

## Estimación de la retención de sedimentos con el modelo INVEST (SDR), en la cuenca Huancané

**Dany Gutierrez Pacco<sup>1</sup>**

[dany.gutierrez@upeu.edu.pe](mailto:dany.gutierrez@upeu.edu.pe)

<https://orcid.org/0009-0007-3097-9108>

Universidad Peruana Unión  
Perú

**Jhoangel Supo Espinoza**

[jhoangel.supo@upeu.edu.pe](mailto:jhoangel.supo@upeu.edu.pe)

<https://orcid.org/0000-0001-8185-9404>

Universidad Peruana Unión  
Perú

**Mary Alvarez Tapara**

[mary.alvarez@upeu.edu.pe](mailto:mary.alvarez@upeu.edu.pe)

<https://orcid.org/0009-0001-8889-5018>

Universidad Peruana Unión  
Perú

### RESUMEN

La cuenca de Huancané está ubicada en Puno-Perú, la superficie total de la cuenca 3,631.18 km<sup>2</sup>, los ecosistemas pueden brindar servicios que benefician, muchos de estos servicios ecosistémicos no son valorados, por este motivo se tiene como objetivo de estimar la retención de sedimentos usando el modelo INVEST (SDR) en la cuenca Huancané. El método que se desarrolló fue la aplicación del software InVEST (Valoración integrada de servicios ambientales y compensación), para correr el modelo se tuvo que procesar variables que requiere el modelo INVEST (SDR) como: Modelo de elevación digital (DEM), erosividad lluvia (Factor R), Erodabilidad del suelo (Factor K), Uso de suelo (Factor C) y Prácticas de apoyo (Factor P). Se obtuvo en una escala de rojo a verde donde el valor más alto de retención de fue 5738.44 tn/año, el factor que desplaza el sedimento es la pendiente, pero en pendientes < al 5%, es donde hay mayor retención de sedimentos (áreas con predominancia de actividad agrícola). En conclusión, se realizó satisfactoriamente el modelamiento de retención de sedimentos en la cuenca Huancané sumando conocimientos ecosistémicos.

**Palabras clave:** *INVEST; retención de sedimentos; servicios ecosistémicos; suelo.*

---

<sup>1</sup> Autor principal.

Correspondencia: [dany.gutierrez@upeu.edu.pe](mailto:dany.gutierrez@upeu.edu.pe)

## **Estimation of sediment retention with the INVEST (SDR) model, in the Huancané basin**

### **ABSTRACT**

The Huancané watershed is located in Puno-Peru, the total area of the basin 3,631.18 km<sup>2</sup>, ecosystems can provide services that benefit, many of these ecosystem services are not valued, for this reason it aims to estimate sediment retention using the INVEST model (SDR) in the Huancané watershed. The method developed was the application of the InVEST (Integrated Valuation of Environmental Services and Compensation) software. To run the model, variables required by the INVEST (SDR) model had to be processed, such as: Digital Elevation Model (DEM), rain erosivity (R Factor), soil erodibility (K Factor), land use (C Factor) and support practices (P Factor). It was obtained on a scale from red to green where the highest retention value was 5738.44 tn/year, the factor that displaces the sediment is the slope, but in slopes < 5%, is where there is greater sediment retention (areas with predominantly agricultural activity). In conclusion, the modeling of sediment retention in the Huancané watershed was satisfactorily carried out, adding ecosystemic knowledge.

**Keywords:** *:INVEST; sediment retention; ecosystem services; soil.*

*Artículo recibido 14 junio 2023*

*Aceptado para publicación: 14 julio 2023*

## INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo y la sedimentación continúan siendo una de las principales amenazas a nivel mundial para la sostenibilidad de la producción de alimentos (Nyssen et al., 2009), además de verse como una crisis ambiental, por el contexto de alimentación debido a una población en constante expansión (Pimentel, 2006); (Powlson et al., 2011) Se produce un perjuicio cuando las tasas de erosión (pérdida) del suelo superan las tasas de C(formación del suelo) (Montgomery, 2007) amenazando el suministro de estos servicios y degradando la calidad del agua (Woznicki et al., 2020), la acumulación de grandes volúmenes de los sedimentos en los cuerpos de agua ocasiona severos problemas en las funciones de los proyectos hidráulicos (Gashaw et al., 2021).

Una de las primeras menciones de la retención de sedimentos como parte de un servicio ecosistémico fue realizado por Constanza en el cual se menciona que es la función de retener el suelo, que da un enfoque interdisciplinario para el estudio integrador de los sistemas socio-económicos y ecológicos (Bogdan et al., 2016). El cambio de uso de suelos y como la cobertura puede afectar drásticamente la gran cantidad de flujo de sedimentos en las cuencas, pero la presencia de vegetación puede retener sedimentos (Díaz & Fernanda, 2020).

Además de la capacidad de regular la cantidad de sedimentos erosionados que llegan a red fluvial, brindando beneficios como el mantenimiento de la calidad del suelo, el agua y las funciones de los embalses (Bogdan et al., 2016), entre otros servicios que pueden proporcionar un ecosistema dentro de sus funciones ecológicas teniendo la capacidad de brindar elementos como aire, animales, agua limpia, suelo y entre otros que es importante que valoremos (Bedoya, 2017).

La pérdida de sedimentos y los factores que influyen en el proceso de entrega de sedimentos, como el desprendimiento de sedimentos, la capacidad de transporte y la topografía, enfatizan la necesidad de utilizar modelos espaciales distribuidos (Gashaw et al., 2021). En este caso el modelo INVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) es uno de ellos (Mena, 2019) para poder simular la pérdida de suelo y la producción de sedimentos desde su desarrollo (Hamel et al., 2015), además de cuantificar y mapear los servicios ecosistémicos (Mena, 2019), para el modelo de retención de sedimentos SDR, en cada pixel, el algoritmo primero calcula la cantidad anual promedio de sedimentos erosionados, y luego la tasa de entrega de sedimentos (SDR) que corresponde a la proporción

de pérdida de suelo que realmente llega a la corriente (Hamel et al., 2015).

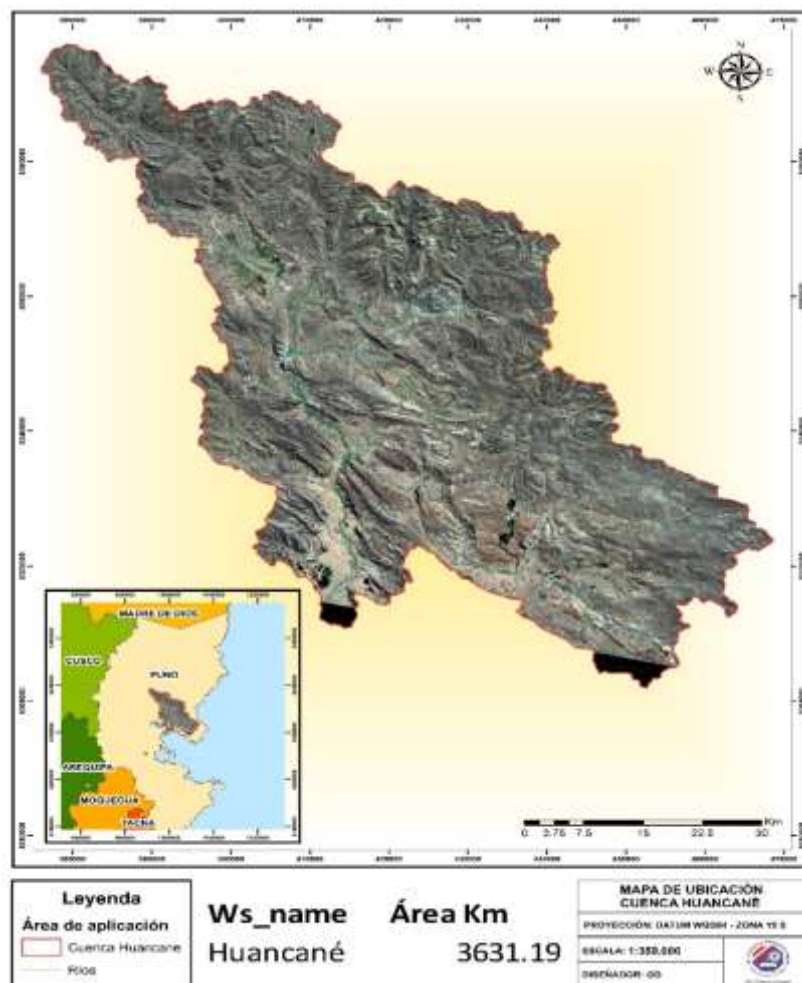
El presente artículo tiene como objetivo estimar la retención de sedimentos usando el modelo INVEST (SDR) en la cuenca Huancané.

## METODOLOGÍA

### 1.1. Área de aplicación

La cuenca Huancané políticamente se ubica en el departamento de Puno, ocupa las superficies de las provincias de Huancané, Moho, San Antonio de Putina y Azángaro. La superficie total de la cuenca es de 3,631.18 km<sup>2</sup>, presenta pendientes que varía en un rango <5% hasta >124%, con una cobertura predominante de pajonal andino, seguido de la agricultura andina y costera, además de una precipitación anual que varía de 658 mm hasta los 714 mm.

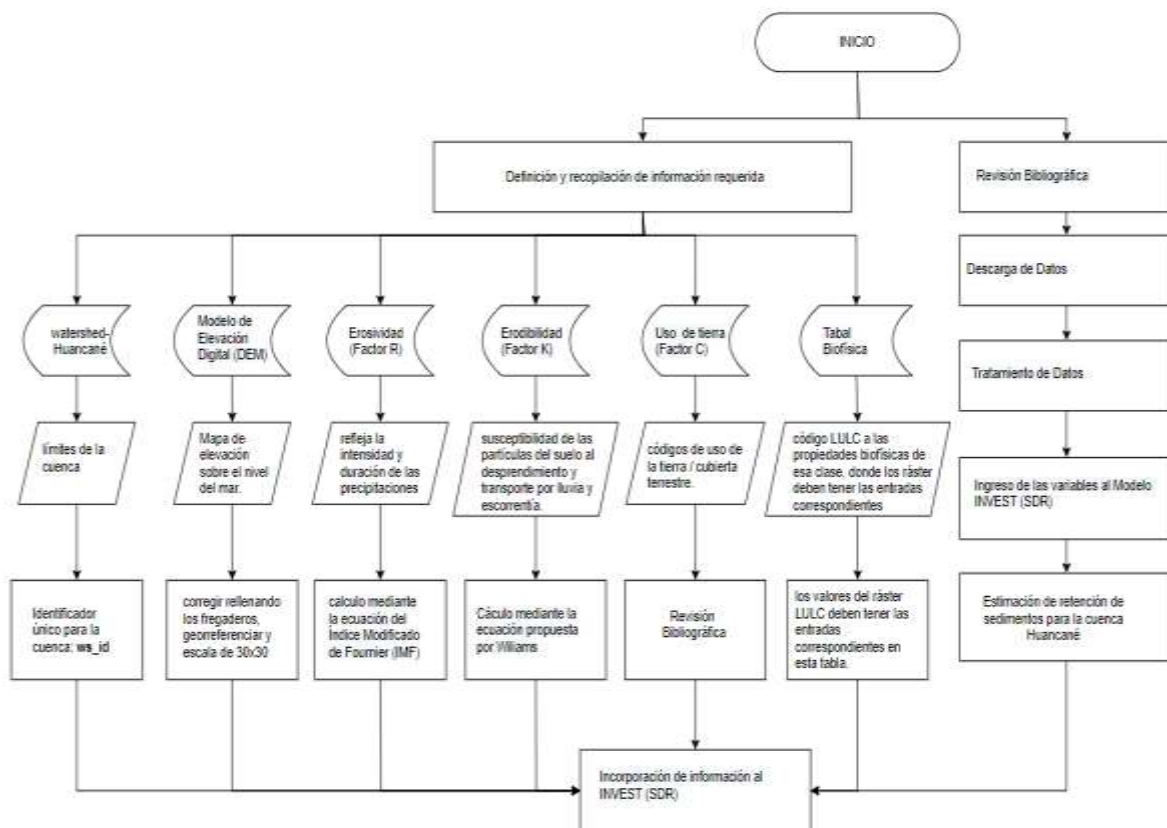
**Imagen 1:** *Mapa de Ubicación*



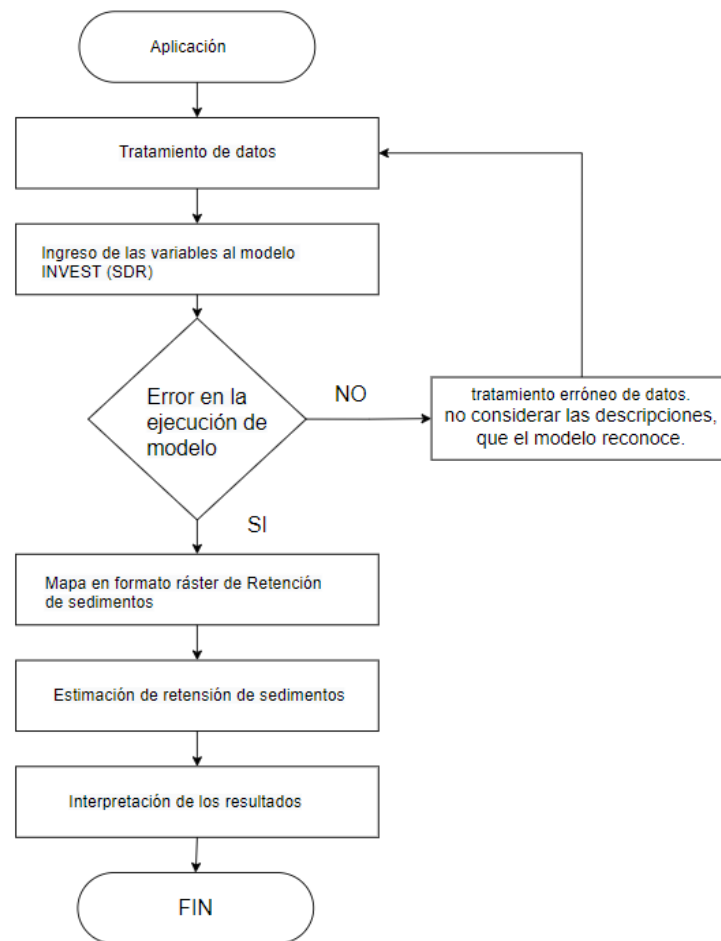
El método La estimación a realizarse de retención del suelo anual promedio a un largo plazo se centra en RUSLE y están vinculadas con el modelo de retención de sedimentos (SDR) basado en el paisaje que tiene en cuenta la conectividad hidrológica (Borselli et al., 2008).

Estos métodos se derivan de los utilizados en el modelo de retención de sedimentos InVEST (Valoración integrada de servicios ambientales y compensación) (Hamel et al., 2015), con una amplia aplicación en los Estados Unidos. Las siguientes series describen la derivación de cada factor del SDR para el cálculo del rendimiento de sedimentos y la tabla 1 contiene las fuentes de datos utilizadas para derivar cada factor.

**Figura 1:** Diagrama de la metodología para correr el modelo InVEST en la cuenca Huancané.



**Figura 2:** *Flujograma de proceso en el modelo InVEST en la cuenca Huancané.*



## 1.2. Modelo de elevación digital

El modelo de elevación digital (DEM) por sus siglas en inglés, corresponde a una capa espacializada en formatos ráster, cuyas celdas contienen valores de altura el cual fue obtenida a través del visor de datos de imágenes geospaciales (Google Earth Engine) con una resolución de 30 m.

Finalmente, a la capa en formato ráster se hicieron las correcciones pertinentes, con el apoyo del sistema de información geográfica.

## 1.3. Factor R de erosividad lluvia – escorrentía

Representa el efecto del impacto de las gotas de lluvia, la cantidad y la tasa de escorrentía, (Renard et al., 1997) reflejándose como se combina la energía y la intensidad de una tormenta y define los efectos conjuntos del impacto de las gotas de lluvia y la turbulencia de la escorrentía en el transporte de las partículas de suelo provenientes de un área (Pérez & Mesa, 2002).

este factor es uno de los insumos de la ecuación de la pérdida universal de pérdida de suelo, se expresa de la siguiente forma (MJ \* mm \* ha-1). Para el cálculo de la erosividad de la lluvia, se basó en la ecuación propuesta por Arnoldus, (1978), en relación al índice modificado de Fournier (IMF), donde no solo se considera la precipitación mensual del mes más húmedo, sino también la de los restos de los meses, este IMF caracteriza la agresividad de la precipitación y se calcula de la siguiente forma:

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P_t} \quad (1)$$

Donde, IMF: índice modificado de Fournier, Pi: precipitación de cada mes [mm], Pt: es la precipitación media anual [mm].

Para la estimación se partió con los datos de precipitaciones medias mensuales en un Excel para seis estaciones, recogiendo los códigos y las precipitaciones desde enero hasta diciembre en un rango de 30 años, desde 1980 a 2009, para correlacionar R con el IMF, se aplican métodos distintos en función a la región, uno de ellos es el realizado por Arnoldus (1977), que estableció un mapa de índices de erosividad R para Marruecos empleando el IMF en la forma siguiente:

$$R = 0,264 * IMF^{1.065} \quad (2)$$

Finalmente, propuestas ya las ecuaciones, se obtiene el factor R para la cuenca y se espacializa a partir de una interpolación para el área de estudio, a través del método del Kriging que pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones.

#### 1.4. Factor K Erodibilidad del suelo

El factor de erosionabilidad del suelo (K) representa la susceptibilidad a la erosión por escorrentía y el impacto de las gotas de lluvia (Woznicki et al., 2020).

Para el cálculo de este factor, se basó en la fórmula propuesta por Williams

$$K = 0.1317 f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand} \quad (3)$$

Donde 0.1317 es un factor de conversión de unidades, multiplicado por cuatro factores separados fcsand: contenido de arena; fel-si: contenido de limo- arcilla; forgc: contenido del carbono orgánico; fhisand: contenido en relación con la arena.

$$f_{csand} = (0.2 + 0.3 \exp \exp [-0.0256 m_s (1 - \frac{m_{silt}}{100})]) \quad (4)$$

Para estimar el parámetro de contenido de arena, la fórmula a continuación.

$$f_{cl-si} = \left( \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \quad (5)$$

Para calcular el parámetro de contenido de limo – arcilla.

$$f_{orgc} = \left[ 1 - \frac{0.25 \text{ orgC}}{\text{orgC} + \exp \left[ 3.72 - 2.95 \text{ orgC} \right]} \right] \quad (6)$$

Para el cálculo del parámetro en relación al contenido de arena

$$f_{hisand} = \left[ 1 - \frac{0.70 \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[ -5.51 + 22.9 \left( 1 + \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right] \quad (7)$$

Entonces, se procede a descargar un mapa digital de los suelos del mundo, obtenido del geo servidor de la FAO, el cual provee archivos en formato shape, con apoyo del GIS se hace un recorte para la zona de estudio, seguido se identifica todos los tipos de suelos que se tiene para el área de interés, por consiguiente, se aplica las fórmulas presentadas anteriormente, para obtener el factor K.

Finalmente se crea un nuevo campo en la tabla de atributos del shape de la capa de suelos, para luego convertirlo en un ráster.

### 1.5. Factor C Uso de suelo

El factor de uso de suelo típicamente representa efectos de las prácticas agrícolas de cultivo y manejo sobre las tasas de erosión (Renard, KG et al., 1997).

Valores de C universalmente no válidos no existen (Tapia & Gómez, 2018). Por la gran variedad de cultivos, secuencias y rotaciones de cultivos y manejos se hace necesaria la evaluación de valores de C experimentales en condiciones locales (CENEPRED, 2019).

Un componente clave, es un ráster espacialmente continuo de uso de suelo/cobertura vegetal del suelo (LULC por sus siglas en inglés), una clasificación LULC ligeramente más sofisticada consta en dividir los tipos de LULC relevantes en tipos más significativos, se procede a descargar en formato shapefile la capa de vegetación natural de todo el Perú, el cual elaborado por el MINAM a una escala de 1/100000), descargable en: <http://geoservidor.minam.gob.pe/intro/geoservicios/intercambio-de-base->



de-datos-12.html

Por consiguiente, se hace un corte para el área de interés, para luego hacer una clasificación de la información espacial, para la asignación de valores del Factor C, se toma como referencia a los investigadores Wischmeier & Smith, (1978), que realizaron un cuadro con valores del factor C.

Finalmente, se le convierte en un formato ráster contenido con las propiedades biofísicas de uso de suelos, para ser ingresado al modelo INVEST (SDR).

#### **1.6. Factor P prácticas de apoyo**

El factor de prácticas de apoyo (P) refleja las prácticas de manejo agrícola que reduce la erosión del suelo, no se han detectado prácticas de manejo en la región por lo que asumimos que el factor P es 1 (uno) para todo el ámbito, pero sí, el valor de uno se ingresa a la tabla biofísica.

#### **1.7. Corrido del modelo**

El interfaz del modelo INVEST (SDR) es amigable y no requiere un escritorio GIS, aunque los resultados son exportados con cualquier herramienta GIS, en este caso el ArcGIS.

Todas las entradas espaciales deben tener exactamente el mismo sistema de coordenadas proyectado, las entradas de ráster deben tener el mismo tamaño de celda. En el requerimiento de la tabla Biofísica, se le debe de asignar cada código LUCL a las propiedades biofísicas, todos los valores del ráster deben tener las entradas correspondientes en esa tabla, teniendo en consideración la descripción en la tabla lo siguiente:

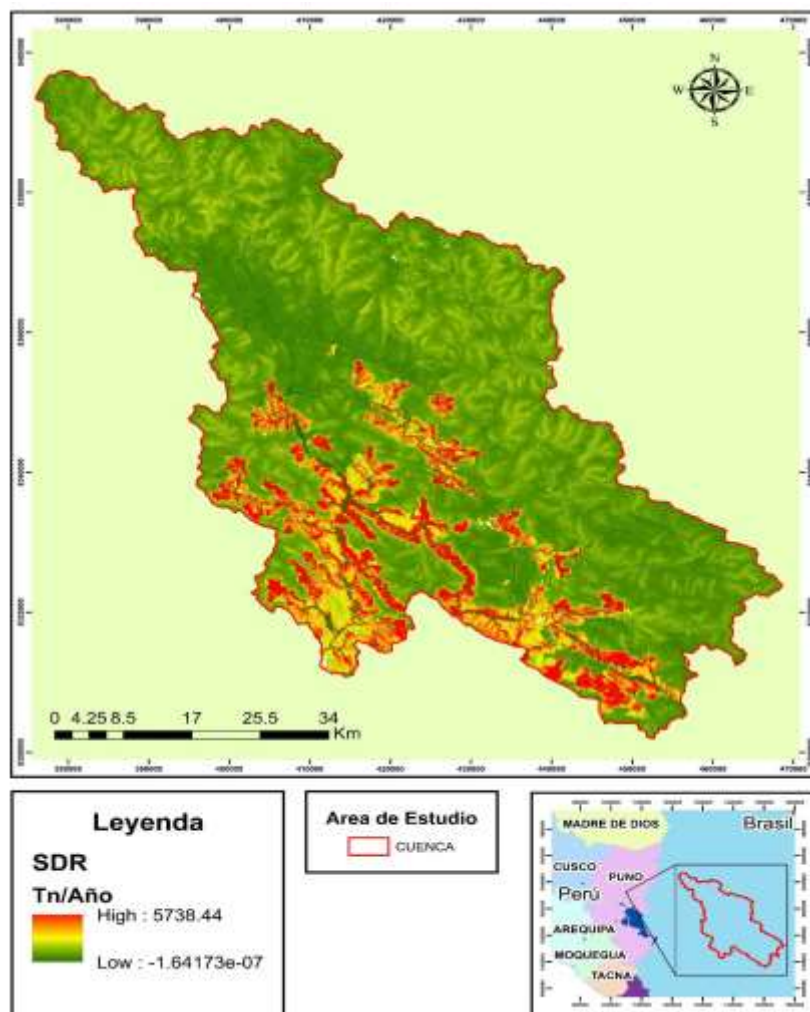
Lucode (es el código LUCL del ráster LULC); Usle\_ C (factor de uso de suelo para la usle, los datos varían de 0 (cero) a 1 (uno)); Usle\_ P (factor requerido de prácticas de apoyo para el usle, en este caso se está considerando “1” (uno)).

**Tabla 1:***Insumos requeridos por el modelo Invest (SDR)*

ITEM	Formato	Fuente	Descripción
Cuenca	SHP	GeoGPSPerú	Área de estudio, para aplicar los demás factores
Modelo de Elevación Digital (DEM)	Ráster	Google Earth Engine	Capa uniforme con información de altitud del terreno. Se corrigió del Dem con algebra de mapas de Arcgis.
Factor R (Erosibilidad del suelo)	Ráster	Cálculo en base a la ecuación de Índice Modificado de Fournier.	Considera la capacidad de la lluvia para erosionar el suelo, es uno de los factores que entra en la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE)
Factor K (Erodabilidad del suelo)	Ráster	Geoservidor de la Fao, cálculo de en base a la ecuación de Wiliams con una clasificación de clase textural del factor K.	Mide el grado por el cual un suelo es susceptible a erosionarse. Es uno de las variables de entrada de la RUSLE.
Factor C (uso de suelo)	Ráster	Portal del MINAM – cobertura vegetal. Revisión bibliográfica. (Tapia & Gómez, 2018)	Mide la influencia de diferentes tipos de cultivo para erosionar el suelo.
Factor P	Dato incluido en la tabla biofísica	Para el presente trabajo no se consideran prácticas de manejo en la cuenca, por lo tanto, se toma el valor de 1.	Este valor cambia de acuerdo con la aplicación de diferentes prácticas de manejo en los cultivos.
Tabla Biofísica	Csv (delimitado por comas)	factor C	Contiene información del modelo correspondiente a cada una de las clases de uso de suelo y las prácticas de uso de suelos correspondiente en esta tabla.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Imagen 2:** Cantidad de sedimentos Retenidos por la Cuenca Huancané



En la imagen 2 se reflejan, que aquellas distribuciones de color rojo - naranja, son áreas donde se dan un mayor retención de sedimentos alcanzando hasta los 5738.44 tn/año, corroborando el motivo de este resultado, se debe a que estas áreas son de cobertura de agricultura costera y andina, con pendientes < 5%, según Monge, (2020) por la acción de la precipitación, las partículas de sedimentos (arena, limo o arcilla) son transportados por las pendiente de las laderas y el tipo de cobertura vegetal, haciendo la aparición de pequeños arroyos, que al unirse forman ríos, transportando grandes cantidades de sedimentos, Bogdan et al., (2016) expresa que el servicio de retención de sedimentos se desarrollan en zonas con bajos niveles de pendientes, con la capacidad de regular la cantidad de sedimentos erosionados que llegan a la red fluvial, brindando el beneficio de mantener la calidad del suelo, agua y las funciones de los embalses

Así mismo los resultados muestran que, aunque tengan diferente uso de suelos la tierra puede cambiar notablemente, estudios realizados en Yan'an, China se llegó a la conclusión de que las áreas también pueden mejorar gradualmente (Hou et al., 2015). Por otra parte los sitios más vulnerables con altos niveles de aportes de sedimentos son los arroyos con una pendiente pronunciada, bosques estrechos y el uso intensivo de tierras (Cordeiro et al., 2020). Contrastando el autor Rodrigues et al., (2004) menciona que la orilla con densidad alta de juncos tiene una alta concentración de sedimentos.

Modelamientos realizados en Cuenca del Río Meléndez Parque Nacional Natural Farallones de Cali se observa que las áreas con mayor exportación de sedimentos son donde no hay cobertura vegetal esto se debe a que las raíces de los árboles ayudan a que estos no se desplacen por factores climáticos (Bedoya, 2017).

## **CONCLUSIONES**

Se realizó satisfactoriamente el modelamiento de retención de sedimentos de la cuenca Huancané de la región de Puno-Perú, mediante el modelo INVEST (SDR), donde se puede observar las partes de mayor retención de sedimentos con valores alcanzando hasta los 5738.44 tn/año.

El uso de suelo que sobreabunda es el pajonal andino, seguido de la agricultura costera y andina, presente en pendientes < al 5%, es por ello que en esa zona hay mayor retención de sedimentos, evitando así que lleguen a las fuentes de agua, que ocasionan alta turbiedad, desbordes, limitan la luz para el desarrollo del ecosistema acuático, así como también trunca proyectos hidráulicos.

Finalmente debido al realizar una amplia aplicación del modelo INVEST (SDR) en los Estados Unidos y una escasez de información sobre el muestreo de sedimentos se ve un interés en poder aplicar el modelo en una cuenca regional, porque el modelo SDR captura con alta presión la combinación espacial del flujo de sedimentos, sumando conocimiento del servicio ecosistémico de retención en la cuenca.

## **LISTA DE REFERENCIAS**

- Bedoya, M. (2017). *Valoración del servicio ecosistémicos de retención de sedimentos cuenca del Río Meléndez parque nacional natural Farallones de Cali*. 1–40.
- Bogdan, S., Pătru, I., & Zaharia, L. (2016). The Assessment of Regulatory Ecosystem Services: The Case of the Sediment Retention Service in a Mountain Landscape in the Southern Romanian Carpathians. *Procedia Environmental Sciences*, 32, 1–16.

<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.008>

Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. (2008). *Catena Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment*. 75, 268–277.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>

CENEPRED. (2019). Manual para la Evaluación del riesgo originador por Fenómenos Naturales. *Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción Del Riesgo de Desastres*, 3, 1–117.

[https://cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia\\_Manuales/Borrador](https://cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Borrador) EVAR  
V3/MANUAL\_EVArv3-PRE.pdf

Cordeiro, G., Vasconcelos, V., Salemi, L. F., & Nardoto, G. (2020). Factors affecting the effectiveness of riparian buffers in retaining sediment: an isotopic approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(11). <https://doi.org/10.1007/S10661-020-08705-4>

Díaz, R., & Fernanda, G. (2020). *Valoración del Servicio Ecosistémico de Retención de Sedimentos con Invest (SDR), en una Cuenca Transformada. Caso del Río Sauce Chico, Buenos Aires, Argentina. November*.

Gashaw, T., Bantider, A., Zeleke, G., Alamirew, T., Jemberu, W., Worqlul, A. W., Dile, Y. T., Bewket, W., Meshesha, D. T., Adem, A. A., & Addisu, S. (2021). Evaluating InVEST model for estimating soil loss and sediment export in data scarce regions of the Abbay (Upper Blue Nile) Basin: Implications for land managers. *Environmental Challenges*, 5(November), 100381. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100381>

Hamel, P., Chaplin-Kramer, R., Sim, S., & Mueller, C. (2015). A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA. *Science of the Total Environment*, 524–525, 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.027>

Hou, K., Li, X., Wang, J. jing, & Zhang, J. (2015). An analysis of the impact on land use and ecological vulnerability of the policy of returning farmland to forest in Yan'an, China. *Environmental Science and Pollution Research* 23:5, 23(5), 4670–4680. <https://doi.org/10.1007/S11356-015-5679-9>

9

Mena, P. (2019). *Tasa de Entrega de Sedimentos (Sediment Delivery Ratio) InVEST ver. 3.7.0 español*.

1–19.

- Monge, A. (2020, February 26). *Retención y exportación de sedimentos y nutrientes*.  
<https://acto.go.cr/retencion-y-exportacion-de-sedimentos-y-nutrientes/>
- Montgomery, D. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(33), 13268–13272.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>
- Nyssen, J., Haile, M., Naudts, J., Munro, N., Poesen, J., Moeyersons, J., Frankl, A., Deckers, J., & Pankhurst, R. (2009). after 140 years. *Science of the Total Environment*, The.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.016>
- Pérez, J., & Mesa, O. (2002). *Estimación del factor de erosividad d ela lluvia en Colombia*.
- Pimentel, D. (2006). *SOIL EROSION: A FOOD AND ENVIRONMENTAL THREAT*. 119–137.  
<https://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8>
- Powlson, D. S., Gregory, P. J., Whalley, W. R., Quinton, J. N., Hopkins, D. W., Whitmore, A. P., Hirsch, P. R., & Goulding, K. W. T. (2011). Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services q. *Food Policy*, 36, S72–S87. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.025>
- Renard, KG, Foster, GR, Weesies, G., McCool, D., & Yoder, D. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservaion planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*.
- Rodrigues, alberto, Ocon, C., & Tangorra, M. (2004). Una visión bentónica de arroyos y ríos pampeanos. *Biología Acuática*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/32478>
- Tapia, J., & Gómez, C. (2018). *Estimación de la erosión hídrica mediante la aplicación de la metodología RUSLE en la cuenca del río Piura*.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *PREDICTING RAINFALL EROSION LOSSES*. 537.
- Woznicki, S. A., Cada, P., Wickham, J., Schmidt, M., Baynes, J., Mehaffey, M., & Neale, A. (2020). Sediment retention by natural landscapes in the conterminous United States. *Science of the Total Environment*, 745, 140972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140972>