas diarias por hora, mientras que N hace referencia al número máximo de datos disponibles.

La determinación de la Intensidad máxima en 30 min se debe realizar con un análisis de los datos pluviográficos que muestran a detalle el comportamiento de las lluvias durante intervalos de 5 minutos de medición, la mayoría de las estaciones meteorológicas no cuenta con estos equipos (mayormente se cuenta con pluviómetros), en el caso de la microcuenca se contó sólo con datos pluviométricos de la Estación FFAA Río Roboré dependiente del SENAMHI:

- Precipitación media diaria.
- Precipitación máxima (24h).
- Precipitación media mensual, anual.

Por lo que se optó por determinar una Intensidad I30 de diseño, en base a los datos de precipitación máxima (24h), mediante el modelo estadístico de distribución de

probabilidades para valores extremos Gumbel.

a) Precipitación máxima de diseño (24h) con Gumbel.

En Hidrología, las precipitaciones o caudales anuales suelen ajustarse a la distribución simétrica de Gauss, pero los valores máximos si se considera el día más caudaloso o el más lluvioso de cada año de una serie larga de años (eso es necesario para estudiar la previsión de inundaciones, por ejemplo), no se ajustarán a Gauss, sino probablemente a la campana asimétrica descrita por Gumbel o alguna similar como la distribución

Log – Pearson III, o Log – Normal.

La fórmula de Gumbel está dada por:

$$F(x) = e^{-e^{-b}}$$

Siendo T:

$$b = (f(x)/\lambda)/\ln\theta$$

Despejando T:

$$b = -\ln(-\ln(f(x)/\lambda))/\theta$$

λ y θ son parámetros adicionales de Gumbel en función de la media y la varianza de los datos utilizados del periodo 1987 - 2016:

$$\theta = \pi/\sqrt{6} * \text{VAR}$$

$$\lambda = eXm * \theta - 0.5772$$

Donde:

b = valor Gumbel para determinada probabilidad

f(x) f(x) = función de probabilidad 1 – (1/Tiempo de retorno)

VAR = Varianza Precipitación máxima (24h)

Xm = Media aritmética Precipitación máxima (24h)

Se calculó la probabilidad f(x) como la inversa del periodo de retorno para 2, 3, 5, 10, 20, 30,50, 75, 100, 200, 300, 500 años y se utilizaron estos datos para calcular el valor Gumbel en función de las probabilidades, que representa a la Precipitación máxima en (24hrs) para TR años, de los cuales los valores para un Tiempo de retorno TR de 10 y

30 años son los que se tomaron en cuenta para cálculos posteriores.

Cuadro #2

| PARÁMETROS GUMBEL (Estación Yesera Norte) | | |
|---|-------|----------|
| TR | F(X) | PPmax(T) |
| 2 | 0.500 | 49.55 |
| 3 | 0.667 | 54.16 |
| 5 | 0.800 | 59.28 |
| 10 | 0.900 | 65.73 |
| 20 | 0.950 | 71.91 |
| 30 | 0.967 | 75.47 |
| 50 | 0.980 | 79.91 |
| 75 | 0.987 | 83.42 |
| 100 | 0.990 | 85.91 |
| 200 | 0.995 | 91.88 |
| 300 | 0.997 | 95.37 |
| 500 | 0.998 | 99.77 |

b) Intensidad máxima de diseño para un tiempo menor a 24 horas (T < 24h)

Para determinar la Intensidad máxima para 24h de la tormenta de diseño, se usó la formulación propuesta por Varas (1996) en base a la ecuación de Bell (1969) que solo es válida para periodos entre $1h < T < 24h$:

$$\frac{P^T}{t} = 1,1 PD^{10} CD^t CF^T$$

Donde:

$\frac{P^T}{t}$ = Lluvia de diseño con período de retorno de T años y duración t horas.

PD^{10} = Precipitación máxima diaria para un periodo de retorno.

$T = 10$ años.

CD^t = Coeficiente de duración para t horas (entre 1 y 24 horas).

CF^T = Coeficiente de frecuencia para T años de período de retorno.

A su vez, para CD^t se utilizó los valores recomendados por la USBR-United States Bureau Of Reclamation (1967) para duraciones entre 1 y 24 horas, como se detalla en la tabla:

Coeficiente de Duración (CD) para tiempos [1-24h]

Cuadro #3

| t(h) | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 18 | 24 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|----|
| CD | 0,15 | 0,26 | 0,44 | 0,59 | 0,66 | 0,78 | 0,82 | 0,86 | 0,1 | 1 |

Fuente: USBR (1965)

Y para determinar el Coeficiente de Frecuencia (CF^T) se utilizó la fórmula propuesta por Bell (1969):

$$CF^T = 0.35 \ln T + 0.76$$

Una vez determinados los coeficientes de duración y frecuencia, se calculó:

P^T ($T = 10$ años, $t = 1$ hora).

c) Intensidad Máxima de Diseño para tiempos menores a una hora ($t < 1$ hora)

Estudió las razones entre lluvias de distintas duraciones e igual frecuencia o períodos de retorno y también la razón entre lluvias de diferentes períodos de retorno e igual duración, utilizando datos de un gran número de estaciones ubicadas en una extensa zona geográfica, que incluyó Estados Unidos de América, Hawaii, Australia, Rusia, Alaska, Puerto Rico y África. Los resultados obtenidos son válidos para lluvias provenientes de tormentas de tipo convectivo con duraciones entre 10 minutos y 2 horas Varas C (1996).

Los coeficientes de duración y de frecuencia propuestos por Bell cumplen las siguientes relaciones, válidas para duraciones de lluvia entre 5 minutos y dos horas y para períodos de retorno entre 2 y 100 años:

$$CF^T = 0,21 \ln T + 0,52$$

En lo que respecta al Coeficiente de duración CD, para tiempos menores de 60 min la World Meteorological Organization WMO en 2009 (Organización Meteorológica Mundial, por sus siglas en inglés) propone ciertos valores para determinados t(min), que son similares a los propuestos por Bell a partir de su ecuación de CF para t<60min, donde:

$$CD^t = 0,54t^{0.25} - 0,50$$

Determinación del Coeficiente de duración (CD) para tiempo menor a 60 min.

Cuadro #4

| Coeficiente de Duración CD para tiempos <1h | | | | | | |
|---|------|------|-------------|------|------|------|
| t(min) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| CD(WMO) | 0,32 | 0,54 | 0,71 | 0,82 | 0,91 | 1 |
| <i>t</i> ^{0.25} | 1,78 | 2,11 | 2,34 | 2,51 | 2,66 | 2,78 |
| CD(Bell) | 0,46 | 0,64 | 0,76 | 0,86 | 0,94 | 1,00 |

Se utilizó el valor obtenido por la ecuación de Bell para CD y CF, además del valor de la Precipitación máx de diseño para T=10 años y t=1hora(60min) que requiere la siguiente ecuación para Intensidades Máximas en 30 minutos:

$$\frac{PT}{t} = CFT^T CD^t \frac{P_{60}^{10}}{60}$$

Donde:

PT= Lluvia de diseño con período de retorno de T años y duración t min.

CFT= Coeficiente de frecuencia para T años de período de retorno.

CDt= Coeficiente de duración para t minutos (entre 10 y 60min).

P_{60}^{10} = Precipitación máx diaria para un periodo de retorno T = 10años y un tiempo t=60min

Así mismo, de la tabla anterior se determinó que la Precipitación máx. para un periodo de retorno de 30 años y un tiempo de 30 minutos es de **10.26 mm/30min**, pero traduciendo esta intensidad a unidades enteras de hora:

Utilizando la fórmula de Intensidad:

$$i = \frac{P_{max}}{t(hr)} = \frac{10.26}{30/60} = 20.52 \text{ mm/hr}$$

Cuadro #5

| PARÁMETROS GUMBEL (Estación Yesera Norte) | | | (ln T) para Bell | CF(T) para P<120min | CF(T)<24hrs | Métodos para Pmax(<24hrs) | |
|--|-------|----------|---------------------|------------------------|-------------|------------------------------|--------|
| TR | F(X) | PPmax(T) | lnT | CF(T) | CF(T) | P(T,t) | P(T,t) |
| 2 | 0.500 | 49.55 | 0.6931 | 0.67 | 1.00 | 7.43 | 8.20 |
| 3 | 0.667 | 54.16 | 1.0986 | 0.75 | 1.14 | 8.12 | 8.97 |
| 5 | 0.800 | 59.28 | 1.6094 | 0.86 | 1.32 | 8.89 | 9.82 |
| 10 | 0.900 | 65.73 | 2.3026 | 1.00 | 1.57 | 9.86 | 10.88 |
| 20 | 0.950 | 71.91 | 2.9957 | 1.15 | 1.81 | 10.79 | 11.91 |
| 30 | 0.967 | 75.47 | 3.4012 | 1.23 | 1.95 | 11.32 | 12.50 |
| 50 | 0.980 | 79.91 | 3.9120 | 1.34 | 2.13 | 11.99 | 13.23 |
| 75 | 0.987 | 83.42 | 4.3175 | 1.43 | 2.27 | 12.51 | 13.81 |
| 100 | 0.990 | 85.91 | 4.6052 | 1.49 | 2.37 | 12.89 | 14.23 |
| 200 | 0.995 | 91.88 | 5.2983 | 1.63 | 2.61 | 13.78 | 15.21 |
| 300 | 0.997 | 95.37 | 5.7038 | 1.72 | 2.76 | 14.31 | 15.79 |
| 500 | 0.998 | 99.77 | 6.2146 | 1.83 | 2.94 | 14.96 | 16.52 |

Cuadro #6

| PARÁMETROS GUMBEL (Estación Yesera Sur) | | | (ln T) para Bell | CF(T) para P<120min | CF(T)<24hrs | Métodos para Pmax(<24hrs) | |
|--|-------|----------|------------------|------------------------|-------------|------------------------------|--------|
| TR | F(X) | PPmax(T) | lnT | CF(T) | CF(T) | P(T,t) | P(T,t) |
| 2 | 0.500 | 39.71 | 0.6931 | 0.67 | 1.00 | 5.96 | 6.58 |
| 3 | 0.667 | 42.62 | 1.0986 | 0.75 | 1.14 | 6.39 | 7.06 |
| 5 | 0.800 | 45.86 | 1.6094 | 0.86 | 1.32 | 6.88 | 7.59 |
| 10 | 0.900 | 49.93 | 2.3026 | 1.00 | 1.57 | 7.49 | 8.27 |
| 20 | 0.950 | 53.84 | 2.9957 | 1.15 | 1.81 | 8.08 | 8.91 |
| 30 | 0.967 | 56.08 | 3.4012 | 1.23 | 1.95 | 8.41 | 9.29 |
| 50 | 0.980 | 58.89 | 3.9120 | 1.34 | 2.13 | 8.83 | 9.75 |
| 75 | 0.987 | 61.11 | 4.3175 | 1.43 | 2.27 | 9.17 | 10.12 |
| 100 | 0.990 | 62.68 | 4.6052 | 1.49 | 2.37 | 9.40 | 10.38 |
| 200 | 0.995 | 66.45 | 5.2983 | 1.63 | 2.61 | 9.97 | 11.00 |
| 300 | 0.997 | 68.66 | 5.7038 | 1.72 | 2.76 | 10.30 | 11.37 |
| 500 | 0.998 | 71.43 | 6.2146 | 1.83 | 2.94 | 10.71 | 11.83 |

Cuadro #7

Erosividad R por estación:

| Factor R, Erosividad | Yesera norte | Yesera Sur |
|----------------------|--------------|------------|
| I(24hrs) | 2.1600000 | 1.7000000 |
| N(Ev) | 36 | 36 |
| e | 0.10257536 | 0.09821464 |
| $E=\sum e$ | 3.69271288 | 3.53572686 |
| I30(30,30) | 20.520383 | 15.588104 |
| EI30 | 75.7758835 | 55.1152792 |
| R(anual) | 2727.9318 | 1984.15005 |

Los procedimientos anteriormente descritos fueron desarrollados para dos estaciones de la microcuenca de estudio, para posteriormente realizar una interpolación mediante Distancia Inversa Ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) mediante software SIG que distribuya los datos de erosividad (R) según la influencia y cercanía de cada estación en la microcuenca.

En torno al cálculo del índice de erosividad de la lluvia se toma la información pluviométrica en específico de la estación meteorológica la cual precedentemente se lleva a Excel, donde se aplica Join para la obtención de shape con los datos de la subcuenca. La unión se hace siempre mediante un campo común entre la capa y la tabla (archivo) que se van a unir.

Continuando primero se ha de elegir campo de la capa en el que se basa la unión a continuación indicamos la tabla que queremos unir si queremos otorgar mayor importancia a los puntos más cercanos, asignaremos valores de potencia altos y obtendremos como resultado una superficie más detallada; por el contrario, al asignar valores de potencia más bajos indicamos mayor influencia de los puntos más alejados dando como resultado una superficie más suavizada.

3.4.2. Factor K de Erosionabilidad del suelo

El factor erodabilidad del suelo refleja la vulnerabilidad del suelo a la erosión y se calcula en base a sus propiedades físicas.

Se dispone de una capa vectorial la cual contiene una estimación de estos valores, todo esto debe ser llevado a ráster, mediante el ArcToolbox en el campo a ser representado, todo eso es indicado a la salida con su respectivo nombre.

para el presente estudio se utilizó el modelo Calculador de Impacto Erosión-Productividad (EPIC, por sus siglas en inglés) que demanda los porcentajes de carbón orgánico, de arena, limo y arcilla, de la capa superficial del suelo, misma que se expresa mediante cuatro términos que relacionan las variables mencionadas también por el nomograma, es decir: contenido de arena, limo, arcilla, y contenido de materia orgánica.

La ecuación del modelo EPIC que reemplaza al nomograma se detalla a continuación:

$$K = Te1 * Te2 * Te3 * Te4$$

Donde:

$$Te1 = [0.2 + 0.3 * e^{-0.0256 * \frac{SAN(1 - \frac{SIL}{100})}{100}}]$$

$$Te2 = \left(\frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3}$$

$$Te3 = \left(1 - \frac{0.25 * C}{C + e^{(3.72 - 2.95 * C)}} \right)$$

$$Te4 = \left(1 - \frac{0.7 * SN1}{SN1 + e^{(-5.51 + 22.9 * SN1)}} \right)$$

Y a su vez:

SAN = Porcentaje de arena.

SIL= Porcentaje de limo.

CLA= Porcentaje de arcilla.

C = Porcentaje de carbón orgánico.

Así mismo SN1 (Relación factor de arena), que se encuentra en la ecuación Te4 se calcula a partir del porcentaje de arena con la relación siguiente:

$$SN1 = 1 - (SAN/100)$$

La expresión de arena gruesa en “Te1” de la ecuación EPIC es simplemente la diferencia entre la arena y la arena fina estimada; “Te2” reduce K para suelos que tienen altas proporciones de arcilla a limo; “Te3” reduce K para suelos con alto contenido de carbono orgánico.; “Te4” reduce K aún más para suelos con contenidos de arena extremadamente altos (SAN > 70%).

Los porcentajes de composición de suelo de arena, limo, arcilla y carbono orgánico C.O. se obtuvieron a partir de los datos de análisis de perfiles de suelo que se utilizaron para hacer el estudio Realidad de los suelos en el departamento de Tarija del Viceministerio de Tierras. Noviembre, 2017. En el que se usaron 5 de los 6 perfiles presentados dado que estos se encuentran en la cuenca de Yesera.

Cuadro #8

| Nº | ÁREA DE MUESTREO | Nº DE PERFIL | COMUNIDAD | X | Y | Z |
|----|------------------|--------------|---------------|--------|---------|------|
| 9 | 3 | P1 | Yesera Norte | 316646 | 7619340 | 2239 |
| 10 | | P2 | Yesera Norte | 338644 | 7634966 | 2317 |
| 11 | | P3 | Yesera Centro | 338775 | 7630722 | 2187 |
| 12 | | P4 | Yesera Centro | 338441 | 7629494 | 2175 |
| 13 | | P5 | Yesera Sud | 334331 | 7626804 | 2135 |
| 14 | | P6 | Yesera Sud | 337703 | 7626642 | 2126 |

Cuadro #9

| PERFIL | COM | X | Y | MO | A | L | Y |
|--------|---------------|--------|---------|------|-------|------|-------|
| P2 | Yesera Norte | 338644 | 7634966 | 1.86 | 12.25 | 33.5 | 54.25 |
| P3 | Yesera Centro | 338775 | 7630722 | 2.32 | 22.25 | 36 | 41.75 |
| P4 | Yesera Centro | 338441 | 7629494 | 3.25 | 47.25 | 21 | 31.75 |
| P5 | Yesera Sud | 334331 | 7626804 | 0.53 | 24.75 | 46 | 29.25 |
| P6 | Yesera Sud | 337703 | 7626642 | 0.4 | 19.75 | 43.5 | 36.75 |

3.4.3. Factor S Grado o pendiente

Considerando que la pendiente debe ser calcula en grados por sus datos, esto debe ser transformado en radianes para su uso. Es necesario un mapa de tierras en el cual se realizará los cálculos, con ayuda de ArctoolBoox atraviesa un proceso de transformación respectiva hasta Slope, al cual se le asigna un nombre de salida.

Este proceso nos permite calcular en grados o porcentaje, pero la fórmula USLE necesita que sea en radianes, esto representara la subcuenca, arroyos y rellenara sumideros en caso de su existencia.

3.4.4 Factor L Longitud

Continuando el factor L se realiza a través de ráster de acumulación de flujo, donde son representadas las celdas en las que se acumula el agua al fluir desde las celdas con mayor altitud. Se aplica los pasos:

Relleno de sumideros o un conjunto de celdas conectadas a las que no se le puede asignar dirección de flujo donde se especifica que es el "Fill" ya que este ráster es el que tiene los sumideros corregidos, donde nos dará 8 valores posibles.

Se prosigue a considerar las altitudes de cada celda, donde continua el flujo y asigna un valor concreto se obtiene la dirección que seguirá el flujo y se le asigna un valor, obtenemos el mapa de direcciones de flujo de nuestra subcuenca. Se indica el mapa de direcciones a utilizar para el cálculo, se asigna el nombre, es ahí donde observamos en negro las zonas con una acumulación de flujo 0 (es decir, zonas donde no existe acumulación de flujo) y en blanco aquellas zonas donde sí se produce la acumulación. Este permite conocer cuáles son las celdas en las que se acumula el agua al fluir desde las celdas con mayor valor de altitud. Así, las celdas con acumulación de flujo altas serán áreas donde el flujo se concentra, y las celdas con valores de acumulación de flujo igual a 0 serán alturas topográficas locales.

3.4.5. Factor LS de Longitud y Grado de la pendiente

Volvemos a la fórmula de cálculo del factor:

$$LS = \frac{(Flow\ accumulation \cdot cell\ size/22,13)^{0,4}}{\cdot (sin\ slope/0,0896)^{1,3}}$$

En la fórmula hay que multiplicar la acumulación de flujo por el tamaño de la celda lo que representa la longitud de escurrimiento.

Para la obtención de la capa A y B se modifica valores ráster donde se aplica álgebra de mapas y se agrupa los valores en 2 categorías; Fac < 5, es decir de 0 a 5, Fac > 5, es decir de 5 al valor máximo que toma el ráster original, donde la categorización son valor 1 son aquellas celdas cuyo Fac era 5 y el valor 0 son aquellas que presentaban Fac, en la capa b solo se tiene un cambio se dará valor de "0" a aquellos que estaban por debajo de 5 y un valor de 5 a todos aquellos que estaban por encima, eso da la capa final para calcular el factor y con la calculadora se obtiene el LS, como tendremos que usar la última capa que hemos obtenido (la que contiene la acumulación de flujo limitada a un máximo de 5 celdas) y como tendremos que utilizar la capa que contiene la pendiente en radianes. Por último, asignaremos un nombre al ráster de salida.

3.4.6. Factor C de Índice de cobertura vegetal

Este indica la efectividad cobertura de la vegetación para el suelo frente a la energía de impacto con la lluvia y fuerza de flujo superficial. Se tiene una capa vectorial que contiene polígonos con información del uso del suelo a lo que se procede a obtener el ráster.

3.4.7 Factor P Prácticas de manejo

Prácticas de manejo (P) en la zona de estudio no hay tipos de manejo por ende no es necesario crear un ráster que represente el factor donde se utilizara el valor 1 como

representación de no existir estudios.

3.5 Aplicación de la ecuación USLE

La ecuación de pérdida de suelo USLE como se conoce considera las pérdidas anuales de suelo A [t/ha. año] se calculan en base al índice de erosividad de la lluvia R, la erosionabilidad del suelo K, el factor topográfico producto de los factores longitud de la ladera L y su pendiente S, el factor de cubierta vegetal C y el factor de prácticas de conservación de suelos P, al disponemos del ráster de cada uno de los factores se aplica la ecuación para obtener la pérdida de suelo que se produce en la subcuenca, a clasificar a través de una tabla.

Cuadro #10

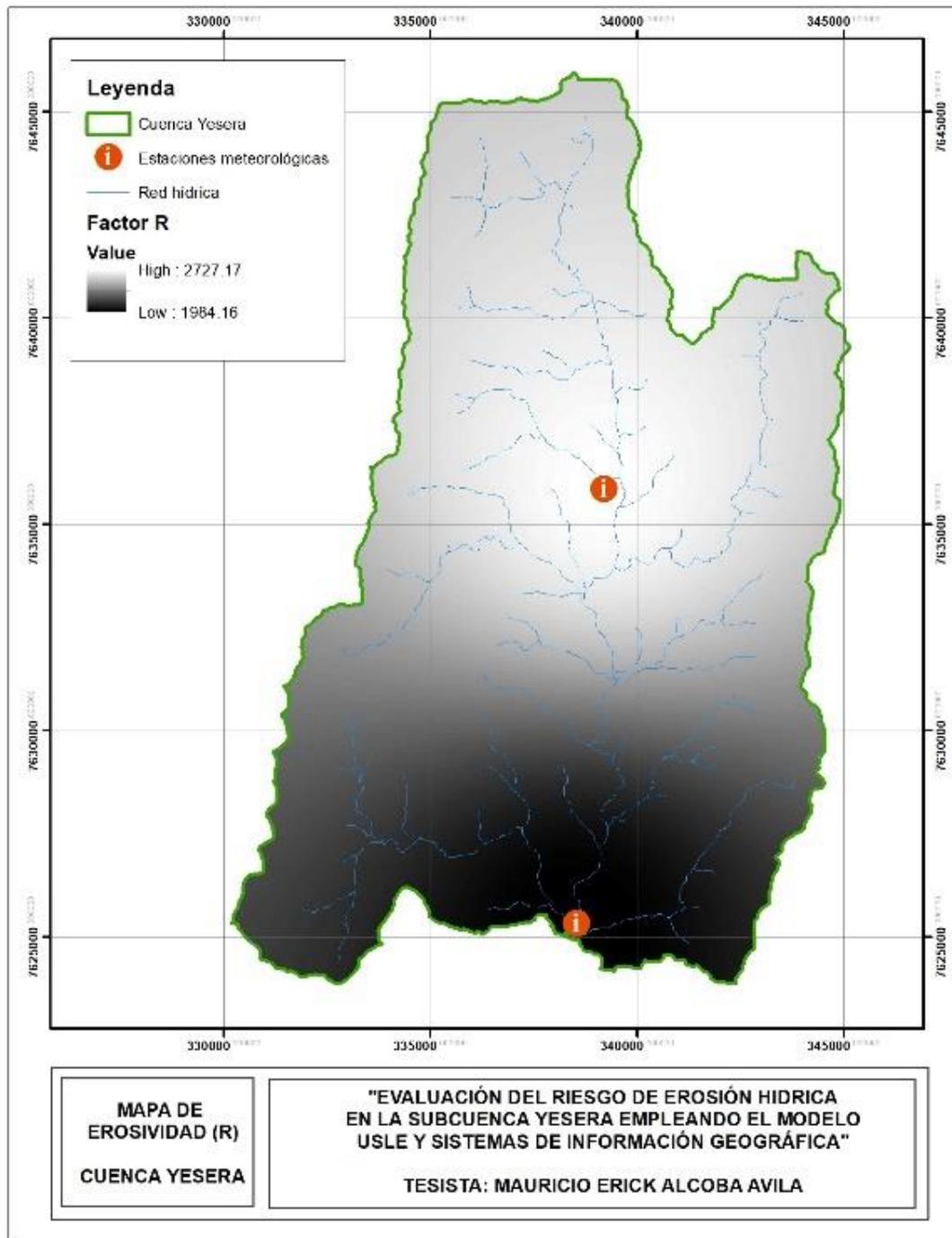
«Mapa del grado de erosión Hídrica de los suelos de la CAPV»

| Pérdidas de suelo (t/ha. Año). | Interpretación |
|--------------------------------|--|
| 0 | Zonas no susceptibles al proceso erosivo como puedan ser espacios urbanos, carreteras, embalses, etc. |
| 0 – 5 | Zonas con niveles de erosión muy bajos y perdidas de suelo tolerables. No hay erosión neta. |
| 5 – 10 | Zonas con niveles de erosión bajos y perdidas de suelo que pueden ser tolerables. Probablemente no hay erosión neta. |
| 10 – 25 | Zonas con procesos erosivos leves. Existe erosión, aunque no es apreciable a simple vista. |
| 25 – 50 | Zonas con procesos erosivos moderados. Existe erosión, aunque puede no ser apreciable a simple vista. |
| 50 – 100 | Zonas con procesos erosivos grave. Existe erosión y es apreciable a simple vista. |
| 100– 200 | Zonas con procesos erosivos muy graves. Existe erosión y es manifiesta a simple vista. |
| >200 | Zonas con procesos erosivos extremos. Existe erosión y es evidente a simple vista. |

Capítulo IV Resultados

4.1.1. Factor R

Figura #9



El factor R El factor de Erosividad (R) representa la capacidad de la lluvia para producir erosión. Se calcula en base a la energía cinética de la precipitación, que es en definitiva la energía capaz de desagregar el suelo en las partículas individuales que posteriormente serán transportadas por la salpicadura o por la escorrentía, la erosión generada por una tormenta es directamente 59 proporcional al producto de la energía cinética de la tormenta por su intensidad (EI). Se pudo evidenciar que la intensidad de las lluvias en base a los parámetros de diseño y las fórmulas de diseño de tormentas de Gumbell es mayor en la parte alta de la cuenca, es decir en Yesera Norte, donde se estima una Erosividad (r) de 2727 $Mj/m^2*mm*hr$ mientras que en Yesera Sur se calculó una Erosividad (r) de 1984,16.

Cuadro # 11

| Cod Est. | Nombre | Dep | Prov | Lat | Long | m.s.n.m | Tipo | factor_r |
|----------|--------------|--------|---------|---------|----------|---------|----------------------------|----------|
| 291 | Yesera Norte | Tarija | Cercado | 21.3722 | -64.5508 | 2267 | Meteorológica de 3er Orden | 2727.18 |
| 292 | Yesera Sur | Tarija | Cercado | 21.4672 | -64.5583 | 2092 | Meteorológica de 3er Orden | 1984.16 |

Ministerio de Medio Ambiente y Agua, (2019).

La Erosividad R, se calculó para un periodo anual en el que se estimó la energía de una lluvia promedio de la cuenca y la intensidad máxima para 30 minutos de lluvia que sea típica en la microcuenca, y a su vez se determinó la cantidad de eventos de lluvia erosiva, donde se considera como evento de lluvia erosiva a una precipitación igual o mayor a 13,7mm, durante un lapso no mayor a 6 horas entre el evento anterior y posterior, promediadas para un año, todo esto en base a un análisis exhaustivo a datos meteorológicos de la Estación Yesera dependiente del SENAMHI, para poder ser adaptados a la fórmula general:

$$R = \sum (EI30)iN$$

Donde: E: Total de Energía cinética de todos los eventos de lluvia (MJ/m^2).

I30: Intensidad Máxima de lluvia para 30 minutos (mm/hr).

N: Número de datos obtenidos.

La Energía cinética E, a su vez se calculó mediante la fórmula propuesta por

Wischmeier y actualizada para RUSLE por Brown y Foster (1987) quienes desarrollaron una ecuación para 60 estimar la energía cinética que reemplaza a la de Wischmeier (1958), debido a que está basada en más datos y funciona mejor a bajas intensidades:

$$E = \sum e$$

$$e = 0,29 * (1 - 0,72 * \exp(-0.05(I)))$$

Donde: e = energía de un evento de lluvia (Mj/Ha.mm) I = Intensidad promedio de un evento de lluvia diaria (mm/hr). Por lo que primero se obtuvo el dato para una Intensidad promedio: Para determinar la Intensidad promedio de un evento de lluvia diaria se procedió a analizar los datos del SISMET – SENAMHI para el periodo de estudio 1977-2017, obteniendo una precipitación media multianual de 665.6mm.

Se realizó el cálculo para las estaciones de Yesera Norte y Yesera Sur, obteniendo:

Cuadro #12

| | Yesera Norte | Yesera Sur |
|-------------|---------------------|-------------------|
| I(24hrs) | 2.1600000 | 1.7000000 |
| N(Ev) | 36 | 36 |
| e | 0.10257536 | 0.09821464 |
| E= $\sum e$ | 3.69271288 | 3.53572686 |

La intensidad máxima para 24hrs, mientras que N hace referencia al número máximo de datos disponibles.

En Hidrología, las precipitaciones o caudales anuales suelen ajustarse a la distribución simétrica de Gauss, pero los valores máximos si se considera el día más caudaloso o el más lluvioso de cada año de una serie larga de años (Eso es necesario para estudiar la previsión de inundaciones, por ejemplo), que se ajusta a la campana asimétrica descrita por Gumbel o alguna similar como la distribución

Log – Pearson III, o Log – Normal.

La fórmula de Gumbel está dada por:

$$F(x) = e^{-e^{-b}}$$

Siendo T:

$$b = (f(x)/\lambda)/\ln\theta$$

Despejando T:

$$b = -\ln(-\ln(f(x)/\lambda)/\theta)$$

λ y θ son parámetros adicionales de Gumbel en función de la media y la varianza de los datos utilizados del periodo 1987 - 2016:

$$\theta = \pi/\sqrt{6} * \text{VAR}$$

$$\lambda = eXm * \theta - 0.5772$$

Donde:

b = valor Gumbel para determinada probabilidad f(x)

f(x) = función de probabilidad $1 - (1/\text{Tiempo de retorno})$

VAR = Varianza Precipitación máxima (24h)

Xm = Media aritmética Precipitación máxima (24h)

Cuadro #13

| | Yesera Norte | Yesera Sur |
|-----------|--------------|------------|
| PROM | 51.360 | 40.8533333 |
| VAR | 121.323 | 48.4155238 |
| Θ | 0.116439969 | 0.18432402 |
| λ | 222.1064562 | 1046.33679 |

Se calculó la probabilidad f(x) como la inversa del periodo de retorno para 2, 3, 5, 10, 20, 30,

50, 75, 100, 200, 300, 500 años y se utilizaron estos datos para calcular el valor Gumbel en función de las probabilidades, que representa a la Precipitación máxima en (24hrs) para TR años, de los cuales los valores para un Tiempo de retorno TR de 10 y 30 años son los que se tomaron en cuenta para cálculos posteriores.

Cuadro#14

| PARÁMETROS GUMBEL (Estación Yesera Norte) | | |
|---|-------|----------|
| TR | F(X) | PPmax(T) |
| 2 | 0.500 | 49.55 |
| 3 | 0.667 | 54.16 |
| 5 | 0.800 | 59.28 |
| 10 | 0.900 | 65.73 |
| 20 | 0.950 | 71.91 |
| 30 | 0.967 | 75.47 |
| 50 | 0.980 | 79.91 |
| 75 | 0.987 | 83.42 |
| 100 | 0.990 | 85.91 |
| 200 | 0.995 | 91.88 |
| 300 | 0.997 | 95.37 |
| 500 | 0.998 | 99.77 |

Cuadro #15

| PARÁMETROS GUMBEL (Estación Yesera Sur) | | |
|--|-------|----------|
| TR | F(X) | PPmax(T) |
| 2 | 0.500 | 39.71 |
| 3 | 0.667 | 42.62 |
| 5 | 0.800 | 45.86 |
| 10 | 0.900 | 49.93 |
| 20 | 0.950 | 53.84 |
| 30 | 0.967 | 56.08 |
| 50 | 0.980 | 58.89 |
| 75 | 0.987 | 61.11 |
| 100 | 0.990 | 62.68 |
| 200 | 0.995 | 66.45 |
| 300 | 0.997 | 68.66 |
| 500 | 0.998 | 71.43 |

a) Intensidad máxima de diseño para un tiempo menor a 24 horas (T < 24h).

Para determinar la Intensidad máxima para 24h de la tormenta de diseño, se usó la formulación propuesta por Varas (1996) en base a la ecuación de Bell (1969) que solo es válida para periodos entre $1h < T < 24h$:

$${}_t P^T = 1,1 PD^{10} CD^t CF^T$$

Donde:

${}_t P^T$ = Lluvia de diseño con período de retorno de T años y duración t horas.

PD^{10} = Precipitación máxima diaria para un periodo de retorno.

T = 10años.

CD^t = Coeficiente de duración para t horas (entre 1 y 24 horas).

CF^T = Coeficiente de frecuencia para T años de período de retorno.

A su vez, para CD^t se utilizó los valores recomendados por la USBR - United States Bureau Of Reclamation (1967) para duraciones entre 1 y 24 horas, como se detalla en la tabla:

Coefficiente de Duración (CD) para tiempos [1-24h]

Cuadro #16

| t(h) | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 18 | 24 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|----|
| CD | 0,15 | 0,26 | 0,44 | 0,59 | 0,66 | 0,78 | 0,82 | 0,86 | 0,1 | 1 |

Fuente: USBR (1965)

Y para determinar el Coeficiente de Frecuencia (CF^T) se utilizó la fórmula propuesta por Bell (1969):

$$CF^T = 0.35 \ln T + 0.76$$

Una vez determinados los coeficientes de duración y frecuencia, se calculó

$$\frac{P^T}{t} \quad (T=10 \text{ años}, t=1 \text{ hora})$$

b) Intensidad Máxima de Diseño para tiempos menores a una hora ($t < 1 \text{ hora}$)

Bell (1969) estudió las razones entre lluvias de distintas duraciones e igual frecuencia o períodos de retorno y también la razón entre lluvias de diferentes períodos de retorno e igual duración, utilizando datos de un gran número de estaciones ubicadas en una extensa zona geográfica, que incluyó Estados Unidos de América, Hawai, Australia, Rusia, Alaska, Puerto Rico y África. Los resultados obtenidos son válidos para lluvias provenientes de tormentas de tipo convectivo con duraciones entre 10 minutos y 2 horas (Varas C, 1996).

Los coeficientes de duración y de frecuencia propuestos por Bell cumplen las siguientes relaciones, válidas para duraciones de lluvia entre 5 minutos y dos horas y para períodos de retorno entre 2 y 100 años:

$$CF^T = 0,21 \ln T + 0,52$$

En lo que respecta al Coeficiente de duración CD, para tiempos menores de 60 min la World Meteorological Organization WMO en 2009 (Organización Meteorológica Mundial, por sus siglas en inglés) propone ciertos valores para determinados t(min), que son similares a los propuestos por Bell a partir de su ecuación de CF para $t < 60 \text{ min}$, donde:

$$CD^t = 0,54t^{0.25} - 0,50$$

Determinación del Coeficiente de duración (CD) para tiempo menor a 60 min.

Cuadro #17

| Coeficiente de Duración CD para tiempos <1h | | | | | | |
|---|------|------|-------------|------|------|------|
| t(min) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| CD(WMO) | 0,32 | 0,54 | 0,71 | 0,82 | 0,91 | 1 |
| t0.25 | 1,78 | 2,11 | 2,34 | 2,51 | 2,66 | 2,78 |
| CD(Bell) | 0,46 | 0,64 | 0,76 | 0,86 | 0,94 | 1,00 |

Se utilizó el valor obtenido por la ecuación de Bell para CD y CF, además del valor de la Precipitación máx de diseño para: T=10 años y t=1hora(60min) que requiere la siguiente ecuación para Intensidades Máximas en 30 minutos:

$$\frac{P^T}{t} = CF^T CD^t \frac{P_{60}^{10}}{60}$$

Donde:

P^T = Lluvia de diseño con período de retorno de T años y duración t min.

CF^T = Coeficiente de frecuencia para T años de período de retorno.

CD^t = Coeficiente de duración para t minutos (entre 10 y 60min).

P_{60}^{10} = Precipitación máx diaria para un periodo de retorno.

T = 10años.

t = 60min.

Así mismo, de la tabla anterior se determinó que la Precipitación máx. para un periodo de retorno de 30 años y un tiempo de 30 minutos es de **10.26 mm/30min**, pero traduciendo esta intensidad a unidades enteras de hora:

Utilizando la fórmula de Intensidad:

$$i = \frac{P_{max}}{t(hr)} = \frac{10.26}{30/60} = 20.52 \text{ mm/hr}$$

Cuadro #18

| PARÁMETROS GUMBEL (Estación Yesera Norte) | | | (ln T) para Bell | CF(T) para P<120min | CF(T)<24hrs | Métodos para Pmax(<24hrs) | |
|--|-------|----------|---------------------|------------------------|-------------|------------------------------|--------|
| TR | F(X) | PPmax(T) | lnT | CF(T) | CF(T) | P(T,t) | P(T,t) |
| 2 | 0.500 | 49.55 | 0.6931 | 0.67 | 1.00 | 7.43 | 8.20 |
| 3 | 0.667 | 54.16 | 1.0986 | 0.75 | 1.14 | 8.12 | 8.97 |
| 5 | 0.800 | 59.28 | 1.6094 | 0.86 | 1.32 | 8.89 | 9.82 |
| 10 | 0.900 | 65.73 | 2.3026 | 1.00 | 1.57 | 9.86 | 10.88 |
| 20 | 0.950 | 71.91 | 2.9957 | 1.15 | 1.81 | 10.79 | 11.91 |
| 30 | 0.967 | 75.47 | 3.4012 | 1.23 | 1.95 | 11.32 | 12.50 |
| 50 | 0.980 | 79.91 | 3.9120 | 1.34 | 2.13 | 11.99 | 13.23 |
| 75 | 0.987 | 83.42 | 4.3175 | 1.43 | 2.27 | 12.51 | 13.81 |
| 100 | 0.990 | 85.91 | 4.6052 | 1.49 | 2.37 | 12.89 | 14.23 |
| 200 | 0.995 | 91.88 | 5.2983 | 1.63 | 2.61 | 13.78 | 15.21 |
| 300 | 0.997 | 95.37 | 5.7038 | 1.72 | 2.76 | 14.31 | 15.79 |
| 500 | 0.998 | 99.77 | 6.2146 | 1.83 | 2.94 | 14.96 | 16.52 |

Cuadro #19

| PARÁMETROS GUMBEL (Estación Yesera Sur) | | | (ln T) para Bell | CF(T) para P<120min | CF(T)<24hrs | Métodos para Pmax(<24hrs) | |
|--|-------|----------|------------------|------------------------|-------------|------------------------------|--------|
| TR | F(X) | PPmax(T) | lnT | CF(T) | CF(T) | P(T,t) | P(T,t) |
| 2 | 0.500 | 39.71 | 0.6931 | 0.67 | 1.00 | 5.96 | 6.58 |
| 3 | 0.667 | 42.62 | 1.0986 | 0.75 | 1.14 | 6.39 | 7.06 |
| 5 | 0.800 | 45.86 | 1.6094 | 0.86 | 1.32 | 6.88 | 7.59 |
| 10 | 0.900 | 49.93 | 2.3026 | 1.00 | 1.57 | 7.49 | 8.27 |
| 20 | 0.950 | 53.84 | 2.9957 | 1.15 | 1.81 | 8.08 | 8.91 |
| 30 | 0.967 | 56.08 | 3.4012 | 1.23 | 1.95 | 8.41 | 9.29 |
| 50 | 0.980 | 58.89 | 3.9120 | 1.34 | 2.13 | 8.83 | 9.75 |
| 75 | 0.987 | 61.11 | 4.3175 | 1.43 | 2.27 | 9.17 | 10.12 |
| 100 | 0.990 | 62.68 | 4.6052 | 1.49 | 2.37 | 9.40 | 10.38 |
| 200 | 0.995 | 66.45 | 5.2983 | 1.63 | 2.61 | 9.97 | 11.00 |
| 300 | 0.997 | 68.66 | 5.7038 | 1.72 | 2.76 | 10.30 | 11.37 |
| 500 | 0.998 | 71.43 | 6.2146 | 1.83 | 2.94 | 10.71 | 11.83 |

Cuadro #20

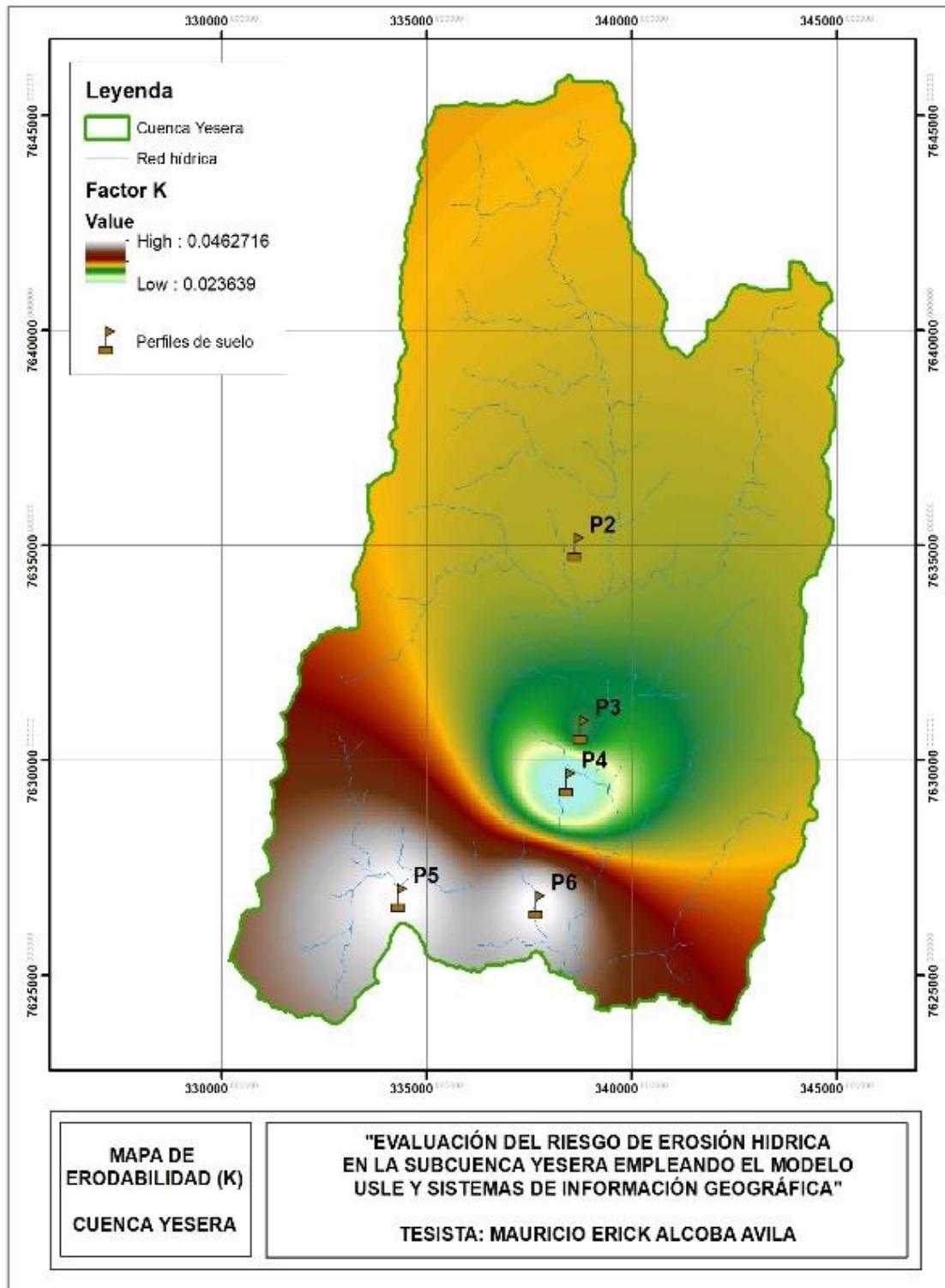
Erosividad R por estación:

| Factor R, Erosividad | Yesera norte | Yesera Sur |
|-------------------------|--------------|------------|
| I(24hrs) | 2.1600000 | 1.7000000 |
| N(Ev) | 36 | 36 |
| e | 0.10257536 | 0.09821464 |
| $E=\sum e$ | 3.69271288 | 3.53572686 |
| I30(30,30) | 20.520383 | 15.588104 |
| EI30 | 75.7758835 | 55.1152792 |
| R(anual) | 2727.9318 | 1984.15005 |

Los procedimientos anteriormente descritos fueron desarrollados para dos estaciones de la microcuenca de estudio, para posteriormente realizar una interpolación mediante Distancia Inversa Ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) mediante software SIG que distribuya los datos de erosividad (R) según la influencia y cercanía de cada estación en la subcuenca.

4.1.2. Factor K

Figura #10



Para el factor K, se trabajó con los perfiles P2 al P6 del estudio de suelos realizado por el Viceministerio de Tierras, para el departamento de Tarija, usando la formula EPIC que requiere los datos de Materia orgánica, arena, limo y arcilla, y luego posteriormente se usó el factor de conversión de Williams, del mismo obtuvo que los puntos P5 y P6 ubicados al sur de la cuenca presentan los valores más altos significando mayor potencial de retención de la erosión mientras que los puntos P2,P3 y P4 ubicados sobre el río principal al norte de la cuenca presentan un valor (k) menor.

Cuadro #21

| PERFIL | COM | X | Y | MO | A | L | Y | TEXT | SN1 | T1 | T2 | T3 | T4 | Factor k | k williams |
|--------|---------------|--------|---------|-----|------|----|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|------------|
| P2 | Yesera Norte | 338644 | 7634966 | 1.9 | 12.3 | 34 | 54.3 | Y | 0.8775 | 0.4435 | 0.7491 | 0.7710 | 1.0000 | 0.2562 | 0.0337 |
| P3 | Yesera Centro | 338775 | 7630722 | 2.3 | 22.3 | 36 | 41.8 | Y | 0.7775 | 0.4084 | 0.7937 | 0.7547 | 1.0000 | 0.2446 | 0.0322 |
| P4 | Yesera Centro | 338441 | 7629494 | 3.3 | 47.3 | 21 | 31.8 | FYA | 0.5275 | 0.3154 | 0.7586 | 0.7502 | 0.9995 | 0.1794 | 0.0236 |
| P5 | Yesera Sud | 334331 | 7626804 | 0.5 | 24.8 | 46 | 29.3 | FY | 0.7525 | 0.4131 | 0.8627 | 0.9856 | 1.0000 | 0.3512 | 0.0463 |
| P6 | Yesera Sud | 337703 | 7626642 | 0.4 | 19.8 | 44 | 36.8 | FY-FYL | 0.8025 | 0.4255 | 0.8322 | 0.9924 | 1.0000 | 0.3513 | 0.0463 |

Donde:

$$Te1 = [0.2 + 0.3 * e^{-0.0256 * \frac{SAN(1 - \frac{SIL}{100})}{100}}]$$

$$Te2 = \left(\frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3}$$

$$Te3 = \left(1 - \frac{0.25 * C}{C + e^{(3.72 - 2.95 * C)}} \right)$$

$$Te4 = \left(1 - \frac{0.7 * SN1}{SN1 + e^{(-5.51 + 22.9 * SN1)}} \right)$$

Y a su vez:

SAN= Porcentaje de arena.

SIL= Porcentaje de limo.

CLA= Porcentaje de arcilla.

C= Porcentaje de carbón orgánico.

Así mismo SN1 (Relación factor de arena), que se encuentra en la ecuación Te4 se calcula a partir del porcentaje de arena con la relación siguiente:

$$SN1 = 1 - (SAN/100)$$

La expresión de arena gruesa en “Te1” de la ecuación EPIC es simplemente la

diferencia entre la arena y la arena fina estimada; “Te2” reduce K para suelos que tienen altas proporciones de arcilla a limo; “Te3” reduce K para suelos con alto contenido de carbono orgánico.; “Te4” reduce K aún más para suelos con contenidos de arena extremadamente altos (SAN > 70%).

Los porcentajes de composición de suelo de arena, limo, arcilla y carbono orgánico C.O. se obtuvieron a partir de los datos de análisis de perfiles de suelo que se utilizaron para hacer el estudio Realidad de los suelos en el departamento de Tarija del Viceministerio de Tierras. Noviembre, 2017. En el que se usaron 5 de los 6 perfiles presentados dado que estos se encuentran en la cuenca de Yesera.

Cuadro #22

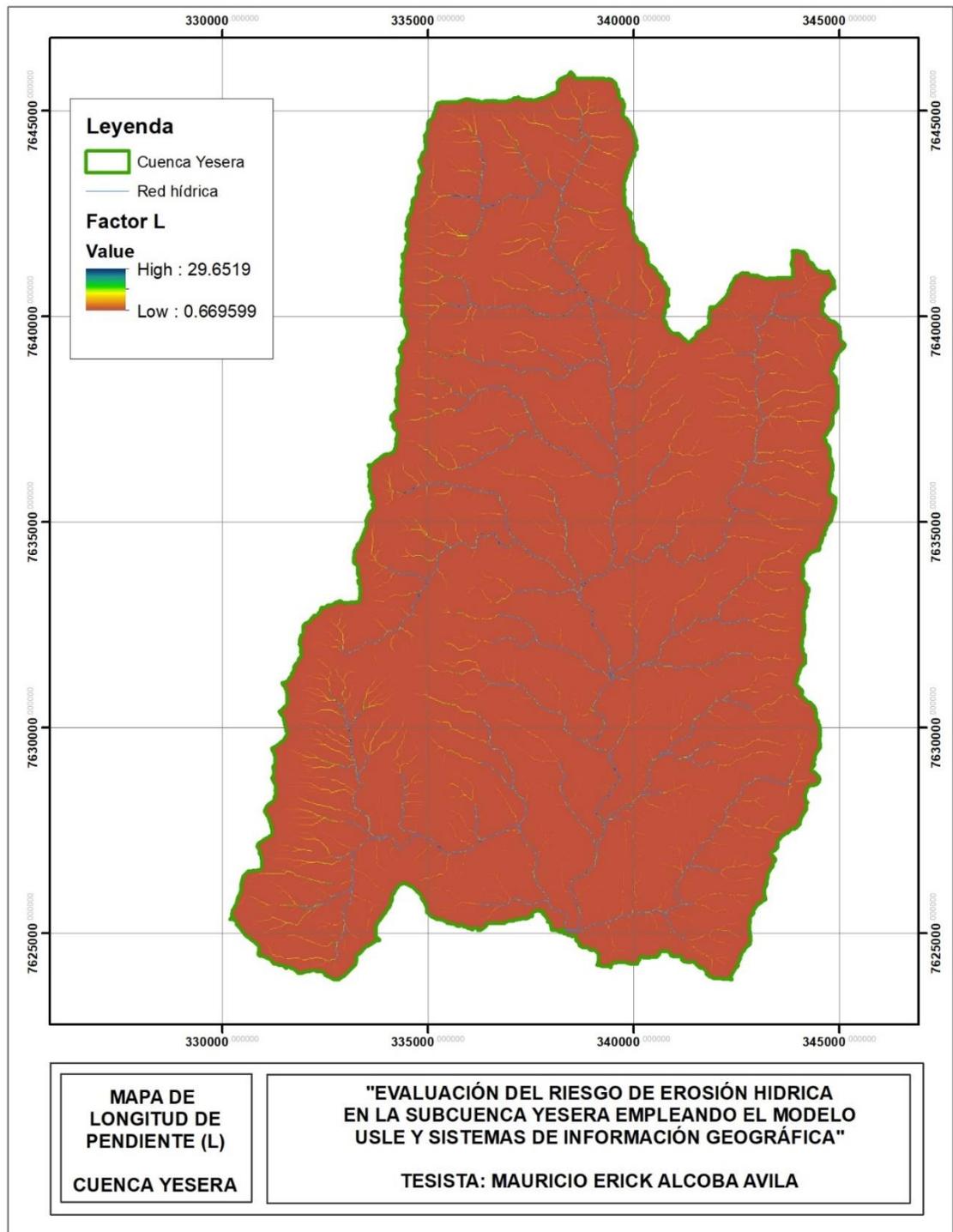
| Nº | ÁREA DE MUESTREO | Nº DE PERFIL | COMUNIDAD | X | Y | Z |
|----|------------------|--------------|---------------|--------|---------|------|
| 9 | 3 | P1 | Yesera Norte | 316646 | 7619340 | 2239 |
| 10 | | P2 | Yesera Norte | 338644 | 7634966 | 2317 |
| 11 | | P3 | Yesera Centro | 338775 | 7630722 | 2187 |
| 12 | | P4 | Yesera Centro | 338441 | 7629494 | 2175 |
| 13 | | P5 | Yesera Sud | 334331 | 7626804 | 2135 |
| 14 | | P6 | Yesera Sud | 337703 | 7626642 | 2126 |

Cuadro #23

| PERFIL | COM | X | Y | MO | A | L | Y |
|--------|---------------|--------|---------|------|-------|------|-------|
| P2 | Yesera Norte | 338644 | 7634966 | 1.86 | 12.25 | 33.5 | 54.25 |
| P3 | Yesera Centro | 338775 | 7630722 | 2.32 | 22.25 | 36 | 41.75 |
| P4 | Yesera Centro | 338441 | 7629494 | 3.25 | 47.25 | 21 | 31.75 |
| P5 | Yesera Sud | 334331 | 7626804 | 0.53 | 24.75 | 46 | 29.25 |
| P6 | Yesera Sud | 337703 | 7626642 | 0.4 | 19.75 | 43.5 | 36.75 |

4.1.3. Factor L

Figura #11



En cuanto al análisis de longitud de pendiente se observa que los valores más altos se encuentran en la parte norte y a ambos lados de la cuenca, donde se encuentran las serranías y desde donde se acumula el flujo de drenaje, situación que corrobora la red hídrica y su influencia por la topografía de la cuenca. El rango de datos abarca desde 0.66 hasta 29.65 donde los valores altos se encuentran sobre la red de drenaje y la mayor parte de la cuenca tiene valores próximos a 0.66.

PALSAR de la microcuenca con la calculadora Raster del software ArcGIS, para aplicar la expresión algebraica:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m$$

Donde:

L = Longitud de la pendiente (pies) en función de la parcela de diseño de Wischmeier y Smith.

λ = es la longitud de la pendiente en “m”.

m = es un exponente de la longitud de la pendiente

$$m = \frac{\beta}{(1 + \beta)}$$

β = Relación de erosión en surco a erosión entre surco.

$$\beta = \left\{ \frac{(\text{Sen } \theta / 0,0896)}{[3,0 * ((\text{Sen } \theta)^{0,8}) + 0,56]} \right\}$$

θ = Ángulo de pendiente (grados).

Para el procesamiento matemático en SIG se multiplicó el ángulo por un factor para convertir las unidades de grados a radianes Velásquez (2012):

$$\theta * 0,01745 \text{ rad} = \theta \text{ rad}$$

El valor de L para el área de la microcuenca se obtuvo utilizando el modelo de elevación digital de terreno (MDT) de Alos PALSAR, con una distancia entre píxeles de 12,5m.

Para su operación en ARCGIS, se utilizó la siguiente fórmula para el “raster calculator”

Algoritmo L* (Desmet & G. 1996)

$$L_{(ij)} = \frac{\frac{(A + D^2)^{m+1} - A}{m + 1(ij)}}{x^m D^{m+2} (22.13)^m}$$

A = Área aportadora unitaria de un píxel.

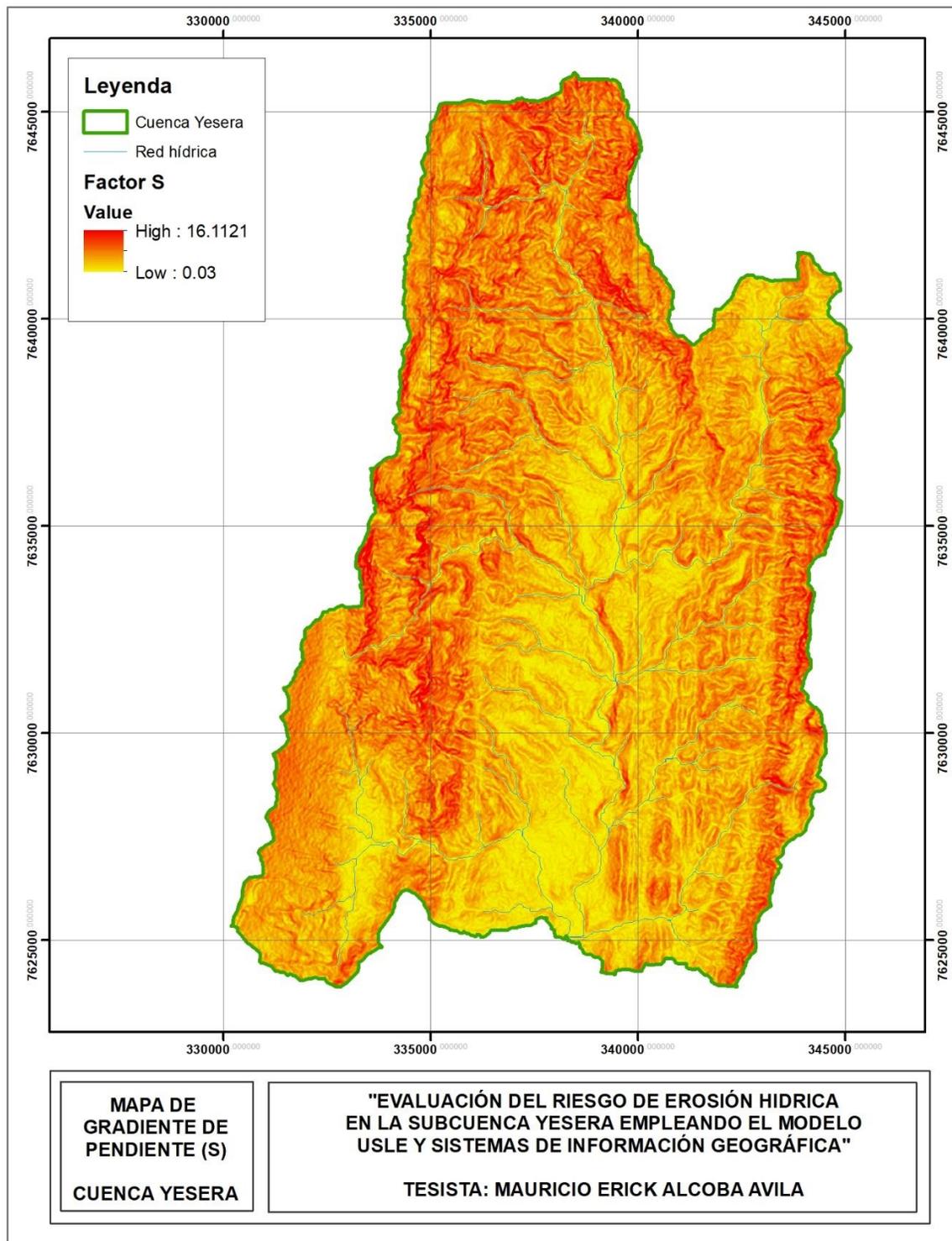
(ij) = Acumulación de flujo.

D = Tamaño del píxel.

x = Factor de corrección = 1.

4.1.4 Factor S

Figura #12



En el factor de gradiente de pendiente, se puede percibir de mejor manera que los niveles más bajos se encuentran en la parte media y baja de la cuenca sobre los cursos de la red de drenaje natural ya establecidos, esto se debe a la menor presencia de pendientes en las zanjas de las quebradas y va en correlación con los datos de longitud de pendiente.

Los sectores de color amarillo a verde claro son áreas de terreno que no suponen mayor riesgo de erosión en cuanto al factor de pendiente, se puede observar que estas características se observan en la parte baja de la cuenca, mientras que la parte norte y a los lados este y oeste de la cuenca se observan los mayores gradientes de pendientes debido a la formación topográfica de la cuenca.

La pendiente es la que determina la variación de la energía potencial por unidad de longitud, que se traduce en un incremento de la velocidad del flujo de escorrentía, y en consecuencia en un incremento en la capacidad erosiva y de transporte.

Al respecto, McCool, Brown, & Foster (1989) indican que S depende del valor del ángulo según:

$$S = 10,8 * \text{Sen } \theta + 0,03, \text{ cuando } \text{Tan}\theta < 9\%$$

$$S = 16,8 * \text{Sen } \theta - 0,5, \text{ cuando } \text{Tan}\theta > 9\%$$

Donde:

S = Inclinación de pendiente (%)

θ = Ángulo de pendiente (grados).

Del mismo modo que para el cálculo de L , el cálculo de todas las inclinaciones de pendiente para la microcuenca se realizó mediante un algoritmo para el software SIG, que analizó pixel por pixel los ángulos de la pendiente de terreno para obtener S .

Primeramente, se obtuvo el mapa raster de pendiente de terreno con la herramienta "Slope" del software ArcGIS a partir de la imagen de elevación, posteriormente se aplicó el siguiente algoritmo en la calculadora raster del mismo software:

Cuadro #24

Ecuación S (Mc Cool. et. al. 1989) Algoritmo S para SIG

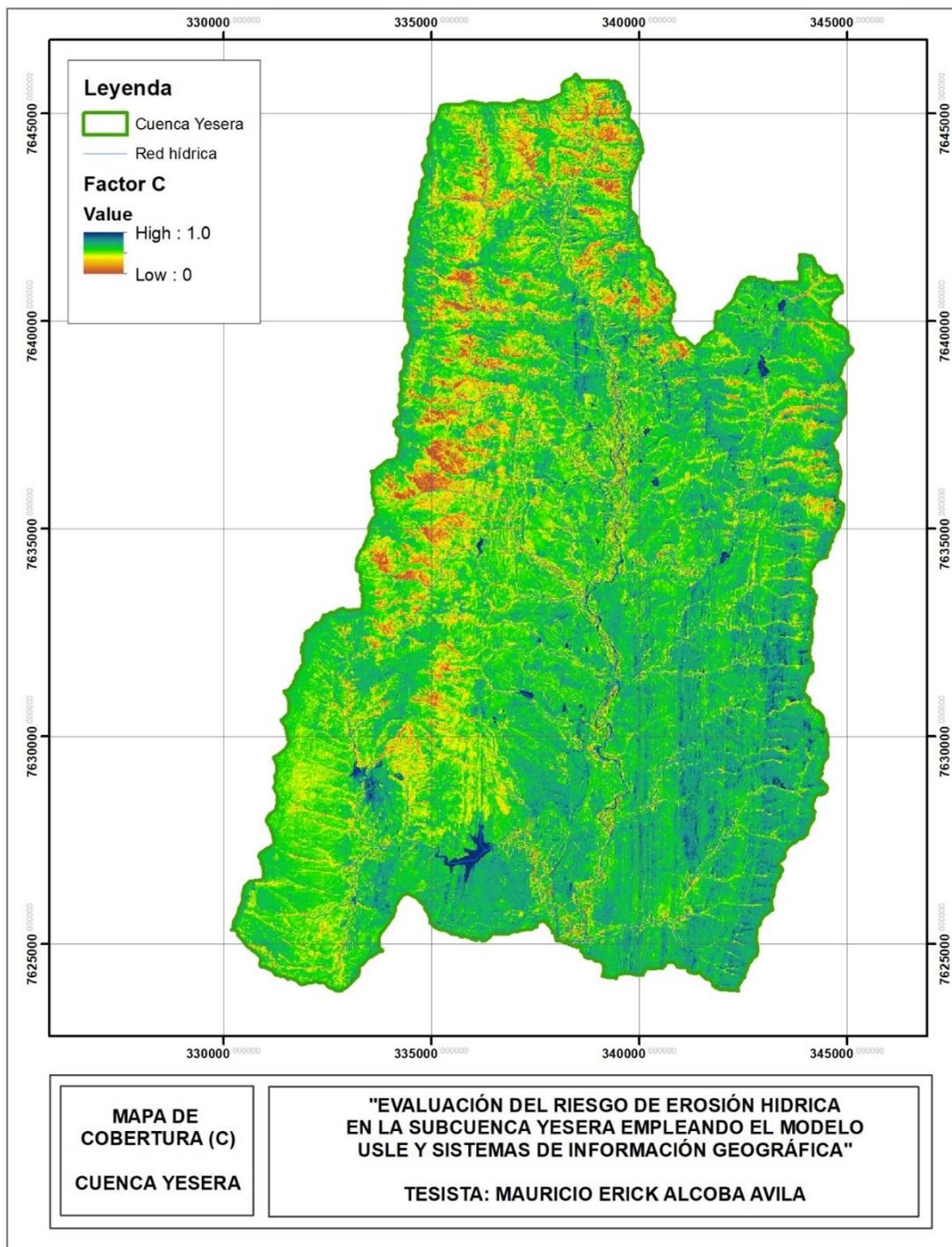
| | |
|--|--|
| | Condicional: |
| $S = 10,8 * \text{Sen } \theta + 0,03$, | {Tan [slope) x 0,01745]} < 0,09 |
| cuando $\text{Tan}\theta < 9\%$ | |
| $S = 16,8 * \text{Sen } \theta - 0,5$, | Si = {10,8 x Sin[(slope) x 0,01745]+0.03} |
| cuando $\text{Tan}\theta > 9\%$ | No = {16.8 x Sin[(slope) x 0.01745] – 0.5} |
| | Donde: |
| | Slope = mapa ráster de pendiente* |

*La pendiente equivale a θ

Dado que el ángulo θ esta expresado en grados, se multiplicó por 0.01745 rad para efectuarla conversión a unidades métricas radianes.

4.1.5. Factor C

Figura #13



El factor C, fue obtenido a partir del análisis NDVI y reajustado para un umbral de valores entre 0 a 1 con la fórmula de Durigon, en él se puede observar que los valores más bajos se presentan en la parte media y baja de la cuenca representados por el color verde, en la cuenca alta, principalmente al lado noreste, se observan valores más altos representados por el color naranja a rojo, indicando que la poca presencia de cobertura vegetal en el terreno hace que estas superficies sean más susceptibles de erosión.

Se observa así mismo que algunos espejos de agua, afloramientos rocosos presentan niveles aparentemente altos, pero esto se debe a que no presentan cobertura vegetal, pero al no ser suelo descubierto la erosión queda neutralizada.

Para un análisis al detalle de las características de la cobertura en la microcuenca, se utilizó imágenes del satélite Sentinel 2A que tenían una resolución de 10mts x 10mts. La selección de la imagen satelital se realizó tomando en cuenta el último año de estudio (2017) y el periodo más seco bajo la premisa que indica que la cobertura vegetal es menor y que por lo tanto el factor C estaría presentando los menores valores posibles. Se calculó el NDVI mediante la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

Donde:

NIR= reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano (B8).

R = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo (B4).

Calibración de NDVI para factor C

Dado que los valores obtenidos para cada pixel varían desde -1 hasta +1 en el NDVI, se procedió a recalibrar los resultados en función a dos ecuaciones que correlacionan el Factor C con el NDVI.

Cuadro # 25

| Ecuación de Van der Knijff (1999) | Ecuación de Durigon. Et. al. (2014) |
|--|--|
| $Q - [NDVI] - a(e)$ | $C = -1[NDVI] + 0,5$ |
| $C = e$ | |

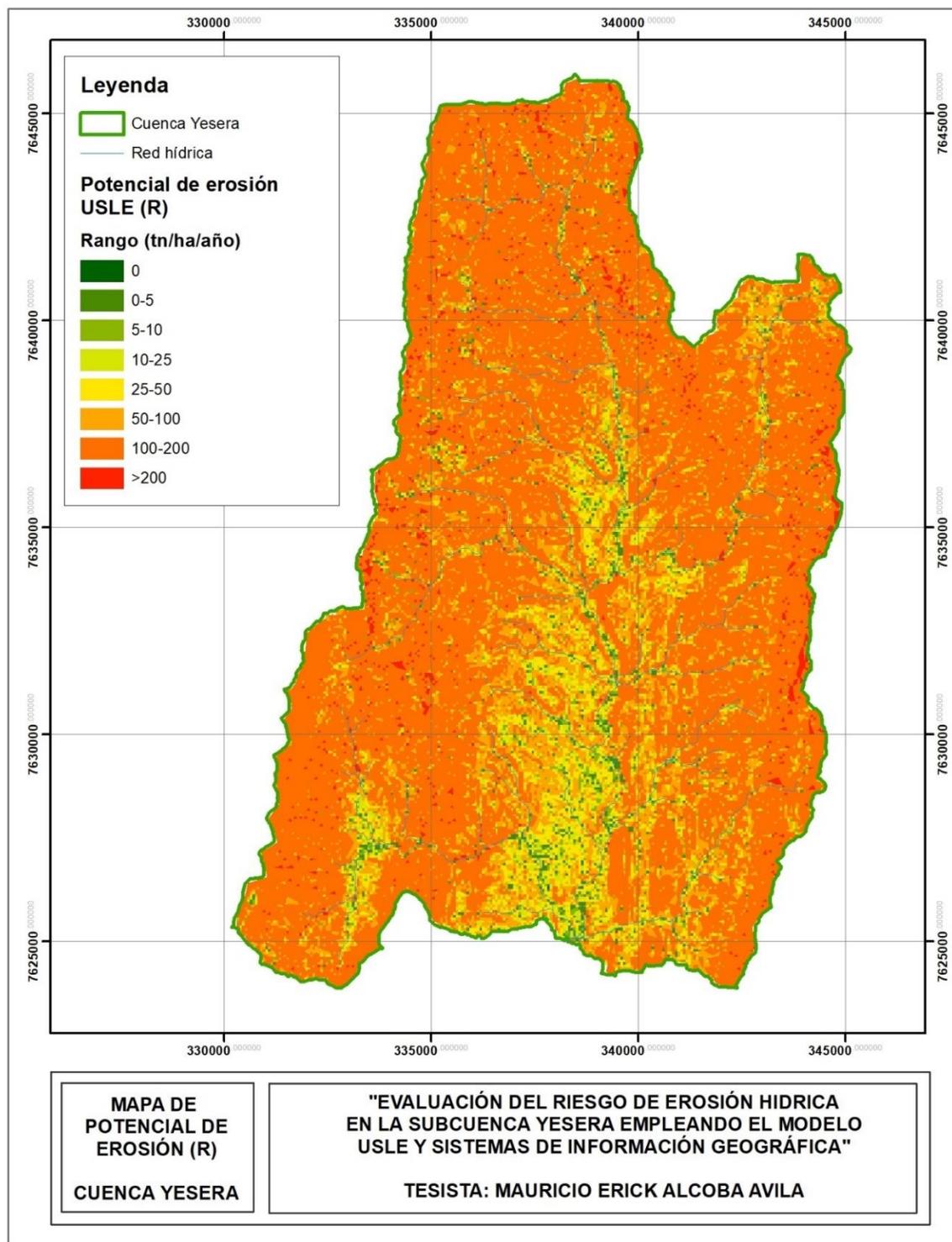
El factor C, estima la influencia de la cobertura vegetal vs escorrentía, por lo tanto, a mayor cobertura vegetal menor será el valor de magnitud del factor C en la ecuación y los valores observados se enmarcaron desde 0 hasta 1 (Pacheco, Marcano, & Cartaya, 2014).

4.1.6 Factor P

El factor P, hace referencia a prácticas implementadas de control de erosión que pueden disminuir el potencial de erosión en la cuenca, sin embargo, mediante análisis visual y el documento del atlas cuenca pedagógica Yesera en la cuenca se evidenció que desde el inicio del proyecto se están estableciendo tales prácticas y por lo tanto se asumió un valor de 1 en el factor P, siendo éste el valor máximo posible.

4.1.7. Resultado de pérdida de suelo

Figura # 14



El resultado de cada uno de los factores que intervienen en la ecuación de USLE, mismos que fueron obtenidos para toda la microcuenca con un detalle de análisis para cada cuadrícula de terreno de 12,5m x 12,5m (tamaño de la celda raster), fueron utilizados en la siguiente fórmula, la cual fue ejecutada mediante la herramienta del *ArcGis Map Algebra – Calculadora ráster*:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

Para obtener finalmente un mapa de la microcuenca del potencial de erosión en Ton/ha/año.

Y luego se reclasificó la imagen ráster en función de la siguiente tabla:

Cuadro # 26

«Mapa del grado de erosión Hídrica de los suelos de la CAPV»

| Pérdidas de suelo (t/ha. Año). | Interpretación |
|--------------------------------|--|
| 0 | Zonas no susceptibles al proceso erosivo como puedan ser espacios urbanos, carreteras, embalses, etc. |
| 0 – 5 | Zonas con niveles de erosión muy bajos y pérdidas de suelo tolerables. No hay erosión neta. |
| 5 – 10 | Zonas con niveles de erosión bajos y pérdidas de suelo que pueden ser tolerables. Probablemente no hay erosión neta. |
| 10 – 25 | Zonas con procesos erosivos leves. Existe erosión, aunque no es apreciable a simple vista. |
| 25 – 50 | Zonas con procesos erosivos moderados. Existe erosión, aunque puede no ser apreciable a simple vista. |
| 50 – 100 | Zonas con procesos erosivos grave. Existe erosión y es apreciable a simple vista. |
| 100- 200 | Zonas con procesos erosivos muy graves. Existe erosión y es manifiesta a simple vista. |
| >200 | Zonas con procesos erosivos extremos. Existe erosión y es evidente a simple vista. |

De la multiplicación de factores de USLE se obtuvo la relación de las tasas de pérdida de suelos siguiente:

Cuadro #27

| Gridcode | Eval_R | Sup (Has) | % |
|-----------------|----------------|------------------|----------|
| 1 | 0 | 0.396987 | 0.00 |
| 2 | 0-5 | 341.963513 | 1.62 |
| 3 | 5-10 | 357.125505 | 1.69 |
| 4 | 10-25 | 660.328218 | 3.13 |
| 5 | 25-50 | 1531.83611 | 7.27 |
| 6 | 50-100 | 3627.05506 | 17.20 |
| 7 | 100-200 | 14183.9222 | 67.28 |
| 8 | >200 | 378.840374 | 1.80 |
| | TOTALES | 21081.468 | 100.00 |

Donde se observa que el rango de potencial de erosión entre 100 a 200 tn/ha/año abarca el 67% de la cuenca, seguido del rango 50 a 100 tn/ha/año, que indican zonas con procesos erosivos graves y muy graves. Y que por lo tanto la cuenca Yesera tiene en la mayor parte de su superficie un potencial de erosión alto a muy alto.

En el mapa se observa que el potencial de erosión mayormente se encuentra en las partes altas y media de la cuenca simbolizado por los colores naranja con pequeñas superficies de color rojo que representan un potencial de erosión muy alto posiblemente debido a las cárcavas en terreno sumando a la escasa presencia de vegetación, mientras que en la parte sur y sobre las proximidades al cause principal se presentan los valores más bajos debido a la disminución de la pendiente y presencia de mayor vegetación los cuales atenúan el potencial de erosión.

Capítulo V

Conclusiones

- Tomando en cuenta los resultados obtenidos mediante la fórmula USLE, los cuales indican zonas y el grado erosivo, se puede conocer mediante georreferenciación y la intensidad actual. Además de analizar las variables responsables del proceso erosivo, donde se debe establecer medidas de mitigación a favor de los suelos de la cuenca hidrográfica para la conservación de suelos en la zona de Yesera, para tomar medidas de acción.
- Considerando las nuevas tecnologías como proceso de ayuda y evolución a la ingeniería forestal mediante Sistemas de Información Geográfica para la aplicación de métodos cuantitativos de pérdida de suelo.
- Los mapas de índices de vegetación en el factor C, se demuestra que hay una regeneración de la vegetación en la subcuenca, con las imágenes trabajadas donde los resultados del NDVI no se encontraron valores negativos (-1) por lo que nos indica la teoría que hay poca presencia de vegetación o no existe.
- El modelo cartográfico de estimación de erosión USLE provee un estimado de 100 a 200 tn/ha/año abarca el 67% de la cuenca, seguido del rango 50 a 100 tn/ha/año, que indican zonas con procesos erosivos graves y muy graves por lo cual la cuenca Yesera tiene en la mayor parte de su superficie un potencial de erosión alto a muy alto.

Capítulo VI

Recomendaciones

- Alarmados por el actual proceso de quema en Tarija en distintas zonas ecológicas de suma importancia, se debe considerar el evitar los chaqueos o los rotundos cambios de zona vegetativa en tierra agrícola en zonas afines a los ríos y afluentes de la subcuenca, para la protección de aguas así evitando las crecidas de los ríos, manteniéndose los cauces ya establecidos por la naturaleza.
- Considerar la continua labor de medidas en beneficio a la zona de estudio, debido a los riesgos que puede ocasionarse en la zona acerca de la consecuencia en la degradación de los suelos, que trae consigo la deforestación, la ampliación de la frontera agrícola y especialmente de los chaqueos en las zonas con pendientes elevadas.
- Continuando con la aplicación de políticas de ordenamiento predial y categorizar los suelos por su capacidad de uso, evitando la confrontación directa entre comunario – legislador para lograr un consenso para así evitar la pérdida de más suelos y la degradación del medio.