UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Elaboración de Mapas de Erosión en la Cuenca del Río Perené

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Morante Vargas, Sandra (0000-0002-4243-0485)

Gonzales Carrasco, Diego Rogger (0000-0002-4461-1562)

ASESOR

Arapa Guzmán, Edwing (0000-0002-3077-8599)

Lima, 21 de febrero del 2019

DEDICATORIA

Sandra Morante Vargas

*A mi mamá Blanca Vargas, quien siempre tuvo, tiene y tendrá confianza en mí, quien me
ha visto caer y me ha dado la fuerza para pararme y continuar.*

Diego Rogger Gonzales Carrasco

*A mis padres que siempre estuvieron conmigo espiritualmente y que crearon en mí una
persona con un potencial de hacer grandes cosas.*

AGRADECIMIENTOS

A nuestro asesor el Ingeniero Edwing Arapa Guzmán, quien supo guiarnos en todo el proceso y más que todo por el apoyo incondicional que nos brindó.

A nuestros grandes amigos que estuvieron siempre con nosotros y dieron una pausa a la rutina académica poniendo sus ingredientes de amor y lealtad.

RESUMEN

El presente estudio describe la elaboración de mapas de erosiones. La cuenca del Río Perené cuenta con amplio territorio, abarca al departamento de Junín y parte del departamento de Cerro de Pasco. Se escogió dicha cuenca, debido que es propensa a precipitaciones intensas y, por ende, a deslizamientos de tierra que conllevan en muchos casos a bloqueos de carreteras, pérdidas humanas, ganado, y de cultivos que merman en el flujo económico.

Para la elaboración del mapa de erosión, por su simplicidad y gran aproximación a la realidad se usó la metodología del USLE. En extracto, dicha metodología cuantifica la pérdida de suelos, la cual se obtiene del producto de 6 factores, cada factor a su vez es obtenido mediante distintas metodologías. Los factores para el presente método USLE son: factor K (erodabilidad del suelo), el factor R (Erosión hídrica), factor C (cobertura del suelo), factor LS (factor longitud pendiente) y el factor P (conservación del suelo); y el producto construirá a la metodología USLE.

Cada factor se obtiene de distintas maneras, algunos con métodos matemáticos teniendo una base de información y recolección de imágenes satelitales que se obtienen mediante servidores de la NASA y Japón. Cada factor se importa al programa ARC-GIS el cual nos da por cada factor un respectivo mapa. El producto de los factores nos brindará un mapa general, donde nos mostrará las zonas más propensas a erosión. Dicha información será de suma importancia para la gestión de Gobiernos Regionales y Municipalidades, para prevenir los recurrentes accidentes.

Palabras claves: Erosión; deslizamientos; cultivo; USLE

ELABORATION OF EROSION MAPS IN THE PERENE RIVER BASIN

ABSTRACT

The present study, as its name describes, is the elaboration of erosion maps. The Río Perené basin has a wide territory, which mostly covers the department of Junín and, to a lesser extent, part of the department of Cerro de Pasco. This basin was chosen, because for years this place is prone to intense rainfall and therefore to landslides that in many cases lead to road blocks also human losses, livestock, and crops that diminish the capacity of commercial flow of the country.

For the elaboration of the erosion map, there are different methods for its realization, for its simplicity and great approximation to reality it was decided to make use of the USLE methodology. In extract, this methodology quantifies the loss of soils, which is obtained by the product of 6 factors, each factor in turn is obtained by different methodologies. The factors for the present USLE method are: K factor (soil erosion), the R factor (precipitation erosivity), C factor (coverage or soil management), LS factor (slope length factor) and finally the P factor (soil conservation), the synergy of these factors will build the USLE methodology.

Each factor is obtained in different ways, some with mathematical methods having an information base and others by collecting satellite images obtained through servers from NASA and Japan. Each factor is imported into the ARC-GIS program which gives us a respective map for each factor. Finally, the product of all maps results in the final map of soil loss in the basin.

Keywords: soil; erosivity; basin; precipitation

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	3
1.3	DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.4	CARACTERÍSTICAS DEL PROBLEMA	5
1.5	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	6
1.6	FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS	7
1.7	OBJETIVO GENERAL	7
1.8	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.9	JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	8
1.10	LIMITACIONES DEL ESTUDIO	8
1.11	METODOLOGÍA	9
2	MARCO TEÓRICO.....	9
2.1	EROSIÓN	9
2.1.1	Formas y Tipos de Erosión.....	10
2.2	SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICAS	12
2.2.1	Formato Ráster	13
2.2.2	Formato Vectorial.....	16
2.3	ECUACIÓN USLE	17
2.3.1	Definición de sus componentes	19
3	CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA	30
3.1	UBICACIÓN	30
3.2	INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA E IMÁGENES SATELITALES	36
3.2.1	Imágenes Ráster.....	36
3.2.2	Imágenes LANDSAT	37
3.3	PARÁMETROS DE LA CUENCA.....	39
4	PROCESAMIENTO DE DATOS	41
4.1	FACTOR R.....	41
4.2	FACTOR K.....	48

4.3	FACTOR LS.....	54
4.4	FACTOR C.....	61
4.5	FACTOR P	73
4.6	MAPA DE EROSIÓN	73
5	RESULTADOS	75
5.1	ELABORACIÓN DE MAPAS DE EROSIÓN ANUAL POR MÉTODO USLE	75
5.2	ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO ANUAL EN LA CUENCA DEL PERENÉ	80
6	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	82
6.1	SITUACIÓN ACTUAL	82
6.2	VALIDACIÓN CUALITATIVA.....	88
7	CONCLUSIONES	94
8	RECOMENDACIONES	96
9	REFERENCIAS	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de los valores del NDVI	25
Tabla 2	Valores de factor P de acuerdo con curvas de nivel modificadas por el hombre ..	27
Tabla 3	Valores de factor P según pendientes modificadas por el hombre	28
Tabla 4	Valores de factor P obtenidos a partir del factor C	29
Tabla 5	Subcuencas del Río Perné D=Margen derecha I=Margen izquierda	31
Tabla 6	Descripción de las bandas del satélite LAND SAT - 8	38
Tabla 7	Detalle de Cuenca del Río Perené	39
Tabla 8	Caudales de los ríos de la Cuenca del Río Perené año 2015	40
Tabla 9	Ríos de la Cuenca del Río Perené.....	41
Tabla 10	Estaciones de la Cuenca del Río Perené.....	42
Tabla 11	Procedimiento para determinar el factor R para evento máximo	44
Tabla 12	Datos del mapa de la FAO y resultados obtenidos del factor K.....	51
Tabla 13	Valores de NDVI.....	61
Tabla 14	Descripción del Huaico ocurrido en Anexo Promisora.....	88
Tabla 15	Descripción del Huaico ocurrido en San Ramón	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. La vulnerabilidad de la Región Junín.....	4
Ilustración 2. Suelo erosionado superficialmente.....	10
Ilustración 3. Suelo erosionado profundamente	11
Ilustración 4. Suelo erosionado formando canales profundos	11
Ilustración 5. Representación de los modelos del SIG	13
Ilustración 6. Imagen con información Ráster.....	14
Ilustración 7. Imagen satelital Ráster en forma de mapa base.....	14
Ilustración 8. Imagen Ráster de mapas de superficie	15
Ilustración 9. Imagen Ráster de mapa temático.....	15
Ilustración 10. Imagen con información geográfico de tipo Vectorial.....	17
Ilustración 11. Mapa de suelos de mundo	21
Ilustración 12. Interpretación de los índices de vegetación.....	25
Ilustración 13. Índices de vegetación interpretación	26
Ilustración 14. Mapa ubicación de Región Junín y Cerro de Pasco	31
Ilustración 15. Mapa de Cuenca del Río Perené.....	32
Ilustración 16. mapa departamental de Junín	32
Ilustración 17. Afluente del Río Perené	33
Ilustración 18. Mapa departamental muestra la extensión de la Cuenca del Perené	34
Ilustración 19. Mapa Provincial de la cuenca del Río Perené	34
Ilustración 20. Sub cuencas de la Cuenca del Río Perené	35
Ilustración 21. Geo Servidor del Ministerio del Ambiente del Perú	37
Ilustración 22. Salida del Río Perené y nacimiento del Río Tambo, en la localidad de Puerto Prado.....	40
Ilustración 23. Importación de estaciones Hidrográficas	44
Ilustración 24. Estaciones con el Factor R máximo en el área de influencia de la cuenca .	45
Ilustración 25. Comando interpolación IDW para generar el mapa del factor R _{máx}	46
Ilustración 26. Mapa de Factor R para evento máximo.....	47
Ilustración 27. Mapa de suelo del mundo.....	48
Ilustración 28. Mapa de suelos proporcionado por la FAO importado al ARC GIS.....	49
Ilustración 29. Mapa de suelos de la cuenca del Río Perené.....	50

Ilustración 30. Mapa de factor K.....	53
Ilustración 31. Geoservidor del MINAM para descargar imágenes Ráster de la Cuenca ...	55
Ilustración 32. Mapa de elevaciones generado a partir de las imágenes Ráster.....	56
Ilustración 33. Mapa de elevación en formato Dem de la cuenca del Río Perené	56
Ilustración 34. Mapa de elevaciones corregido a valores positivos	57
Ilustración 35. Valor de D (cell cize)	58
Ilustración 36. Mapa del factor LS	60
Ilustración 37. Earth Explore del USGS.....	62
Ilustración 38. Operación de multiplicación para el cálculo del NDVI	63
Ilustración 39. Mapa NDVI año 2014	64
Ilustración 40. Mapa NDVI año 2015	65
Ilustración 41. Mapa NDVI año 2016	66
Ilustración 42. Mapa NDVI año 2017	67
Ilustración 43. Cálculo de factor C.....	68
Ilustración 44. Mapa Factor C año 2014	69
Ilustración 45. Mapa Factor C año 2015	70
Ilustración 46. Mapa Factor C año 2016	71
Ilustración 47. Mapa Factor C año 2017	72
Ilustración 48. Importación de factores al ArcGIS.....	74
Ilustración 49. Ubicación Raster Calculator.....	74
Ilustración 50. Multiplicación de factores USLE en ArcGIS.....	75
Ilustración 51. Mapa de pérdida de suelos (A) año 2014	76
Ilustración 52. Mapa de pérdidas de suelos (A) año 2015.....	77
Ilustración 53. Mapa de pérdidas de suelos (A) año 2016.....	78
Ilustración 54. Mapa de pérdidas de suelos (A) año 2017.....	79
Ilustración 55. Detalle de pérdida de suelo 2014.....	80
Ilustración 56. Detalle de pérdida de suelo 2015.....	81
Ilustración 57. Detalle de pérdida de suelo 2016.....	81
Ilustración 58. Detalle pérdida de suelo 2017	82
Ilustración 59. Mapa de las regiones en emergencia por las lluvias.....	83
Ilustración 60. Reporte de daños ocurridos en Junín.....	84
Ilustración 61. Mapa de precipitación normal acumulado diciembre-marzo 2000-2014....	85
Ilustración 62. Ocurrencia de peligros Geológicos	87

Ilustración 63. Huaico ocurrido en el anexo Promisora	88
Ilustración 64. Huaico ocurrido en el anexo Promisora	89
Ilustración 65. Huaico ocurrido en el anexo Promisora	89
Ilustración 66. Zona de ocurrencia del huaico según la ubicación	90
Ilustración 67. Zona de ocurrencia del huaico según la ubicación	90
Ilustración 68. Zona de ocurrencia del huaico según la ubicación	91
Ilustración 69. Huaico ocurrido en San Ramón Sector Chalhupapuquio	92
Ilustración 70. Huaico ocurrido en San Ramón Chalhupapuquio	92
Ilustración 71. Zona de ocurrencia del huaico según la ubicación	93
Ilustración 72. Zona de ocurrencia del huaico según la ubicación	93
Ilustración 73. Comparación de pérdida de suelo máximas entre años 2014-2017	95
Ilustración 74. Comparación de pérdida de suelo promedio entre años 2014-2017.....	95

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Es necesario de antemano dar una breve explicación de lo que implica el método USLE, este método proviene de la multiplicación de 6 factores K, R, C, L, S y P (factor de erodabilidad del suelo, factor de erosión hídrica, factor de cobertura vegetal, factor de pendiente y el factor de conservación del suelo), las cuales dan como resultado un mapa general con rangos que servirá para reconocer los lugares más susceptibles a erosión.

Es un procedimiento usado en distintos países, tal es el caso de nuestro país. Si bien no se ha realizado antes un estudio de pérdidas de suelo por el método de USLE en la zona del Perené, se tiene evidencia de la aplicación de la ecuación en la micro cuenca Puente Pérez ubicado en Tingo María, Huánuco, Perú. En este estudio se analizó cada uno de los factores de manera computarizada y se obtuvieron los datos mediante imágenes satelitales, geo servidores, SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú), entre otros que le brindaron la información necesaria. El estudio enfatiza que los primeros 4 factores (R de precipitación, K de erodabilidad del suelo, L y S longitud y pendiente) representan el potencial erosivo inherente en el sitio, mientras que la cobertura vegetal C y la conservación del suelo P, son los factores que pueden reducir la pérdida potencial, puesto que son manejables por el hombre.

Asimismo, el estudio comprende las ventajas del uso del método USLE debido a su simplicidad y gran aproximación a la realidad. Sin embargo, también se presenta las limitaciones a la hora de estimar los 6 factores, ya que hay probabilidades que la información no esté disponible para el procesamiento de cada uno de los factores, y esto al final merme el resultado a la realidad. El estudio se realizó en campo como en gabinete, debido a la facilidad de estudio (puesto que se analizó una micro cuenca), obteniendo al final resultados de ambas partes y demostrando la gran proximidad del método USLE con la realidad vista en la zona.

Los resultados obtenidos por el USLE dieron una erosión de tipo baja en el 73% de la cuenca, este fue comparado con los estudios en campo los cuales corroboraron los datos obtenidos por la ecuación (Angulo, 2010).

En el país vecino de Chile, se realizó un estudio “Evaluación del Modelo USLE en la Estimación de la Erosión, en Seis Localidades entre la IV y IX Región de Chile”, el cual nos muestra cómo se ejecutó la selección de los métodos de cada uno de los factores para determinar la cantidad de suelo perdido. Para ello se realizó mediciones en campo para poder comparar con los resultados del método USLE, las localidades a estudiar fueron Galvarino, Santa Bárbara, Florida, Cauquenes, Litueche y Tunga Norte. En las cuales se ejecutó una combinación de prácticas de manejo, localidades y años, lo cual dio origen a 42 situaciones agroecológicas.

Cada valor fue obtenido por el procesamiento individual, los registros que conservaban las entidades regionales y con los métodos inherentes a la metodología. Al término de la obtención de datos y posterior procesamiento se determinó la cantidad de pérdida del suelo, este resultado fue comparado con las estimaciones reales mediante el método de comparación del X^2 de varianza hipotética, esta prueba rechaza las técnicas que no son exactas independientemente de su fuente de discrepancia o error. Previamente se señaló que ante una baja erosión hídrica ($< 1.5 \text{ t. Ha}^{-1}$) el modelo USLE tiene limitada efectividad y por ende no es preciso con lo que se evidencia en las mediciones reales. De la evaluación se determinó que no hubo una exactitud requerida debido a como se mencionó anteriormente la erosión que se tenía era inferior a la recomendada. Se dedujo a su vez que esta falta de exactitud pudo ser debido a los factores, en el cálculo del factor K hubo que omitir el porcentaje de Arena (Santa Bárbara) debido a no contar con información, para el factor C y P se asumieron cifras conservadoras por la escasa literatura, pero al realizar una revisión se pudo observar que los datos utilizados/asignados fueron todos los correctos. Es por ello que surge la necesidad de realizar el estudio para cada factor y con ello hallar la pérdida de suelo de las diferentes zonas de la cuenca, pero además de realizar una compatibilidad en campo a fin de conocer cuan cerca se encuentra de la realidad. (R, L, I, & F, 2001)

Se puede deducir que el método USLE tiene gran aproximación a la realidad cuando se trabaja con todos los factores obtenidos con fuentes confiables. Así mismo mientras menos información se tenga de la zona, resta veracidad a su resultado. Sea o no el caso, sirve de apoyo para la comprensión del estado del suelo en líneas generales de la zona específica a analizar.

1.2 Realidad Problemática

El Perú es un país mega diverso, cuenta con 159 cuencas hidrográficas (Agua, 2016) repartidas en la costa, sierra y selva, además de 11 eco regiones, salida al océano pacífico, desiertos áridos, terrenos fangosos, una flora de 19 especies y una fauna de 4000 especies (Estadísticas, 2014). Las precipitaciones en el Perú son muy variadas siendo la costa la región con menores precipitaciones en el año, en dicha región la presencia de erosión hídrica en cuencas es baja. Por otro lado, la sierra y la selva tienen mayores precipitaciones, con diferentes duraciones e intensidades. Por ende, el suelo de estas regiones se encuentra más susceptible a deslizamientos.

Junín departamento del Perú, ubicado en el centro del Perú, presenta precipitaciones que en muchas ocasiones causan deslizamiento e inundaciones, durante los meses de diciembre a marzo el número de deslizamientos de tierra asciende de manera alarmante, causando pérdidas humanas como económicas. Tal fue el caso del deslizamiento de lodo que bloqueó tramo de la carretera central en Chanchamayo, producto de las intensas lluvias que se registró en la zona; así como en el kilómetro 91 de la carretera central en el tramo Tarma – San Ramón, en donde se registró que un vehículo fue arrastrado fuera de la vía por el lodo (Andina - Agencia Peruana de Noticias , 2015).

Así mismo, según el portal de noticias RPP, en el año 2015 solo en la Región Junín se registraron 130 desastres naturales, según informó la Subgerencia de Defensa Civil del Gobierno Regional. De las cuales las heladas y las lluvias intensas fueron de las más registradas con 76 eventos, dejando más de mil damnificados y 7 mil afectados en todo el año (RPP Noticias, 2015). Este panorama no ha cambiado mucho, ya que como resalta el diario el CORREO, Junín, presenta una vulnerabilidad a deslizamiento de lodo y es que el número de emergencias en la región, lejos de disminuir ha ido aumentando, como se muestra en la figura (Thalia, 2017).

Ilustración 1. La vulnerabilidad de la Región Junín

Fuente: <https://diariocorreo.pe/edicion/huancayo/junin-la-vulnerabilidad-de-la-region-se-halla-en-los-huacos-e-inundaciones-739675/>

Este tipo de noticias son constantes en esta zona, lo cual supone gran riesgo para los buses y personas que transitan diariamente por las carreteras y/o caminos, sean rurales o no.

Nuestro país al ser mega diverso, en cuanto a climas, tipos de suelos, entre otros, exige un estudio por zonas específicas y bien delimitadas, para con ello poder generar mapas de gestión de prevención ante huacos y/o deslizamientos de lodo que puedan poner en riesgo la vida de los pobladores que vivan en los alrededores, así como los vehículos que transitan a diario por nuestras carreteras y cultivos.

1.3 Delimitación del Problema

En el presente estudio de investigación se aplicó la metodología USLE, que consta del producto de diversos factores, factor K (erodabilidad del suelo), factor R (cuantificador de la erosión hídrica), factor C (cobertura vegetal), factor P (conservación del suelo), factor LS (Morfología de la cuenca). Este estudio abarcó la cuenca del Río Perené, por ende, se realizó una recopilación de data para usarla como materia prima en la elaboración de cada factor. Las entidades que nos brindaron la data necesaria fueron SENAMHI, el Geo servidor del MINAM, el Servicio Geológico de los Estados Unidos, la FAO

(Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación) entre otras que nos permitieron importar, recolectar, administrar y trabajar dicha data en ARC GIS.

Es importante demarcar correctamente hasta donde se planeó llegar con el presente estudio, en ese aspecto, nuestro objetivo fue obtener un mapa de erosión hídrica de toda la cuenca del Río Perené, para localizar las zonas más susceptibles a erosiones y/o huaicos que puedan presentarse dentro de la cuenca. Cabe resaltar que la presente tesis, no plantea una solución para la disminución de accidentes debido a deslizamientos de suelos, sino que es un mapa para gestionar y localizar con mayor rapidez los lugares o zonas con mayor índice de erosión y que por ende podrían originar deslizamientos que bloqueen carreteras, caminos, o cultivos que puedan verse afectados.

El aporte de nuestro estudio es más un apoyo y/o soporte para las Municipalidades y Gobiernos Regionales de las distintas zonas de toda la Cuenca, ya que este abarca casi todas las provincias del departamento de Junín y parte de Cerro de Pasco. De esta manera, se podría dar a conocer a estas entidades que existen métodos de gran proximidad a la realidad que pueden prever a futuro de más accidentes, sumado a ello con un plan de mejoramiento de carreteras existentes y la construcción de nuevos caminos, este material sería de mucho apoyo para poder evaluar de mejor forma que zonas requieren mayor observación por su gran índice de pérdida de suelos y/o deslizamientos de lodo. Por otro lado, gracias a las imágenes satelitales que son de información libre, además de las estaciones meteorológicas que se encuentran activas en todo el Perú, mediante la información que ofrece el SENAMHI; se puede ir actualizando los mapas de pérdida de suelos, para cada año en específico, por ende se tendría información siempre actualizada, debido a que muchos estudios de deslizamientos son antiguos y totalmente desfasados en años, lo cual significa que no es exacto, para poder tomar medidas respecto a estos estudios, caso contrario con el método USLE.

1.4 Características del Problema

Los deslizamientos de suelo en la selva del Perú son muy comunes debido a las altas e intensas precipitaciones. Junín al ser un departamento ubicado en el centro del país consta

de sierra y selva, ambas regiones lideran el volumen de precipitaciones del país, por ende, hay altas probabilidades que se desencadenen deslizamientos, teniendo como consecuencia final la pérdida de vidas humanas. Una de las carreteras con mayor incidencia de transporte liviano y pesado es la carretera central, que conecta la capital con los departamentos de Pucallpa, Junín, Huánuco, Cerro de Paso, dicha vía a lo largo de su trayectoria es confinado por laderas, que son altamente propensas a deslizamientos.

Sumado a ello, las construcciones informales en laderas de cerros y el gran porcentaje de vías que no están pavimentadas, aumentan el riesgo de desprendimiento del suelo. Todas estas aristas hacen necesario que se deba prever y conocer la vulnerabilidad de la cuenca.

1.5 Formulación del Problema

La erosión es la modificación de las características propias del suelo, ya sea por medio físico, químico y/o biológico. Los cuales generan degradación de la estructura del suelo, disminución de la materia orgánica, pérdida del suelo y pérdida de nutrientes. En el presente estudio, se analizará la pérdida de suelo por la combinación de distintos factores, como la precipitación (intensidad y duración), la conservación del suelo, la cobertura del suelo y el tipo de suelo. Ya que todos estos factores influyen en variabilidad de la erosión en la cuenca, siendo el de mayor incidencia el factor R (Erosión hídrica), el cual se analizó con mayor detenimiento.

En nuestra zona de estudio, la Cuenca del río Perené, las precipitaciones más intensas son durante los meses de diciembre a marzo. Debido a dichas precipitaciones, se saturan los poros del suelo, aumenta el peso unitario, y estos poros que en antelación albergaban reacciones químicas, ahora tras la saturación se perdieron dichas reacciones, por otro lado habrá mayor presión de poros ocasionando una pérdida de fricción en el suelo. (Suarez, 1998). Para que el deslizamiento del fluido se active, necesariamente la infiltración será más veloz que la capacidad de drenaje interna del suelo. Es por ello que surge la interrogante ¿Se puede elaborar un mapa de erosiones que proporcione la información necesaria y que sirva de apoyo para reconsiderar las zonas que son más susceptibles a deslizamientos provocados por la erosión hídrica?, de manera anticipada se puede decir que sí, sería una herramienta, ya que el mapa mostraría el rango de zonas más y menos susceptibles a pérdidas de suelo, debido a los factores descritos por la metodología.

1.6 Formulación de la Hipótesis

El presente proyecto de tesis planteó la recolección de data hidrológica, del suelo, la cobertura vegetal y topográfica que posteriormente se procesó como factores, para con ello poder realizar una superposición de información dando como resultado la elaboración de un mapa de erosiones de la cuenca del río Perené. La obtención de este mapa de erosión nos describirá las zonas con mayor y menor susceptibilidad a deslizamientos de toda la cuenca, analizando distintos años, lo cual fue comparado con hechos reales para la validación de la información obtenida en nuestro estudio.

Dicha información, tuvo como resultado final un Mapa de Erosiones Hídricas en la Cuenca del Río Perené, el mismo que sería de suma importancia para la gestión de los Gobiernos Regionales y Municipalidades con el fin de fomentar planes de contingencia y demás, sobre las áreas más vulnerables a sufrir las consecuencias de la erosión de suelos.

1.7 Objetivo General

El objetivo principal fue la Elaboración de Mapas de Erosión como herramienta de Gestión en la Cuenca del Río Perené, mediante el uso de la ecuación USLE.

1.8 Objetivos Específicos

Como parte de los objetivos específicos se tuvo:

- Procesar, calcular y determinar cada factor de la ecuación del USLE.
- Elaborar un mapa de erosiones con el método USLE.
- Estimar la pérdida potencial de erosión anual de suelos.
- Validar la información de manera cualitativa.

1.9 Justificación del Estudio

Los motivos que nos llevaron a desarrollar la Erosión Hídrica que se presenta en la Cuenca del Río Perené, se centra en que esta zona es muy susceptible a los deslizamientos debido a la gran presencia de precipitaciones de larga duración y alta intensidad, además que la carretera central se encuentra confinada por un acantilado y por taludes de pronunciada pendiente. La topografía en esta zona es pronunciada por ende la acumulación de escorrentía también favorece en gran medida en los deslizamientos. Pretendemos entonces elaborar un Mapa de Erosiones de la Cuenca del Río Perené con el fin de ser una forma de apoyo para las entidades públicas y privadas, ya que esta zonificación mostrará las zonas más vulnerables y de peligro latente de la cuenca.

1.10 Limitaciones del Estudio

- La información que se encuentra en las estaciones meteorológicas de la cuenca puede que sean escasas y poco detalladas. Además, que no todas las estaciones se encontraron en funcionamiento, por ende, no contaban con la información completa y continua, perdiendo precisión para el estudio.
- Falta de data para el factor P de conservación del suelo, pese a ello se pudo trabajar y no influir en el resultado, puesto que se le agrega el valor de 1, de esta manera no afecta a la ecuación.
- Ausencia de mapa que describa las propiedades específicas del suelo en nuestro país, y sus principales características de erodabilidad.
- Las imágenes LANDSAT al ser tomadas por satélites, en caso de registrar alta presencia de nubosidad, no permite una correcta recolección de datos y, por ende, los resultados pueden verse distorsionados.
- No contar con la suficiente información que sirva de apoyo para la validación cualitativa de los distintos Mapas de Erosión a realizar.

1.11 Metodología

Para la presente tesis, en primer lugar, se definió la erosión y sus formas, los sistemas de información geográfica (SIG), tales como el formato ráster y vectorial, sus aplicaciones, entre otros. Asimismo, se definirá la ecuación USLE, los factores que lo componen, así como cada una de las metodologías para su determinación.

Con la información base se procedió a describir la ubicación de la cuenca a estudiar, los parámetros de la cuenca, y datos principales. En segundo lugar, se aplicó las metodologías que mejor se ajustasen a los datos que se tuvieran de cada factor, obteniendo un mapa por cada uno de estos, permitiéndonos de esta manera, poder hacer la multiplicación de los 6 factores y con ello obtener el mapa de pérdida de suelos de toda la cuenca. Cabe resaltar que el estudio se realizó para 4 años consecutivos (2014, 2015, 2016 y 2017).

Según los estudios acerca del USLE, esta metodología tiene gran proximidad a la realidad, es por ello que se realizó una validación cualitativa de los mapas obtenidos de pérdidas de suelos de la cuenca, a partir de información previa de accidentes, bloqueos de carreteras, huaicos, deslizamientos entre otros; que nos sirvieron como demostración que los mapas guardan relación con los sucesos recogidos.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Erosión

Según el diccionario de la Real Academia Española, la Erosión comprende como una de sus definiciones al desgaste o destrucción producidos en la superficie terrestre por agentes externos, como el agua o el viento (RAE, 2016). La erosión puede deberse a distintos factores entre los cuales son el viento, el agua (en sus distintas formas), cambios de temperatura y los organismos vivos.

La erosión finalmente es uno de los principales agentes del cambio en el relieve de la tierra, en el cual el agua es el factor más importante y el que genera mayor erosión en el

suelo. Así mismo la vegetación y el tipo de suelo también suponen una protección de los diferentes agentes erosivos que existen, aunque por otro lado un suelo con vegetación será propenso a la larga de volverse infértil y por ende aumentar su capacidad erosiva.

2.1.1 Formas y Tipos de Erosión

La erosión se puede dar de dos formas, natural y acelerada. El primer caso se da por el paso de los años y los distintos agentes que golpean la superficie a erosionarse, o los agentes externos naturales (precipitaciones, viento, movimientos telúricos). En segundo lugar, el cual se refiere en su mayoría cuando existe la intervención del hombre, como zonas de cultivo (dejan infértil el suelo, por uso excesivo); los cuales generan una erosión prematura y como es evidente es la más dañina ya que las consecuencias se evidenciarán en lapsos de tiempo más cortos.

La erosión también se clasifica por tipos, los cuales se describirán a continuación:

- Erosión Laminar: Se da de manera superficial a la escorrentía que degrada el suelo. Se denomina laminar debido a que pierde una pequeña y/o delgada capa del suelo.

Ilustración 2. Suelo erosionado superficialmente

Fuente: <http://www.pregonagropecuario.com/cat.php?txt=3787>

- Erosión en Surcos: Se presenta cuando hay acumulación de flujo superficial debido a la forma y pendientes que presenta la superficie.

Ilustración 3. Suelo erosionado profundamente

Fuente: <http://erosionhidricaidinescarrillo.blogspot.pe/>

- Erosión en Zanjas o Cárcavas: Este tipo de erosión se da cuando el flujo de agua es incontrolado, como consecuencia de su paso tendremos un suelo muy degradado. Esto se debe a la intensidad de las precipitaciones que generan canales profundos por donde pasa la corriente de agua, esto puede llegar a generar canales largos y profundos.

Ilustración 4. Suelo erosionado formando canales profundos

Fuente: <http://geomorfologiadelmundo.blogspot.pe/p/rerer.html>

2.2 Sistemas de Información Geográficas

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) o GIS (por las siglas en inglés Geographic Information System) es una herramienta que integra hardware (información en formato digital), software (programas) y datos geográficos diseñados para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada.

Un SIG es un caso particular de SI en el que la información aparece georreferenciada, es decir incluye su posición en el espacio utilizando un sistema de coordenadas estandarizado resultado de una proyección cartográfica (generalmente UTM). La forma de uso se da mediante la señalización de una zona, para de esta manera se pueda conocer ciertas características de dicho lugar, esto se puede dar de manera inversa colocando la información que tengamos para hallar el lugar cartográfico.

Es así como la aplicación del SIG pueden resolver varios puntos entre ellos:

1. **Localización:** ubicación de las características de un lugar concreto.
2. **Condición:** el cumplimiento o no de unas condiciones impuestas al sistema.
3. **Tendencia:** comparación entre situaciones temporales o espaciales distintas de alguna característica.
4. **Rutas:** cálculo de rutas óptimas entre dos o más puntos.
5. **Pautas:** detección de pautas espaciales
6. **Modelos:** generación de modelos a partir de fenómenos o actuaciones simuladas.

La tecnología SIG trabaja con información digital, para ello uno de los métodos más utilizados es la digitalización en el cual, a partir de un mapa impreso o con información tomada en campo, se convierte en un medio digital, por medio de un Diseño Asistido por Ordenador (DAO o CAD). Gracias a la gran disponibilidad de imágenes orto-rectificadas (tanto de satélite como aéreas), la digitalización se abre paso convirtiéndose en la mejor forma de obtener información geográfica (Sarría).

Ilustración 5. Representación de los modelos del SIG

Fuente:

http://geoservice.igac.gov.co/contenidos_telecentro/fundamentos_sig/cursos/sem_2/uni2/index.php?id=2

2.2.1 Formato Ráster

Un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizados en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información. Es una codificación de datos geográficos, en la que se puede encontrar información de una porción del territorio en una escala en el mapa digital.

El resultado de esta codificación ráster es una discretización tanto de las coordenadas de los elementos constitutivos del mapa como de la variable representada, por ende la información recolectada, será aproximada a la realidad con un margen de error, el cual dependerá de la precisión de la malla o rejilla (ArcGIS, s.f.).

Los datos almacenados en formato ráster representan fenómenos del mundo real:

- Los datos temáticos (también conocidos como discretos) representan entidades como datos de tierra o de uso de la tierra.
- Los datos continuos representan fenómenos como la temperatura, la elevación o datos espectrales, entre ellos imágenes satelitales y fotografías aéreas.

Las imágenes incluyen mapas escaneados o dibujos y fotografías de edificaciones.

Ilustración 6. Imagen con información Ráster

Fuente: <https://www.linkedin.com/pulse/do-you-know-your-vector-from-raster-david-macfarlane>

Si bien la estructura de datos ráster es simple, es excepcionalmente útil para una amplia variedad de aplicaciones. En un SIG, los usos de los datos ráster se pueden dividir en cuatro categorías principales:

- Rásteres en forma de mapas base: Son las ortografías de fotografías aéreas, imágenes de satélite y mapas escaneados.

Ilustración 7. Imagen satelital Ráster en forma de mapa base

Fuente: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>

- Rásteres en forma de mapas de superficie: Estos son apropiados para representar datos que cambian continuamente en un entorno (superficie). En el siguiente

ejemplo, se visualiza la elevación de una zona, en la cual se utiliza el color verde para mostrar una menor elevación y celdas de color rojo, rosa y blanco para mostrar elevaciones mayores.

Ilustración 8. Imagen Ráster de mapas de superficie

Fuente: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>

- Ráster en forma de mapas temáticos: Este consiste en clasificar una imagen satelital por categorías de cobertura de suelo, básicamente, esta actividad agrupa los valores de datos multiespectrales en clases (como tipo de vegetación) y asigna un valor categórico.

Ilustración 9. Imagen Ráster de mapa temático

Fuente: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>

2.2.2 Formato Vectorial

El formato vectorial define objetos geométricos (puntos, líneas y polígonos) mediante la codificación explícita de sus coordenadas. Los puntos se codifican en formato vectorial por un par de coordenadas en el espacio, las líneas como una sucesión de puntos conectados y los polígonos como líneas cerradas (formato orientado a objetos) o como un conjunto de líneas que constituyen las diferentes fronteras del polígono (formato Arco/nodo).

Este formato resulta especialmente adecuado para la presentación de entidades reales ubicadas en el espacio (carreteras, ríos, parcelas de cultivo). También resulta más adecuado que el raster cuando se manejan datos que suponen un valor promediado sobre una extensión de territorio que se considera homogénea, los límites de la misma pueden ser arbitrarios o no (por ejemplo estadísticas municipales, datos piezométricos en acuíferos, etc) (Universidad de Murcia, s.f.).

Como se describe, Estos datos constan de 3 elementos:

- ❖ Punto: Describe dimensiones en X e Y.
- ❖ Línea: Hace representar a base de los valores X y Y que son diferentes puntos que se intersecan para hacer segmentos.
- ❖ Polígono: Una serie de segmentos que se unen para generar una figura cerrada.

La unión de estos generan nodos, en los cuales se almacena la información de manera explícita. Ello implica el almacenamiento explícito de la topología, sin embargo solo se almacena aquellos puntos que definen las entidades y todo el espacio fuera de estas no es considerado.

Ilustración 10. Imagen con información geográfica de tipo Vectorial

Fuente: <http://educaciongeograficalicenciatura.blogspot.pe/2015/03/los-sistemas-de-informacion-geografica.html>

2.3 Ecuación USLE

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) es un método cuantitativo de evaluación indirecta de la pérdida de suelo por procesos de erosión hídrica, las características del suelo, pendientes, entre otros. La estimación de la erosión se realiza a partir del modelamiento de la respuesta del sistema natural del suelo frente a la precipitación pluvial en su mayor parte. Por otro lado, los requerimientos de datos para la ecuación son bajos, si se compara con otros modelos de estimación de pérdida de suelo.

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

Donde:

A= Es la pérdida de suelo expresado en Toneladas por hectárea para una duración de lluvia específica.

R= Es el factor de lluvia, que es medido por el poder erosivo de la lluvia expresado en toneladas metro por hectárea hora o en joule por metro cuadrado.

K= Es el factor de erodabilidad del suelo, es erosión estándar en tonelada por hectárea por unidad de erosividad.

L= Es el factor longitud de pendiente, expresa la relación de pérdida de suelo de una pendiente con una longitud dada y la pérdida de suelo de una pendiente con una longitud estándar de 22.13 m, con idénticos valores de erodabilidad.

S= Es el factor de gradiente pendiente, expresa la relación de pérdida de suelo de una gradiente de pendiente específica y la pérdida de suelo de una pendiente con gradiente estándar de 9% bajo otras condiciones similares, definen el efecto de la inclinación de la pendiente sobre la pérdida de suelo por unidad de área.

C= Es el factor de cobertura vegetal, expresa la relación de pérdida de suelo de un área con cobertura, y cuanto efecto tiene que el suelo presente vegetación o no para facilitar la pérdida de suelo.

P= Es el factor de prácticas de conservación de suelo que expresa la relación de pérdida de suelo de un área con cobertura y manejo específico, como cultivo en contorno, cultivo en bandas o terraza, entre otros.

La ecuación se aproximará más a la realidad, siempre y cuando se tenga todos los factores determinados de manera correcta y más exacta posible.

La metodología USLE es una ecuación desarrollada por Wischmeier y Smith (1958 y 1978) en EE. UU. a partir de resultados obtenidos, durante los años 50, de un número muy elevado de parcelas de campo instaladas en diferentes localidades del país, con condiciones climáticas, edáficas, topográficas y de usos muy variados (Ibañez Asencio, Moreno Román , & Gisbert Blanquer, 2012).

Por otro lado, en la actualidad también se usa la metodología RUSLE, la cual no es más que la misma ecuación, pero revisada, esta comprende nuevas metodologías para la obtención de los distintos factores basadas en un historial de información de la zona a estudiar, y con ello poder hacer la ecuación más próxima a la realidad. Si bien es una mejora, lamentablemente al ser más específico, es más complicado obtener la información necesaria (ya que nuestro país no tiene un registro continuo para la obtención

de datos de cada factor), además que en líneas generales un método “específico” sólo aumentaría el valor del poder erosivo en determinada(s) zona(s), pero ello no quita que seguirá siendo propensa a los deslizamientos y que se deberían tomar acciones.

2.3.1 Definición de sus componentes

➤ Factor de Erosividad de la lluvia R

Representa la capacidad de la precipitación en producir erosión. Esta se calcula en base a la energía cinética de la precipitación, que es en definitiva la energía capaz en desgastar la superficie del suelo. Este parámetro, es indispensable para calcular la pérdida de suelo. En esta ocasión el SENAMHI nos proporcionó la data meteorológica de las estaciones que comprende la cuenca del Río Perené.

Debido en muchos casos, a la falta de datos, se desarrollan nuevas metodologías para la determinación del factor R, tal es el caso de las Precipitaciones máximas ocurridas en 24 horas, desarrolladas por Roldan (2005). En esta metodología el factor R se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$R = \sum_{j=1}^n (210,2 + 89 \times \text{Log} I_j) \times (I_j \times T_j) \times I_{30}$$

Donde:

R= Es el índice de erosión pluvial anual ($\text{J} \cdot \text{cm} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$).

I_j = Intervalos homogéneos del aguacero.

T_j = Periodo de tiempo en horas para intervalos homogéneos de lluvia del aguacero.

I_{30} = Máxima intensidad de lluvia durante el aguacero ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$).

La expresión $(210,2 + 89 \times \text{Log} I_j) \times (I_j \times T_j)$, es la energía cinética la cual queda resumida de la siguiente forma:

$$R = \sum_{j=1}^n EC_{24} \times I_{30}$$

Donde:

EC_{24} : Es la energía cinética para un día de precipitación en J/m^2 .

Gracias a esta simplificación se puede calcular la energía cinética a través de la precipitación diaria de 24 horas (CARDENAS ESTEBAN, 2013, Junio 14) de la siguiente manera:

Si $P_{24} \leq 140 \text{ mm}$

$$EC_{24} = 17882 \times (1 - 3.5^{(-3.279 \times 10^{-6} \times P_{24}^2 - 6.2967 \times 10^{-4} \times P_{24})})$$

Si $140 \geq P_{24} \geq 870 \text{ mm}$

$$EC_{24} = 17882 \times (1 - 3.5^{(-1.8392 \times 10^{-6} \times P_{24}^2 - 8.322 \times 10^{-4} \times P_{24})})$$

Donde:

P_{24} : Es la precipitación registrada en 24 horas, expresada en mm.

➤ Factor de erosividad del suelo K

El factor K describe la erosionabilidad del suelo o la vulnerabilidad a la acción del agua (TOLIMA, 2007). Es la susceptibilidad del suelo a erosionarse y sufrir pérdidas debido a la erosión. Para ello es necesario tener la información de la textura, estructura, estabilidad de los agregados, cobertura, entre otros.

Para la obtención de este dato se pueden usar dos formas: la obtención de la información a partir de pruebas en campo (la cual se asemeja con mayor precisión a la realidad), así mismo, para casos prácticos se puede usar los nomogramas desarrolladas por Wischmeier y Smith (Ibañez Asencio, Moreno Román , & Gisbert Blanquer, 2012).

Cuando no se tiene la información necesaria para la aplicación de las metodologías descritas arriba, también existe la posibilidad de extraer información a partir del mapa de suelos de la FAO, esta organización cuenta con un mapa detallado de todo el mundo del cual se puede obtener la información de los contenidos de arcilla, limo, arena y contenido de carbono orgánico (Nations Food and Agriculture Organization of the United, s.f.).

Ilustración 11. Mapa de suelos de mundo

Fuente: <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>

Con la metodología para determinar el factor K, según investigaciones realizadas por Rejman y Usowicz el cual está dado por una serie de fórmulas que nos permiten hallar el factor. (R.Wawer, 2005)

$$K_{USLE} = K_w = 0.1317 \times f_{csand} \times f_{cl-si} \times f_{orgc} \times f_{hisand}$$

Donde:

f_{csand} = Es un factor que disminuye el indicador K en suelos con alto contenido de arena gruesa y aumenta para suelos con poca arena.

f_{cl-si} = Es el factor que disminuye los coeficientes de erodabilidad del suelo cuando este presenta altas relaciones arcilla-limo.

f_{orgc} = Reduce valores de K en suelos con alto contenido de carbono orgánico.

f_{hisand} = Disminuye valores de K para suelos con contenido de arena extremadamente alto.

$$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 \times \exp \times \left[-0.256 \times m_s \times \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.25 \times orgC}{orgC + \exp \times [3.72 - 2.95 \times orgC]} \right)$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0.7 \times \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \times [-5.51 + 22.9 \times \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)]} \right)$$

m_s = la fracción del contenido de arena (0.05-2.00 mm diámetro) (%)

m_{silt} = La fracción del contenido de limo (0.002-0.05 mm diámetro) (%)

m_c = La fracción del contenido de arcilla (<0.002 mm diámetro) (%)

$orgC$ = Contenido de Carbono Orgánico (SOC) (%)

➤ Factor Topográfico LS

Este factor está ligado al efecto de la longitud, así como del ángulo de inclinación del desnivel que se encuentra propenso a sufrir las pérdidas de suelo debido a la erosividad.

Para la obtención del factor LS se hace uso de nomogramas. Uno de estos métodos para hallar el factor LS para cuencas son los de “densidad de drenaje” y “pendiente media” desarrollados por Horton o el método del “contorno-punto-extremo” de Williams y Berndt. Estos métodos se encuentran descritos en el manual “Restauración Hidrológico Forestal y control de la erosión” realizado por TRAGSATEC (1994) (Ibañez Asencio, Moreno Román , & Gisbert Blanquer, 2012).

Otro método para la obtención del factor LS, es mediante la metodología propuesta por Desmert & Grovers (1996) citado por Velásquez (2008), en la cual se emplean las siguientes ecuaciones:

$$L = \left(\frac{\gamma}{22.13} \right)^m = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m \times D^{m+2} \times (22.13)^m}$$

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

$$F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3(\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

Donde:

L= factor longitud

β = pendiente a nivel pixel

m= pendiente

F= factor en función de la pendiente

D= tamaño del pixel (cell size)

A= Es la acumulación del flujo a nivel pixel

x=coeficiente de forma (x=1 para sistemas pixeleados)

Una vez determinado el factor L, se procede con el factor S el cual se determina de la siguiente manera:

$$\text{Si } \tan \beta < 0.09 \quad S_{(i,j)} = 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03$$

$$\text{Si } \tan \beta \geq 0.09 \quad S_{(i,j)} = 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0.5$$

Cada una de las fórmulas se desarrolla mediante el comando de arctoolbox del ArcGIS.

➤ Factor de Cobertura vegetal C

Este factor indica cuan protectoras resultan las plantas y la vegetación existente en el suelo, con respecto al impacto de las gotas de la lluvia y la potencia del flujo superficial que se forma. Se expresa mediante una relación entre las pérdidas anuales de una parcela con respecto a una determinada cubierta vegetal.

El factor C o factor de cobertura y manejo de la vegetación, se da a través de la aplicación del Normalized-Difference Vegetation Index (NDVI) los cuales se desarrollan mediante las imágenes LAND SAT. El NDVI (Near Infrared – Red) / (Near Infrared + Red) es un índice de vegetación el cual es usado para estudios que estén relacionados a la vegetación. Este índice nos puede decir cuanta biomasa verde yace en el lugar de estudio. El resultado es un indicador gráfico que nos muestra y sirve para analizar las zonas que contengan vegetación o no (wiki spaces, s.f.).

Para la obtención de los Índices de Vegetación se hace uso de la fórmula:

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)}$$

NIR: Banda infrarroja cercana.

VIS o RED: Banda roja.

Ilustración 12. Interpretación de los índices de vegetación

Fuente: http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php

Tabla 1
Clasificación de los valores del NDVI

Clasificación	Valor
Nubes y agua (NA)	< 0.01
Suelo sin vegetación (SV)	0.01 - 0.1
Vegetación ligera (VL)	0.1 - 0.2
Vegetación mediana (VM)	0.2 - 0.4
Vegetación alta (VA)	> 0.4

Fuente: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000100007

Ilustración 13. Índices de vegetación interpretación

Fuente: <http://www.ece.montana.edu/seniordesign/archive/SP15/OpticalWeedMapping/ndvi.html>

La ecuación para hallar el factor C:

$$C = e^{\left[-\alpha \times \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)}\right]}$$

Y de las imágenes LANDSAT:

$$NVDI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} = \frac{Banda\ 5 - Banda\ 4}{Banda\ 5 + Banda\ 4}$$

Los valores α y β son parámetros adimensionales que determinen la forma de la curva relacionando el índice de NDVI y el factor C.

Estos valores según estudios realizados por Van der Knijff, quien encontró que genera mejores resultados asumiendo una relación lineal. Por lo cual recomienda los valores de 2 para α y 1 para β .

➤ Factor de Medidas de Conservación P

Está relacionado a cuan eficiente resulta ser el control de la erosión que se consigue mediante medidas de preservación. Las técnicas más representativas son

el laboreo a nivel, el cultivo en fajas alternantes y el aterrazado (Ibañez Asencio, Moreno Román , & Gisbert Blanquer, 2012).

Este factor, hace referencia a las prácticas de conservación realizadas en la zona de estudio. Esto debido a que el hombre modifica constantemente el suelo en el que yace, ya sea para cultivos, así como cualquier otra actividad, esto conlleva a que se modifique la topografía del suelo, tales como: terrazas, cultivos en franjas y curvas de nivel. Se sabe que si el suelo tiene vegetación que lo cubra se puede decir que es más resistente a la erosión ya que las raíces de la vegetación funcionan como un soporte para evitar dicho suceso y cabe resaltar que las prácticas de conservación hacen que el suelo conserve sus nutrientes, pues no se verá afectado por los flujos. Las limitantes que existen en el procesamiento es la obtención de data confiable.

Como todos los factores ya vistos hasta ahora, existen varios métodos para la obtención del factor P. Una de las metodologías es el uso de la tabla propuestas por WELTZ *et al.* (1978), WISCHMEIER y SMITH (1978).

Tabla 2
Valores de factor P de acuerdo con curvas de nivel modificadas por el hombre

**VALORES DE FACTOR DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS P, EN TERRENOS FORESTALES
(Weltz et al, 1978)**

Práctica de conservación de suelos	Factor P
En curvas de nivel (1-16% pendiente)	0.60
En curvas de nivel (17-25% pendiente).....	0.85
Terrazas (desagües encrespadas).....	0.14
Terrazas (desagües subterráneas).....	0.05
Hoyos a nivel.....	0.13
Sin prácticas de conservación.....	1.00

Fuente: TÁNAGO

Tabla 3
Valores de factor P según pendientes modificadas por el hombre

VALORES DEL FACTOR "P" Y LIMITES DE LONGITUD DE PENDIENTE PARA CULTIVOS EN CURVAS DE NIVEL (Wischmeier y Smith, 1978)

PENDIENTE (%)	valor de P	longitud * máxima (m)
1 a 2	0.6	120
3 a 5	0.5	90
6 a 8	0.5	60
9 a 12	0.6	36
13 a 16	0.7	24
17 a 20	0.8	18
21 a 25	0.9	15

* Estos límites pueden ser aumentados si la cobertura de residuos supera al 50%

VALORES DE "P" PARA TERRENOS CON TERRAZAS Y EN CURVAS DE NIVEL

PENDIENTE (%)	FACTOR DE CURVAS DE NIVEL **	FACTOR CULTIVOS EN FRANJA
1 a 2	0.6	0.3
3 a 8	0.5	0.25
9 a 12	0.6	0.3
13 a 16	0.7	0.35
17 a 20	0.8	0.4
21 a 25	0.9	0.46

** VALORES PARA EROSION ENTRE TERRAZAS

Fuente: TÁNAGO

Como se aprecia para la obtención del factor P, es necesario el uso de un mapa con la información de las curvas de nivel, las terrazas, zonas de cultivo, etc. Estas prácticas de conservación son dirigidas por un profesional en la rama y se recomienda que posterior a ello se deba procesar la información en ArcGis, como requisito de actualización de información de la finca.

Otra metodología es la obtención del factor P mediante el uso de la información del factor C (factor de cobertura) el cual nos indica que según la cantidad de vegetación que yace en esa zona le corresponde un valor de factor P en la cual

como ya sabemos el valor 1 es nula conservación del suelo y el valor 0 es una conservación efectiva del suelo.

Tabla 4
Valores de factor P obtenidos a partir del factor C

Tipo de cobertura	Factor C	Factor P
Area urbana	0.1	1
Suelo desnudo	0.35	1
Bosque denso	0.001	1

Tipo de cobertura	Factor C	Factor P
Bosque ralo	0.01	1
Bosque mezclado con cultivos (Agroforestería)	0.1	0.8
Cultivos	0.5	0.5
Cultivos de inundación	0.1	0.5
Pastura densa	0.08	1
Pastura rala	0.2	1
Pasturas con cultivos	0.25	0.8
Humedales	0.05	1
Cuerpos de agua	0.01	1

Fuente: TÁNAGO

Para el primer método, tabla propuesta por WELTZ *et al.* (1978), WISCHMEIER y SMITH (1978), es necesario la información de las terrazas de cultivo y pendientes de los trabajos de conservación que se realizan sobre toda la cuenca, dicha información es complicada de obtener para nuestra cuenca, debido que las cooperativas aún no están a la vanguardia en tecnología de procesamiento de datos.

Lo cual nos lleva al siguiente método, cálculo a partir del factor C, el cual nos permite obtener un valor del factor de P, el problema con ello es que por cada pixel existe un valor de C, en nuestra cuenca tenemos millones de píxeles, sin embargo tomamos como referencia algunos píxeles y se apreció en las tablas para bosques ralos con factor C = 0.01 se asigna un factor P de 1 y Pastura rala de factor C = 0.2 se asigna un factor P de 1 también, y así sucede con varios factores a los cuales de manera inmediata se asigna el valor de P = 1. Estos son dos ejemplos

puntuales, que no se pueden tomar valores representativos para un área extensa como la cuenca del Río Perené.

3 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA

3.1 Ubicación

La cuenca del Río Perené se encuentra en el centro del Perú, abarca parte de la sierra de Junín y la selva central, así como parte del departamento de Pasco. Las provincias que abarcan son por el lado del departamento de Cerro de Pasco, las provincias Pasco y Oxapampa y por el lado del departamento de Junín, las provincias de Tarma, Junín, Jauja, Concepción, Huancayo, Satipo y Chanchamayo. Los principales afluentes al río Perené son; Huatziriqui, Ubiriqui, Osa, Ipoqui, Auziqui y Pangoa; del mismo modo el Río Perené fluye en el río Ene. Además, la Cuenca del Río Perené limita por el Norte con la Cuenca del Huallaga, por el Este con la Cuenca del Urubamba, Cuenca del Río Tambo y Cuenca del Río Ene y por el oeste la cuenca del Río Mantaro.

El Río Perené, es un río de corto recorrido del Perú. El principal afluente, es el Río Chanchamayo y el Río Paucartambo, así mismo el Río Perené confluye con el río Ene, en el centro poblado de Puerto Prado para formar el río Tambo, parte del curso principal del río Amazonas (aguas abajo, el Tambo se une con el río Urubamba para formar el río Ucayali, que a su vez se une al río Marañón formando el Amazonas). La cuenca del Río Perené en su composición hidrográfica se encuentra conformada por las siguientes subcuencas (COMISION TECNICA REGIONAL DE JUNIN):

Tabla 5
Subcuencas del Río Perné D=Margen derecha I=Margen izquierda

SUBCUENCAS	MARGEN	CODIFICACION
1. Río Mullucro	Nace aquí	4995489
2. Río Seco	D	4995488
3. Río Palcamayo	I	4995486
4. Río Ricran	D	4995484
5. Río Huasihuasi	I	4995483
6. Río Palca	D, I	499548
7. Río Oxabamba	I	4995482
8. Río Tulumayo	D	499549
9. Río Ubirique	I	4995472
10. Río Pichanaki	D	4995459
11. Río Ipoke	D	4995439
12. Río Autiqui	I	499544
13. Río Pangoa	D	499542

Fuente: Unidades Hidrográficas del Perú, ANA

Ilustración 14. Mapa ubicación de Región Junín y Cerro de Pasco

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Mapa-de-distribucion-del-estilo-naturalista-del-centro-en-base-a-datos-de-Guffroy-1999_fig1_263655265

Ilustración 15. Mapa de Cuenca del Río Perené

Fuente: Región Junín

Ilustración 16. Mapa departamental de Junín

Fuente: <http://aragoncurillamiregionjunin.blogspot.com/2015/08/asi-es-mi-region.html>

Ilustración 17. Afluente del Río Perené

Fuente: Google Maps

El departamento de Junín cuenta con una extensión de 44 197 km², el cual representa el 3.4% del territorio nacional, y comprende parte de sierra, con una extensión de 20 821 km² y una parte ceja de selva y selva con una extensión de 23 376 km² (PERU, s.f.). Asimismo, la cuenca del Río Perené cubre en su mayoría el departamento de Junín con parte de Cerro de Pasco, haciendo un total de área superficial de la Cuenca de 18 216.25 Km².

Ilustración 18. Mapa departamental muestra la extensión de la Cuenca del Perené

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 19. Mapa Provincial de la cuenca del Río Perené

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 20. Sub cuencas de la Cuenca del Río Perené

Fuente: Autoridad Nacional del Agua

3.2 Información Cartográfica e Imágenes Satelitales

3.2.1 Imágenes Ráster

El RASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM), son imágenes satelitales de la NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) creado a partir de 1,3 millones de imágenes estéreo recogidas por el radiómetro japonés llamado ASTER, las cuales se encuentran disponible para el público en general mediante descargas. Entre sus aplicaciones destacan:

- Orto rectificación de imágenes
- Elaboración de pendientes
- Definición de perfiles topográficos
- Delimitación de cuencas y redes hidrográficas.

El Ministerio de Ambiente cuenta con el mapa de nuestro país delimitado, el cual es de acceso libre y nos permitió realizar la descarga de las imágenes ráster de la zona a analizar, como se evidencia en la siguiente imagen:

Ilustración 21. Geo Servidor del Ministerio del Ambiente del Perú

Fuente: http://geoservidor.minam.gob.pe/geoservidor/download_raster.aspx

3.2.2 Imágenes LANDSAT

Las imágenes LANDSAT (LAND= tierra y SAT=satélite), que inicialmente se llamaron ERTS (Earth Resources Technology Satellites), fue la primera misión de los Estados Unidos para monitorear los recursos terrestres. Están conformadas por 8 satélites de los cuales se encuentran activos actualmente el 5 y 8. El mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la aeronáutica y del Espacio (NASA) mientras

que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Son de suma utilidad para el monitoreo de la vegetación, aplicaciones geológicas, en el estudio de los recursos naturales y de cultivos.

Tabla 6
Descripción de las bandas del satélite LAND SAT - 8

Atributo	Descripción
Tipo de Producto	Imagen L1T (Precision, Terrain Corrected) - ortorrectificada
Formato de Imagen	Archivo GeoTIFF Metadato en formato texto
Espaciamiento de pixel	15 m Pancromático 30 m Multiespectral
Tamaño de Producto	185 x 185 km
Correcciones Geométricas	Proyectadas a un datum y proyección cartográfica, usando un Modelo Digital de Elevación (SRTM) y puntos de control terrestre (GCP)
Datum Horizontal	WGS84
Proyección Cartográfica	UTM (Universal Transversa de Mercator)
Bandas Espectrales	11 bandas: Aerosol costero (Coastal Aerosol) 430 – 450 nm Azul (Blue) 450 – 510 nm Verde (Green) 530 – 590 nm Rojo (Red) 640 – 670 nm Infrarrojo cercano (NIR) 850 – 880 nm SWIR 1 (SWIR 1) 1570 – 1650 nm SWIR 2 (SWIR 2) 2110 – 2290 nm Pancromático (Pan) 500 – 680 nm Cirrus (Cirrus) 1360 – 1380 nm Infrarrojo térmico (TIRS) 1 10600 – 11190 nm Infrarrojo térmico (TIRS) 2 11500 – 12510 nm
Resolución Radiométrica	12 bits

Fuente: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática de México

En el año 2012 se lanzó al espacio el satélite LANDSAT-8 el cual posee 11 bandas y amplias posibilidades de combinación lo que permitirá un mayor aprovechamiento entre sus principales características tenemos: (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, s.f.)

3.3 Parámetros de la cuenca

Tabla 7
Detalle de Cuenca del Río Perené

RÍO	CUENCA	ESTACIÓN	CATEGORÍA	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
Perené	Río Perené	Perené	HLM	10° 57' 46,9"	74° 50' 0,00"	544

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

El Río Perené, se forma por la confluencia de los ríos Chanchamayo o Tulumayo y Paucartambo, en el departamento de Junín. La naciente del río Chanchamayo se encuentra en los deshielos de la Cordillera Huaytapallana, al este de Huancayo, y en su recorrido recibe por el margen izquierdo los aportes de agua del Río Palca. A las orillas de este río se encuentra situada la ciudad de la Merced. El río Paucartambo tiene su origen en el flanco oriental del Nudo del Paco, debido a los deshielos de la cordillera de Huachón, en Pasco. El principal afluente del río Perené es el Pangoa llamado aguas arriba Río Satipo (SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA, 2007). Asimismo, la cuenca del Río Perené tiene una área superficial de la Cuenca de 18 216.25 Km², un perímetro de 909.514 km y una longitud del Río Perené de 1029.6 Km (Autoridad Nacional Del Agua, 2016).

Tabla 8
Caudales de los ríos de la Cuenca del Río Perené año 2015

RÍO	CAUDAL	ALTITUD	COORDENADAS		USO
	(m³/s)	(m.s.n.m)	E	S	
Río Mullucro	0.253	3107	4024674	8736400	Riego
Río Seco	0.132	3106	423101	8737472	Riego
Río Palcamayo	0.623	2963	428126	8745168	Riego y Piscícola
Río Ricran	5.972	2730	438566	8745956	Riego
Río Huasahuasi	1.821	2716	439647	887481537	Riego
Río Oxabamba	3.054	848	459029	70314	Riego
Río Tulumayo	6.944	808	461930	8770707	Ninguno
Río Paucartambo	8.252	674	469174	8789501	Ninguno
Río Ubirique	4.634	536	500805	8800043	Ninguno
Río Pichanaki	6.893	492	514436	8792853	Ninguno
Río Ipoke	5.341	461	541274	8786448	Ninguno
Río Autiqui	3.768	443	527541	8782944	Ninguno
Río Pangoa	5.835	318	576004	8767455	Ninguno

Fuente: Comisión Técnica Regional de Junín

Ilustración 22. Salida del Río Perené y nacimiento del Río Tambo, en la localidad de Puerto Prado

Fuente: Google Maps

A continuación, se detallará la longitud de los ríos que se encuentran dentro de la Cuenca del Río Perené.

Tabla 9
Ríos de la Cuenca del Río Perené

Nombre de Ríos	Longitud (metros)	Longitud (kilometros)
Río Perené	1029644.5	1029.6
Río Ulcumayo	28268.0	28.27
Río Antuyo	28309.7	28.31
Río Horizonte	53986.4	53.99
Río Sonomoro	76872.3	76.87
Río Pichanaqui	47555.3	47.56
Río Palca	46715.4	46.72
Río Satipo	54525.1	54.53
Río Mazamari	34921.5	34.92
Río Tingo Esquina	23810.5	23.81
Quebrada Mashgo	11407.9	11.41
Río Anashirona	24164.5	24.16
Río Cuyani	23631.5	23.63
Río Nazáategui	112.2	0.11
Río Paucartambo	34755.8	34.76
Río Tulumayo	93953.2	93.95
Río Autiqui	38345.7	38.35
Río Ulcumayo	31613.5	31.61
Río Huachón	75100.3	75.10

Fuente: ARC GIS

4 PROCESAMIENTO DE DATOS

4.1 Factor R

Para el procesamiento del factor R, en primer lugar, se descargó las precipitaciones máximas de 24 horas de la página nacional del SENAMHI de todas las estaciones que se mencionan a continuación:

Tabla 10
Estaciones de la Cuenca del Río Perené

ID	Estacion	Latitud	Longitud	Este	Oeste	ppmax (mm)
0	Huasahuasi	-11.15	-75.37	432689	8756307	33.8
1	Ricran	-11.32	-75.31	443661	8724998	43.7
2	Tarma	-11.23	-75.41	425447	8741547	34.0
3	La Oroya	-11.34	-75.57	396417	8721191	31.2
4	Jauja	-11.46	-75.28	449155	8699205	48.8
5	Ingenio	-11.52	-75.17	469141	8688174	64.7
6	Comas	-11.44	-75.7	487287	8702931	36.0
7	Viques	-12.9	-75.14	474614	8656849	59.4
8	Pichanaky	-10.57	-74.49	520031	8789543	104.8
9	Satipo	-11.13	-74.37	541846	8760036	149.0
10	Oxapampa	-10.35	-75.23	458065	8830065	76.0
11	Puerto Ocop	-11.8	-74.15	581898	8769174	94.6
12	San Lorenzo	-11.51	-75.23	458247	8690004	38.4
13	Pozuzo	-10.3	-75.33	439731	8889009	131.2
14	Mezapata	-10.43	-75.23	458083	8815323	106.0

Fuente: SENAMHI

Con la información obtenida, se procedió con la metodología establecida para determinar el factor R. Como ya se describió anteriormente la fórmula para determinar el factor R es la siguiente:

$$R = \sum_{j=1}^n (210,2 + 89 \times \text{Log} I_j) \times (I_j \times T_j) \times I_{30}$$

Donde:

R= Es el índice de erosión pluvial anual ($J \cdot \text{cm} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$).

I_j = Intervalos homogéneos del aguacero.

T_j = Periodo de tiempo en horas para intervalos homogéneos de lluvia del aguacero.

I_{30} = Máxima intensidad de lluvia durante el aguacero ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$).

La expresión $(210,2 + 89 \times \text{Log} I_j) \times (I_j \times T_j)$, es la energía cinética la cual queda resumida de la siguiente forma:

$$R = \sum_{j=1}^n EC_{24} \times I_{30}$$

Donde:

EC_{24} : Es la energía cinética para un día de precipitación en J/m^2 .

Gracias a esta simplificación se puede calcular la energía cinética a través de la precipitación diaria de 24 horas (CARDENAS ESTEBAN, 2013, Junio 14) de la siguiente manera:

Si $P_{24} \leq 140 \text{ mm}$

$$EC_{24} = 17882 \times (1 - 3.5^{(-3,279 \times 10^{-6} \times P_{24}^2 - 6.2967 \times 10^{-4} \times P_{24})})$$

Si $140 \geq P_{24} \geq 870 \text{ mm}$

$$EC_{24} = 17882 \times (1 - 3.5^{(-1,8392 \times 10^{-6} \times P_{24}^2 - 8.322 \times 10^{-4} \times P_{24})})$$

Donde

P_{24} : Es la precipitación registrada en 24 horas, expresada en mm.

Para la determinación del factor R, se usó las precipitaciones máximas de 24 horas de las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca, así como de las estaciones que rodeen a la cuenca para poder realizar la interpolación. (TÁNAGO, 1991).

Se determinó los factores R máximos (para precipitaciones máximas) para cada estación, siguiendo las fórmulas establecidas por la metodología obteniendo como resultado la siguiente tabla:

Tabla 11
Procedimiento para determinar el factor R para evento máximo

Nro	Estacion	Periodo	Años	Latitud	Longitud	x	y	ppmax 24H	Año	Mes	Rmax
1	Pichanaky	1995-2014	19	10°57'	74°49'	520031	8789543	104.8	2005	Enero	2145.08408
2	Jauja	1970-2014	44	11°46'	75°28'	449155	8699205	48.8	1979	Noviembre	842.786783
3	San Lorenzo	1970-2003	33	11°51'	75°23'	458247	8690004	38.4	1971	Diciembre	638.307204
4	Tarma	1970-2014	44	11°23'	75°41'	425447	8741547	34	1975	Septiembre	555.695026
5	Huasahuasi	1970-2014	44	11°15'	75°37'	432689	8756307	33.8	2007	Diciembre	551.99603
6	Satipo	1970-2014	44	11°13'	74°37'	541846	8760036	149	1996	enero	3368.7522
7	Comas	1994-2014	20	11°44'	75°9'	487287	8702931	36	2011	Diciembre	592.954073
8	Puerto Ocopa	1970-2014	44	11°9'	74°15'	581898	8769174	94.6	2003	marzo	1884.85746
9	La Oroya	1994-2014	20	11°34'	75°57'	396417	8721191	31.2	2012	Enero	504.356852
10	Ricran	1970-2014	44	11°32'	75°31'	443661	8724998	43.7	1981	Febrero	740.914786
11	Ingenio	1970-2014	44	11°52'	75°17'	469141	8688174	64.7	1981	Diciembre	1179.44277
12	Viques	1988-2014	26	12°9'	75°14'	474614	8656849	59.4	1989	Noviembre	1064.089
13	Pozuzo	1970-2014	44	10°3'	75°33'	439731	8889009	131.2	1976	Febrero	2858.871
14	Oxapampa	1970-2014	44	10°35'	75°23'	458065	8830065	76	1997	Diciembre	1435.42844
15	Mezapata	1971-2003	32	10°43'	75°23'	458083	8815323	106	1997	Agosto	2176.30194

Fuente: ArcGIS

Para que el programa ubique las estaciones hidrográficas se importó la data, el cual fue un archivo de tipo Excel (Ilustración 24).

Ilustración 23. Importación de estaciones Hidrográficas

Fuente: Propia

Una vez importado el archivo se mostraron los valores del factor R de cada estación en el Arc Gis para su posterior interpolación y de esta manera poder generar las áreas de influencia que ejerció cada estación.

Ilustración 24. Estaciones con el Factor R máximo en el área de influencia de la cuenca

Fuente: Propia

Posteriormente se realizó una interpolación con herramientas del ARC GIS, específicamente en la barra del arctool box, spatial analyst tool, interpolation, IDW.

Ilustración 25. Comando interpolación IDW para generar el mapa del factor $R_{m\acute{a}x}$

Fuente: ArcGIS

Finalmente, se generó el mapa de factor R para un evento máximo, cabe resaltar que este factor indica la erosión hídrica potencial para la cuenca, analizado con las precipitaciones máximas de 24 horas. Por otro lado, la unidad de medida es de Mega Joule por milímetro entre Hectárea por hora (MJ.mm/ha.h).

Ilustración 26. Mapa de Factor R para evento máximo

Fuente: ArcGIS

4.2 Factor K

Para la obtención del factor K, en primer lugar, se obtuvo las características del suelo mediante el servidor de la FAO, esta organización cuenta con un mapa detallado de todo el mundo del cual se puede obtener la información de los contenidos de arcilla, limo, arena y contenido de carbono orgánico (Food and Agriculture Organization of the United Nations, s.f.).

Ilustración 27. Mapa de suelo del mundo

Fuente: <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>

Se procedió a descargar la imagen (el cual contiene datos) para ser importado posteriormente al programa ArcGIS.

Ilustración 28. Mapa de suelos proporcionado por la FAO importado al ARC GIS

Fuente: ArcGIS

A continuación, se delimitó la cuenca en el programa ArcGis para poder trabajar solo con los datos correspondientes de la cuenca, posterior se extrajo la cantidad y proporción de los suelos que se hallan allí, para su procesamiento.

Ilustración 29. Mapa de suelos de la cuenca del Río Perené

Fuente: ArcGIS

Teniendo la cuenca delimitada proporcionada por la FAO, se pudo obtener los datos necesarios (proporciones de materia en la cuenca) para determinar el Factor K, mediante la metodología escogida descrita en el marco teórico donde:

$$K_{USLE} = K_w = 0.1317 \times f_{csand} \times f_{cl-si} \times f_{orgc} \times f_{hisand}$$

Donde:

f_{csand} = Es un factor que disminuye el indicador K en suelos con alto contenido de arena gruesa y aumenta para suelos con poca arena.

f_{cl-si} = Es el factor que disminuye los coeficientes de erodabilidad del suelo cuando este presenta altas relaciones arcilla-limo.

f_{orgc} = Reduce valores de K en suelos con alto contenido de carbono orgánico.

f_{hisand} = Disminuye valores de K para suelos con contenido de arena extremadamente alto.

$$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 \times \exp \times \left[-0.256 \times m_s \times \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.25 \times orgC}{orgC + \exp \times [3.72 - 2.95 \times orgC]} \right)$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0.7 \times \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \times \left[-5.51 + 22.9 \times \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right)$$

m_s = la fracción del contenido de arena (0.05-2.00 mm diámetro) (%)

m_{silt} = La fracción del contenido de limo (0.002-0.05 mm diámetro) (%)

m_c = La fracción del contenido de arcilla (<0.002 mm diámetro) (%)

$orgC$ = Contenido de Carbono Orgánico (SOC) (%)

Procesando los datos con las fórmulas dadas se obtuvo el siguiente cuadro:

Tabla 12
Datos del mapa de la FAO y resultados obtenidos del factor K

Soil sample	m_s (sand) Top soil %	m_{silt} (silt) Top soil %	m_c (clay) Topsoil %	orgC oraganic carbon %	Fcsand	F cl-si	F orgc	F hisand	K usle	K
I	58.9	16.2	24.9	0.97	0.200001	0.7563137	0.9271688	0.9942353	0.1394383	0.018364
Gd	18.9	21.8	59.3	2.92	0.206822	0.6742651	0.7506397	0.9999988	0.10467874	0.013786
Ao	53.6	15.8	30.6	2.25	0.2000029	0.7238386	0.7558667	0.9980558	0.10921392	0.014383
Th	41	41.3	17.7	7.03	0.2006329	0.8985234	0.75	0.9998616	0.13518634	0.017804
Kk	39.1	37	23.9	1.93	0.2005476	0.8611431	0.7667921	0.9999076	0.13241288	0.017439

Fuente: Propia

I: Lithosols o litosoles (se considera un tipo de suelo que aparece en escarpas y afloramiento rocosos, su espesor es menor a 10cm y sostiene una vegetación baja).

Gd: Dystric Gley (suelos con propiedades hidromórficas dentro de los 50 cm de la superficie, la flora que se suele en estos suelos es de la variedad higrófila).

Ao: Orthic Acrisols (proviene de la alteración de rocas ácidas, con alto contenido de arcillas y de baja saturación de las bases, hay predominancia de este tipo de suelo en las zonas con clima tropical húmedo y subtropical).

Th: Humic Andosols (suelo de origen volcánico de color oscuro y muy porosos, se desarrollan a partir de cenizas y otros materiales volcánicos. Contienen gran contenido de materia orgánica (20%) además de gran retención de agua).

Kk: Calcic Kastanozems (suelos ricos en humus con contenido orgánico y altos contenidos de calcio, se encuentran en zonas climáticas secas)

Factor K, es la erodabilidad del suelo o, dicho en otras palabras, la capacidad del suelo a erosionarse por propiedades específicas de cada tipo de suelo, este se expresa en T. ha.h/MJ.ha.mm.

Ilustración 30. Mapa de factor K

Fuente: Propia ArcGIS

4.3 Factor LS

Para la obtención del factor LS, se usó la metodología ya explicada previamente de Desmert & Grovers (1996) citado por Velásquez (2008), en la cual se emplean las siguientes ecuaciones:

$$L = \left(\frac{\gamma}{22.13} \right)^m = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m \times D^{m+2} \times (22.13)^m}$$

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

$$F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3(\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

Donde:

L= factor longitud

β = pendiente a nivel pixel

m= pendiente

F= factor en función de la pendiente

D= tamaño del pixel (cell size)

A= Es la acumulación del flujo a nivel pixel

x=coeficiente de forma (x=1 para sistemas pixeleados)

En primer lugar, se descargaron las imágenes raster de la cuenca del Geo Servidor del Ministerio de Ambiente (MINAM). La cual es un servidor gratuito en la cual se puede descargar las imágenes. Se delimitó el área a descargar.

Ilustración 31. Geoservidor del MINAM para descargar imágenes Ráster de la Cuenca

Fuente: http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/download_raster.aspx

Delimitada la cuenca en el Geoservidor, se descargó e importó las imágenes al programa ArcGIS mostrándose de la siguiente forma:

Ilustración 32. Mapa de elevaciones generado a partir de las imágenes Ráster

Fuente: ArcGIS

Ilustración 33. Mapa de elevación en formato Dem de la cuenca del Río Perené

Fuente: ArcGIS

Ilustración 34. Mapa de elevaciones corregido a valores positivos

Fuente: ArcGIS

Una vez obtenido el mapa de elevaciones corregido, se procedió a calcular los siguientes valores:

1. En primer lugar, se determinó β , mediante el comando del ArcGIS, Arctoolbox, spatial analyst tools, surface, slope (β).
2. En segundo lugar, se determinó F (factor en función de la pendiente) con el comando Arctoolbox, map algebra, raster calculator. En este comando se procedió a escribir la ecuación con el dato de β hallado anteriormente.

$$F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3(\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

3. En tercer lugar, determinamos m (pendiente), de igual manera usamos el comando Arctoolbox, map algebra, raster calculator e ingresamos la fórmula.

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

4. En cuarto lugar, determinamos D (tamaño de píxel o cell size), para ello solo realizamos clic derecho sobre el mapa, properties, source y nos mostró una tabla en la cual nos indica cual es el valor de D.

Ilustración 35. Valor de D (cell size)

Fuente: ArcGIS

5. En quinto lugar, Determinamos el valor de A (es la acumulación del flujo a nivel de píxel). Para ello previamente debimos determinar la dirección del flujo, mediante el comando de Arc toolbox, spatial analyst tools, Flow direction, con ello se generó un mapa de la dirección del flujo. Con ese mismo mapa entramos a los mismos comandos, pero con la diferencia que ya no usaremos Flow direction sino, FLOW ACUMULATION el cual nos dió el mapa de A.

6. Determinadas todas las incógnitas, se procedió a determinar L mediante la fórmula:

$$L = \left(\frac{\gamma}{22.13} \right)^m = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m \times D^{m+2} \times (22.13)^m}$$

Para ello de igual manera, ingresamos a arctoolbox, spatial analyst tools, Map algebra, raster calculator. En la cual ingresamos toda la fórmula.

Una vez determinado el factor L, se procede con el factor S el cual se determina de la siguiente manera:

$$\text{Si } \tan\beta < 0.09 \quad S_{(i,j)} = 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03$$

$$\text{Si } \tan\beta \geq 0.09 \quad S_{(i,j)} = 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0.5$$

Una vez determinado L y S estos se multiplican, mediante los mismos comandos: arctoolbox, spatial analyst tools, Map algebra, raster calculator; obteniendo el mapa final de LS el cual recordemos es adimensional y nos marca la relación entre la pérdida de suelo con una longitud pendiente y la que ocurre en 22.1 m de longitud con un gradiente de 9% estándar.

Ilustración 36. Mapa del factor LS

Fuente: Propia ArcGIS

4.4 Factor C

Para determinar el factor C, se ingresó al Earth Explorer el cual es una sección de la página del Estudio Geológico de los Estados Unidos (U.S.G.S) en cual se encuentran las imágenes satelitales de todo el mundo, y estos se van actualizando diariamente, teniendo una gran cantidad de información de la cobertura terrestre. Estas imágenes son tomadas por el LANDSAT el cual comprende 11 distintas bandas de las cuales, para la determinación del factor C, solo se requirió de las bandas 4 y 5.

Previo al cálculo del factor C, se debe determinar el NDVI el cual es el índice de vegetación o en inglés el Normalized-Difference Vegetation Index, el cual se describe de la siguiente manera:

$$NVDI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} = \frac{Banda\ 5 - Banda\ 4}{Banda\ 5 + Banda\ 4}$$

Donde:

NIR: Banda infrarroja cercana

VIS: Banda roja

Tabla 13
Valores de NDVI

Clasificación	Valor
Nubes y agua (NA)	< 0.01
Suelo sin vegetación (SV)	0.01 - 0.1
Vegetación ligera (VL)	0.1 - 0.2
Vegetación mediana (VM)	0.2 - 0.4
Vegetación alta (VA)	> 0.4

Fuente: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s2007-21222015000100007

Como se mencionó se importan las imágenes del área y la fecha de la cuenca, tanto de la Banda 5 como de la Banda 4 al programa ArcGIS, con los comandos Arctoolbox, spatial

analyst tools, map algebra procedemos a colocar la fórmula del NDVI. Obtenido este, se procedió una vez más a usar los mismos comandos, pero con la diferencia que usaremos la fórmula para el cálculo del factor C que se muestra de la siguiente manera:

$$C = e^{\left[-\alpha \times \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)}\right]}$$

Para los valores α y β , los cuales son parámetros adimensionales que determinen la forma de la curva relacionando el índice de NDVI y el factor C.

Estos valores según estudios realizados por Van der Knijff, quien encontró que genera mejores resultados asumiendo una relación lineal. Por lo cual recomienda los valores de 2 para α y 1 para β .

Cabe mencionar que se analizó 4 años (2014, 2015, 2016 y 2017), lo que quiere decir que requirió las imágenes satelitales de la cuenca para cada año, escogiendo las imágenes que menos nubosidad presentara, debido a que esto no permite realizar un buen análisis del NDVI, y por ende puede arrastrar error en el cálculo del factor C. El factor C es adimensional.

Ilustración 37. Earth Explore del USGS

Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Primer paso, importamos los archivos Banda 4 y Banda 5 en formato .tif, hacemos la operación matemática $NVDI = \frac{NIR-VIS}{NIR+VIS} = \frac{Banda\ 5-Banda\ 4}{Banda\ 5+Banda\ 4}$.

Ilustración 38. Operación de multiplicación para el cálculo del NDVI

Fuente: Propia Arc GIS

Ilustración 39. Mapa NDVI año 2014

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 40. Mapa NDVI año 2015

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 41. Mapa NDVI año 2016

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 42. Mapa NDVI año 2017

Fuente: Propia ArcGIS

El NDVI (Índice de vegetación) nos muestra de manera preliminar cuanta vegetación yace en toda la cuenca, y con ello comprender la magnitud en la variación de la vegetación durante los años analizados.

Como parte del procesamiento se puede determinar que las zonas correspondientes a la selva y que son menos accidentadas presentan en general mayores índices de vegetación (>0.1) mientras que las zonas de la sierra o en específico, las que tienen mayores pendientes (relieve accidentados) es el cual presenta menores índices de vegetación (<0.1).

Determinados los mapas de NDVI para todos los años necesarios, se procedió con el cálculo del factor C, como se muestra a continuación:

En primer lugar, ya teniendo calculado el NDVI, hacemos la operación matemática de $C = e^{\left[-\alpha \times \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)}\right]}$, para obtener el factor C.

Ilustración 43. Cálculo de factor C

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 44. Mapa Factor C año 2014

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 45. Mapa Factor C año 2015

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 46. Mapa Factor C año 2016

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 47. Mapa Factor C año 2017

Fuente: Propia ArcGIS

El factor C (cobertura) presenta un rango que va desde valores positivos mayores a 0 hasta el valor máximo de 1. El valor máximo de 1 indicado en el mapa con la coloración rojo

muestra las zonas con menor cobertura y por ende las más expuestas a erosión, a diferencia de los valores cercanos a 0 los cuales indican alta cobertura y por ende también menos vulnerables a la erosión.

4.5 Factor P

Para la determinación del factor P, es necesario la aplicación de la metodología descrita anteriormente en el Marco Teórico. Lamentablemente debido a la falta de información en la zona acerca de las técnicas de conservación del suelo, no se puede generar ningún mapa de este factor. Por otro lado, calcular este factor mediante el factor C, supone restar precisión al estudio, esto debido a que toma valores de 0 y 1 para P de manera casi arbitraria. Es por ello que se decidió asignar el valor de 1 como factor P y de esta manera no alterar la ecuación y por ende los resultados.

En estudios de microcuencas usando la metodología del USLE en el Perú, se usa 1 como valor para el factor de P, puesto que no hay información acerca de las prácticas de conservación o simplemente no se hacen, es por ello que a manera de reducir precisión (PERALTA, 2016).

4.6 Mapa de Erosión

Para la elaboración del mapa de erosiones (anual) utilizamos el programa ArcGIS, a continuación, se detallará el proceso de su ejecución.

Primero, importamos los insumos para la elaboración del mapa de erosiones, que vendrían a ser los factores.

Ilustración 48. Importación de factores al ArcGIS

Fuente: Propia ARC GIS

Segundo, habiendo importado los factores de la metodología USLE (R, K, LS y C), archivos en formato .tif, como se muestra en la siguiente imagen, se procedió a ejecutar el comando “RASTER CALCULATOR” que hará el producto de la ecuación USLE ($A = R \times K \times L \times S \times P \times C$).

Ilustración 49. Ubicación Raster Calculator

Fuente: Propia ArcGIS

Tercer y último paso, de manera automática saldrán los archivos en formato .tif que se importaron al programa, los seleccionamos y utilizamos la operación matemática de multiplicar, como resultado obtendremos el mapa de erosión final.

Ilustración 50. Multiplicación de factores USLE en ArcGIS

Fuente: Propia ArcGIS

5 RESULTADOS

5.1 Elaboración de Mapas de Erosión Anual por Método USLE

Como parte del objetivo principal trazado, se generó un mapa de erosión de toda la cuenca para los años 2014, 2015, 2016 y 2017 por el método USLE. Con el fin de mejorar la comprensión de los mapas, se importó al programa ArcGIS el mapa de las carreteras más importantes y los ríos que se encuentran dentro de la cuenca (GEO PERU, 2016) Y (MINAM, 2014).

Ilustración 51. Mapa de pérdida de suelos (A) año 2014

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 52. Mapa de pérdidas de suelos (A) año 2015

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 53. Mapa de pérdidas de suelos (A) año 2016

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 54. Mapa de pérdidas de suelos (A) año 2017

Fuente: Propia ArcGIS

5.2 Estimación de la pérdida de suelo anual en la Cuenca del Perené

El segundo objetivo trazado comprende la estimación de la pérdida potencial de erosión anual de suelos. Según el análisis obtenido para cada año, como se muestra en las siguientes imágenes, extraídas del ArcGIS.

Ilustración 55. Detalle de pérdida de suelo 2014

Fuente: ArcGIS

Ilustración 56. Detalle de pérdida de suelo 2015

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 57. Detalle de pérdida de suelo 2016

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 58. Detalle pérdida de suelo 2017

Fuente: Propia ArcGIS

6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Situación Actual

El año 2017 fue golpeado por un fuerte fenómeno del niño, que azotó a más de 10 regiones del país debido a la gran intensidad y duración de las precipitaciones en muchos departamentos de nuestro país (El Diario de Economía y Negocios de Perú, 2017). Debido a ello varias regiones se vieron afectadas entre ellas el departamento de Junín, en el cual nos encontrábamos realizando el estudio de erosiones.

Es importante destacar, que la zona sierra-selva de nuestro país, es muy propenso a deslizamientos de tierra, esto debido a las precipitaciones que se dan en la zona, sumado a ello que las carreteras y/o caminos se encuentran en un gran porcentaje en laderas, lo que conlleva en su mayoría a los accidentes de bloqueos, huaicos y muertes de personas, que se pueden ver a diario en las noticias.

Ilustración 59. Mapa de las regiones en emergencia por las lluvias

Fuente: <http://rpp.pe/peru/actualidad/zonas-en-estado-de-emergencia-por-lluvias-y-huaicos-noticia-1026875#>

Ilustración 60. Reporte de daños ocurridos en Junín

Fuente: <http://rpp.pe/peru/actualidad/zonas-en-estado-de-emergencia-por-lluvias-y-hualcos-noticia-1026875#>

El Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), realizó un estudio llamado Escenario de Riesgos ante la temporada de lluvias 2015 – 2016. En este se hace un registro de los distintos estudios realizados por organismos del estado como INDECI, INEI, Ministerio de Educación, Ministerio de Salud, SENAMHI, el INFEMMET y la ANA, el cual recopiló distintos mapas de fácil entendimiento acerca de estos eventos de riesgos (Masana García, Málaga Gonzales, López Juárez, Basauri Arámbulu, & Jaimes Espinoza, abril 2015).

Ilustración 61. Mapa de precipitación normal acumulado diciembre-marzo 2000-2014

Fuente: <http://www.cenepred.gob.pe/web/download/dgp/ESCENARIO%20DE%20RIESGO%20TEMPORADA%20DE%20LLUVIAS%202015%20-2016.pdf>

La cuenca del Río Perené involucra a una pequeña parte de la región de Pasco y en su mayoría a la región de Junín. Como se puede observar en la región de Junín existen 4 zonas con precipitaciones normales acumulados entre 200 – 500 mm y una zona con precipitaciones normales acumulados mayores a 1000 mm. Así mismo como se puede apreciar, la información es muy general ya que se realizó para todo el país y se mostró solo los datos más resaltantes del estudio.

En el mapa que se muestra a continuación, se puede evidenciar la ocurrencia de peligros geológicos los cuales en la cuenca del Río Perené van desde Deslizamientos y flujos, erosión fluvial, de laderas, e Inundaciones.

Ilustración 62. Ocurrencia de peligros Geológicos

Fuente: <http://www.cenepred.gob.pe/web/download/dgp/ESCENARIO%20DE%20RIESGO%20TEMPORADA%20DE%20LLUVIAS%202015%20-2016.pdf>

6.2 Validación Cualitativa

Para la validación de los resultados de pérdida anuales de cada año, se estableció desde un principio que se realizarían de manera cualitativa, es decir que se compararía los resultados con evidencias registradas de varias partes de la cuenca. De esta manera, se comprobaría la gran proximidad con la realidad los resultados obtenidos con el método USLE y cada uno de los factores que lo compone.

Tabla 14
Descripción del Huaico ocurrido en Anexo Promisora

AÑO	EVENTO	
	UBICACIÓN	DESCRIPCIÓN
2016	ANEXO PROMISORA- CHANCHAMAYO 11°03'25'' S 75°24'29'' W	El Señor alcalde Hung Won Jung; hizo entrega de un Equipo Electrógeno, Martillo hidráulico, Equipos de seguridad; a la población del Anexo La Promisora para seguir con sus jornadas de faenas en el huaico que les impide su acceso (Municipalidad Provincial de Chanchamayo, 2016)

Ilustración 63. Huaico ocurrido en el anexo Promisora

Fuente: Municipalidad Provincial de Chanchamayo

Ilustración 64. Huaico ocurrido en el anexo Promisora

Fuente: Municipalidad Provincial de Chanchamayo

Ilustración 65. Huaico ocurrido en el anexo Promisora

Fuente: Municipalidad Provincial de Chanchamayo

Ilustración 66. Zona de ocurrencia del huaico según la ubicación

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 67. Zona de ocurrencia del huaico según la ubicación

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 68. Zona de ocurrencia del huaico según la ubicación

Fuente: Propia ArcGIS

Al importar la ubicación de la zona del huaico a nuestro mapa obtenido, se evidencia que este se da cerca de un río, además según la noticia este no se da en una carretera o cercana a ella, si no en un camino de trocha. Por otro lado, el rango de pérdida de suelo obtenido presenta en su mayoría una tendencia entre naranja y rojo, esto indica que para un evento máximo de precipitaciones existiría una pérdida demasiado alta entre 300 a más Tn/Ha/Año.

Tabla 15
Descripción del Huaico ocurrido en San Ramón

AÑO	EVENTO	
	UBICACIÓN	DESCRIPCIÓN
2017	SAN RAMON- SECTOR CHALHUAPUQUIO 11°08'58" S 75°24'26" W	El domingo 23 de abril, aproximadamente 3:30 am, se produjo un huaico en el sector de Chalhupapuquio en Distrito de San Ramón, el hecho ocurrió a la altura del peaje del MTC. Muchos de los vehículos que venían de la capital lima quedaron parados. Algunas viviendas también fueron afectadas por el huaico, así como la caseta de control de peaje. Maquinaria de Provias llegaron al lugar para realizar la limpieza de la vía. (Central, 2017)

Ilustración 69. Huaico ocurrido en San Ramón Sector Chalhupapuquio

Fuente: Noticias Chanchamayo Central

Ilustración 70. Huaico ocurrido en San Ramón Chalhupapuquio

Fuente: Noticias Chanchamayo Central

Ilustración 71. Zona de ocurrencia del huaico según la ubicación

Fuente: Propia ArcGIS

Ilustración 72. Zona de ocurrencia del huaico según la ubicación

Fuente: Propia ArcGIS

Al importar la ubicación de la zona del huaico a nuestro mapa obtenido, se evidencia que ocurre muy cerca de la carretera, además que, según el rango de pérdida de suelo, este presenta en su mayoría una tendencia amarilla y naranja lo cual indica una pérdida de suelo muy alta entre 51-300 Tn/Ha/Año.

7 CONCLUSIONES

1. Se logró determinar cada uno de los factores, a excepción del factor P (debido a la falta de información). Asimismo, tuvimos limitaciones en cuanto a la información que teníamos para cada factor, ya que no todas las metodologías se ajustaban a la información que poseíamos. A fin de cuenta, se encontró las metodologías adecuadas para nuestro procesamiento.

Por otro lado, los mapas de cobertura (C) en simultáneo con el factor de precipitación (R) son de los más determinantes e influyentes, ya que las pérdidas anuales de suelo aumentan con la reducción de la vegetación, de ahí su importancia de conservar y preservar la vegetación en la cuenca, así como de la intensidad y duración de las precipitaciones, las cuales son más preocupantes en los meses de diciembre a marzo.

2. Se elaboró los mapas de erosión producto de los factores para los años 2014, 2015, 2016 y 2017. Se pudo observar que en los años 2014 y 2016 son los que presentan mayor cantidad de pérdida de suelo en comparación a los años de 2015 y 2017 en los cuales los valores son menores. Esto debido en gran medida a la poca cobertura vegetal presente, dieron como resultado mapas de pérdida de suelo mayores en comparación con la pérdida de suelo de los años 2015 y 2017.

Como se aprecia en los mapas, la red de carreteras existente en la cuenca pasa por zonas que se encuentran cerca de los ríos, así como de zonas con alto índice de pérdida de suelo, por ende, se tiene un alto peligro de deslizamiento y/o desprendimiento de rocas que pueden y han sido causantes de la gran cantidad de accidentes en la Región.

3. Según las tablas, cada año como promedio de toda la cuenca la pérdida de suelo es muy alta (entre 100-300 Tn/Ha/Año). Esto indica en líneas generales que existe una gran cantidad de suelo erosionado, esto debido principalmente a la gran intensidad y duración de las precipitaciones en toda la cuenca, sumado a ello la cobertura en la zona, la cual ha presentado variaciones a lo largo de los años.

Ilustración 73. Comparación de pérdida de suelo máximas entre años 2014-2017

Fuente: Propia

Ilustración 74. Comparación de pérdida de suelo promedio entre años 2014-2017

Fuente: Propia

Como se mencionó antes, estos valores de pérdida de suelo están dados en las condiciones máximas del Factor R (precipitación) para colocarlo en un evento máximo y más conservador. Así mismo se debe recalcar que se obtuvo como valores máximos de Pérdida de Suelo, números muy por encima de la escala que se conoce (pérdidas de suelo superiores a 300 llegando a 5000 Tn/Ha/Año). Esto se debe a que

se consideró eventos en condiciones extremas, como ya se mencionó. Esto conlleva a que las zonas que presenten estos puntos extremos son los que requieren mayor urgencia en cuanto a prevención, ya que en algunas zonas pasan caminos y carreteras, y esto supone un peligro latente para las personas.

4. Para la validación de nuestro estudio, se realizó de manera cualitativa, es decir comparando nuestros resultados con eventos que hayan ocurrido dentro de la cuenca y que estos coincidan. De esta manera quedó demostrado que la metodología USLE realmente se aproxima a la realidad, ya que las zonas que registramos con deslizamientos y huaicos, coincidían con la ubicación en nuestro mapa que eran zonas de alta incidencia de pérdida de suelo.

8 RECOMENDACIONES

- Para la realización del factor R (precipitación) se debe tener una base de datos de precipitaciones, es decir registros pluviométricos con más de 20 años de data.
- Los mapas de los factores del USLE deben encontrarse en el mismo formato, es decir, formato tipo RASTER, ya que de lo contrario existirá incompatibilidad.
- Para la ejecución de la multiplicación de factores en el programa ARC GIS se debe preservar el tamaño de celda de las mismas dimensiones, ya que si no el programa obvia esos valores y los resultados no serán los reales.
- Para la elaboración del factor C (cobertura) se deben utilizar las imágenes LANDSAT que presenten menor cantidad de nubosidades ya que esto puede interferir con la precisión del método y/o darnos mapas de cobertura que aparentemente no cuentan con vegetación, pero en la realidad es todo lo contrario.
- El factor P de conservación del suelo es una información, acerca de las medidas que toman las autoridades para conservar el suelo, así como llevar registro de las modificaciones que se hacen a esta debido al crecimiento poblacional, demanda

agrícola, uso, entre otras. La cual es inexistente en la zona de la Cuenca del Río Perené. Es por ello que al final se tuvo que asumir un valor conservador de 1 para de esta forma no alterar el método.

9 REFERENCIAS

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (s.f.). *Imágenes de satélite LANDSAT*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/landsat.aspx>
- Agua, A. N. (2016). *PRIORIZACION DE CUENCAS PARA LA GESTION DE LOS RECURSOS HIDRICOS*. Lima, Perú: ANA.
- Andina - Agencia Peruana de Noticias . (4 de abril de 2015). Obtenido de Deslizamientos bloquearon tramo de la Carretera Central en Junín: <http://www.andina.com.pe/agencia/noticia-deslizamientos-bloquearon-tramo-de-carretera-central-junin-550389.aspx>
- Angulo, M. D. (2010). *Aplicación del modelo USLE para estimar la pérdida de suelos por Erosión Hídrica en la Microcuenca Puente Perez - Tingo María*. Tingo María - Perú.
- ArcGIS. (s.f.). *¿Qué son los datos ráster?* Obtenido de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- Autoridad Nacional Del Agua. (2016). *EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS DE DOCE CUENCAS HIDROGRAFICAS DEL PERÚ*. Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua.
- CARDENAS ESTEBAN, M. G. (2013, Junio 14). *Revision de la restauracion hidrológico-forestal del torrente Enseu, en el término municipal de Baix Pallars(Lerida)*. Lerida: .
- COMISION TECNICA REGIONAL DE JUNIN. (s.f.). *MEMORIA DESCRIPTIVA DEL ESTUDIO HIDROLÒGICO Y DE CUENCAS DEL DEPARTAMENTO DE JUNÌN*. Obtenido de http://siar.regionjunin.gob.pe/sites/default/files/archivos/public/docs/medio_fisico_-_memoria_descriptiva_hidrologia.pdf
- Estadísticas, I. N. (2014). *Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2014*. Lima, Perú: INEI.

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s.f.). *FAO*. Obtenido de FAO:
<http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>
- Ibañez Asencio, S., Moreno Román , H., & Gisbert Blanquer, J. (2012). *Repositorio Institucional de la Universitat Politècnica de València*. Obtenido de
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16849/AD%20USLE.pdf?sequence=1>
- Nations Food and Agriculture Organization of the United. (s.f.). *FAO*. Obtenido de FAO:
<http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>
- PERU, B. C. (s.f.). *Caracterización del Departamento de Junín*. Obtenido de
<http://www.bcrp.gob.pe/docs/Sucursales/Huancayo/Junin-Characterizacion.pdf>
- R, H., L, B., I, P., & F, B. (2001). EVALUACIÓN DEL MODELO USLE EN LA ESTIMACION DE LA EROSION EN SEIS LOCALIDADES ENTRE LA IV Y IX REGION DE CHILE. *Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales* .
- R.Wawer, E. B. (2005). *Departament of Soil Science Erosion Control and Land Conservation*. Obtenido de www.pjoes.com/pdf14.5/655-658.pdf
- RAE, R. A. (2016). Obtenido de <http://dle.rae.es/?id=G37i3AA>
- RPP Noticias. (29 de diciembre de 2015). *RPP Noticias*. Obtenido de
<http://rpp.pe/peru/junin/region-registro-130-desastres-naturales-en-el-2015-noticia-925713>
- Sarría, F. A. (s.f.). *Sistema de Información Geográfica*. Obtenido de
<http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>
- SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA. (2007). *MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA DE LOS RIOS SAN JUAN, PISCO, ICA, MANTARO Y PERENE*. Junín, Cerro de Pasco e Ica.
- Suarez, J. (1998). *Mecanismos de Falla*. Colombia.
- TÁNAGO, M. G. (1991). *LA ECUACION UNIVERSAL DE PERDIDAS DE SUELO. PASADA, PRESENTE Y FUTURO*. Madrid.

Thalia, V. (27 de Marzo de 2017). *CORREO*. Obtenido de <https://diariocorreio.pe/edicion/huancayo/junin-la-vulnerabilidad-de-la-region-se-halla-en-los-huaicos-e-inundaciones-739675/>

TOLIMA, C. A. (2007). En plan de ordenacion y manejo de cuencas hidrográficas cuenca mayor del rio Totare. Tolima.

Universidad de Murcia. (s.f.). *Capítulo 8, El Formato Vectorial. Análisis espacial*. Obtenido de http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_8.pdf

wiki spaces. (s.f.). Obtenido de El Índice NDVI : <http://aulasat.wikispaces.com/nvdi>