UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLÍVAR
SEDE CENTRAL
Sucre – Bolivia

MAESTRÍA EN SISTEMAS DE RIEGO Y MANEJO INTEGRADO DE CUENCAS

LA HIDROGEOMORFOLOGÍA CON FINES DE RIEGO:
ESTUDIO EN CUENCA DEL RÍO VINCES ECUADOR

Tesis presentada para optar al Grado Académico de Magíster en Sistemas de Riego y Manejo Integrado de Cuencas

MAESTRANTE: CARLOS ALBERTO NIETO CAÑARTE

Sucre – Bolivia

2024

UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLÍVAR
SEDE CENTRAL
Sucre – Bolivia

MAESTRÍA EN SISTEMAS DE RIEGO Y MANEJO INTEGRADO DE CUENCAS

LA HIDROGEOMORFOLOGÍA CON FINES DE RIEGO:
ESTUDIO EN CUENCA DEL RÍO VINCES ECUADOR

Tesis presentada para optar al Grado Académico de Magíster en Sistemas de Riego y Manejo Integrado de Cuencas

MAESTRANTE: CARLOS ALBERTO NIETO CAÑARTE

TUTOR: MARCO VINICIO VEINTIMILLA CALVA

Sucre – Bolivia

2024

DEDICATORIA

Agradezco a mi creador por brindarme sabiduría, inteligencia y buena salud, lo cual me ha permitido alcanzar mis metas. También quiero reconocer y agradecer a mis maravillosos padres, José Nieto León y Lourdes Cañarte Segovia, así como a mi extraordinaria esposa, Luz Jomahira Araujo González, quienes siempre han brindado su apoyo incondicional, optimismo y sabios consejos, alimentando así mis sueños y fortaleciéndome.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi creador por brindarme la fuerza y confianza suficiente para conquistar mis miedos. Asimismo, reconozco la comprensión y paciencia de mis padres, también a mis maestros quienes me han facilitado conocimiento. No puedo dejar de mencionar a Susana Rengel, quien me ha guiado en todo el proceso, y especialmente a Marco Veintimilla, quien me ha brindado ayuda incondicional como tutor dogmático.

RESUMEN

El agua dulce es un recurso indispensable, porque existe una fuerte correlación entre el acceso al agua y el nivel de desarrollo. Por lo tanto, es necesario conservar, preservar y restaurar la funcionalidad de los sistemas fluviales. De ahí que se destaque la importancia de la Gestión Integral de los Recursos Hídricos, siendo las cuencas hidrográficas su unidad administrativa porque captan y acumulan agua. Por lo tanto, es fundamental asegurar un caudal ecológico para la permanencia de los hábitats. La biodiversidad de los ecosistemas que presenta el Ecuador se ha convertido en una de las principales preocupaciones para la gestión del agua, cuya recomendación es realizar estudios individualizados por cuenca hidrográfica.

La caracterización hidrogeomorfológica de la cuenca del río Vinces permite mejorar la gestión del agua, cuya superficie aproximada es de 462.000 hectáreas, con influencia directa en tres provincias del Ecuador (Cotopaxi, Los Ríos y Guayas). Con la ayuda de herramientas de ofimática y geomática se diagnosticó la geomorfología con IDRISI, se analizó la hidroclimatología con HYDROGNOMON, se identificaron las zonas en riesgo de erosión con QGIS y se estimó el balance hídrico con INNERSOFT, lo que permitió caracterizar los Vinces. cuenca fluvial para comprender la hidrodinámica fluvial con fines de riego. Los resultados indican que no ha sufrido perturbaciones irreparables; también se estableció la Curva IDF para diferentes periodos máximos de retorno; Asimismo, se identificaron áreas con potencial riesgo de erosión; y se conoció que el sistema fluvial recibe un buen aporte de las lluvias, aunque su uso consuntivo es alto debido a la actividad antrópica.

El principal aporte del estudio es el análisis hidrogeomorfológico de la cuenca del río Vinces, desarrollado con programas de ofimática y geomática. Además, los datos obtenidos forman parte de una base de información para la propuesta de un plan de gestión integral y sostenible de los recursos hídricos.

Palabras clave: Geomática, Hidrología, Cuenca, Río.

ABSTRACT

Fresh water is an indispensable resource, because there is a strong correlation between access to water and the level of development. Therefore, it is necessary to conserve, preserve and restore the functionality of river systems. Hence, the importance of the Integral Management of Water Resources stands out, with watersheds being their administrative unit because they collect and accumulate water. Therefore, it is essential to ensure an ecological flow for the permanence of habitats. The biodiversity of the ecosystems that Ecuador presents has become one of the main concerns for water management, whose recommendation is to carry out individualized studies by hydrographic watershed.

The hydrogeomorphological characterization of the Vinces River watershed allows improving water management, whose approximate area is 462,000 hectares, directly influencing three provinces of Ecuador (Cotopaxi, Los Ríos and Guayas). With the help of office automation and geomatics tools, the geomorphology was diagnosed with IDRISI, the hydroclimatology was analyzed with HYDROGNOMON, the areas at risk of erosion were identified with QGIS and the water balance was estimated with INNERSOFT, which allowed the characterization of the Vinces river watershed to understand fluvial hydrodynamics for irrigation purposes. The results indicate that it has not suffered irreparable disturbances; the IDF Curve was also established for different maximum return periods; Likewise, areas with potential erosion risk were identified; and it was known that the fluvial system receives a good contribution from rainfall, although its consumptive use is high due to anthropic activity.

The main contribution of the study is the hydrogeomorphological analysis of the Vinces river watershed, developed with office automation and geomatics programs. In addition, the data obtained form part of an information base for the proposal of a comprehensive and sustainable management plan for water resources.

Keywords: Geomatics, Hydrology, Watershed, River.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 1

1.1 Planteamiento del problema 3

1.1.1 Situación problémica 3

1.1.2 Definición del problema 4

1.1.3 Formulación del problema 4

1.1.4 Sistematización del problema 4

1.2 Objetivos de la investigación 4

1.2.1 Objetivo general 4

1.2.2 Objetivos específicos 5

1.3 Hipótesis 5

1.4 Justificación 5

1.5 Metodología de investigación 6

1.5.1 Tipos de Investigación 6

1.5.2 Métodos de investigación 7

1.5.3 Técnicas de Investigación 7

1.5.4 Fuentes de información 8

1.6 Diseño de investigación 8

2 MARCO TEÓRICO 11

2.1 Coberturas y usos del suelo 11

2.2 Cuenca hidrográfica 14

2.3 Geología Regional y local 17

2.3.1 Geomorfología local 18

2.4 Características hidrogeomorfológicas de cuencas 20

2.4.1 Parámetros relativos a la forma 21

2.4.2 Parámetros relativos al relieve 32

2.4.3 Parámetros relativos a la red de drenaje 33
2.5 Hidrograma 37
2.6 Distribuciones teóricas de probabilidad 42
2.7 Orientación de la cuenca 45
2.8 Erosión, arrastre y sedimentación 46
2.8.1 Tipos de erosión hídrica 47
2.8.2 Proceso de la erosión Hídrica 48
2.8.3 Erosión media anual del suelo 49
2.8.4 Ecuación universal revisada de pérdida de suelos 49
2.8.5 Parámetro RUSLE usando geomática 54
2.9 Balance hídrico de cuencas 55
2.10 Modelos hidrológicos 62
2.10.1 Modelo hidrológico HEC-HMS 63
2.10.2 Modelo hidrológico PRMS 64
2.10.3 Modelo hidrológico SWAT 65
2.11 Geomática 69
2.11.1 Diseño asistido por computadora 71
2.11.2 Sistemas de Información Geográfica 71
2.11.3 Teledetección 72
2.11.4 Software ERDAS 74
2.11.5 Software IDRISI Selva 75
2.11.6 Software ArcGIS 77
2.12 Gestión integral y sostenible de cuencas hidrográficas 78
2.13 Prácticas para conservación de los suelos 79
3 MARCO CONTEXTUAL 80
3.1 Localización 80

3.2 Clima 81
3.3 Hidrografía 82
3.4 Geología y geopedología 83
4 RESULTADOS 84
4.1 Geomorfología de la cuenca del río Vinces 84
4.2 Hidroclimatología de la cuenca del río Vinces 86
4.3 Zonas con riesgo a la erosión en el río Vinces 91
4.4 Balance hídrico de la cuenca del río Vinces 98
5 DISCUSIÓN 102
5.1 Geomorfología de la cuenca del río Vinces 102
5.2 Hidroclimatología de la cuenca del río Vinces 103
5.3 Zonas con riesgo a la erosión en el río Vinces 104
5.4 Balance hídrico de la cuenca del río Vinces 104
6 CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN 106
6.1 Conclusiones 106
6.2 Recomendaciones 106
BIBLIOGRAFÍA 108
ANEXOS 122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Estaciones hidrológicas y meteorológicas* 9
Tabla 2. *Niveles de erosión establecidos por la FAO* 9
Tabla 3. *Clasificación para las cuencas según su tamaño* 22
Tabla 4. *Clasificación para las cuencas hidrográficas del Ecuador* 22
Tabla 5. *Rangos del Coeficiente de masividad por Martonne* 23
Tabla 6. *Rangos de pendiente media por Strahler* 24
Tabla 7. *Índice de sinuosidad hidráulico por Schumm* 25
Tabla 8. *Rangos para la relación de elongación por Schumm* 25
Tabla 9. *Rangos del coeficiente de compacidad por gravelius* 26
Tabla 10. *Rangos de la relación de circularidad por Miller* 27
Tabla 11. *Rangos del factor de forma adimensional por Horton* 28
Tabla 12. *Rangos de factor de forma de la cuenca por Gaspari* 29
Tabla 13. *Cálculo del tiempo de concentración* 31
Tabla 14. *Rangos de densidad de drenaje por Horton* 36
Tabla 15. *Factores para la relación de duración lluviosa* 44
Tabla 16. *Interpretación de pendientes para el Factor LS* 53
Tabla 17. *Interpretación de uso de suelo para el Factor C* 54
Tabla 18. *Interpretación del Factor P* 54
Tabla 19. *Interpretación del Índice de Aridez* 58
Tabla 20. *Clasificación de climas según categorías de humedad* 59
Tabla 21. *Rango espacial y espectral de imágenes de Landsat 5 y 8* 74
Tabla 22. *Características morfológicas de la cuenca por IDRISI* 85
Tabla 23. *Precipitaciones diarias máximas probables para M0006* 87
Tabla 24. *Precipitaciones máximas para M0006* 87
Tabla 25. *Intensidad de la lluvia para M0006* 88
Tabla 26. *Curva IDF (Intensidad - Duración - Frecuencia) para M0006* 88
Tabla 27. *Precipitaciones diarias máximas probables para M0124* 89
Tabla 28. *Precipitaciones máximas para M0124* 89
Tabla 29. *Intensidad de la lluvia para M0124* 90
Tabla 30. *Curva IDF (Intensidad - Duración - Frecuencia) para M0124* 90
Tabla 31. *Valores del Factor K según la FAO/UNESCO* 91

Tabla 30. *Rangos de las pendientes para el Factor LS* 92
Tabla 33. *Clasificación del suelo para el Factor C* 93
Tabla 34. *Niveles de erosión potencial en la cuenca del río Vinces* 94
Tabla 35. *Niveles de erosión actual en la cuenca del río Vinces* 96
Tabla 36. *Evapotranspiración potencial de la estación M0006* 98
Tabla 37. *Evapotranspiración potencial de la estación M0124* 98
Tabla 38. *Balance hídrico de la estación M0006* 99
Tabla 39. *Balance hídrico de la estación M0124* 100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. *Flujograma del proceso de erosión* 10
Figura 2. *Mapa con cobertura y uso de la tierra del Ecuador* 13
Figura 3. *Cuenca hidrográfica* 15
Figura 4. *Cuenca hidrográfica como sistema* 16
Figura 5. *Mapa Morfo - Pedológico* 19
Figura 6. *Forma del coeficiente de compacidad por gravelius* 26
Figura 7. *Forma de la cuenca según la relación de circularidad* 27
Figura 8. *Factor de forma adimensional por Horton* 28
Figura 9. *Factor de forma de la cuenca por Gaspari* 29
Figura 10. *Ciclo evolutivo de la cuenca* 32
Figura 11. *Jerarquización de una red hidrográfica* 34
Figura 12. *Relación de bifurcación en una cuenca hipotética* 35
Figura 13. *Textura de drenaje* 37
Figura 14. *Patrones de drenaje* 37
Figura 15. *Evolución de los caudales mediante un hidrograma* 38
Figura 16. *Hidrograma característico según la forma de la cuenca* 39
Figura 17. *Hietograma e hidrograma artificial* 40
Figura 18. *Hietograma e hidrograma natural* 41
Figura 19. *Proceso de selección de una distribución teórica* 42
Figura 20. *Función densidad de la distribución normal* 43
Figura 21. *Función densidad de la distribución normal estándar* 43
Figura 22. *Factores implicados en la USLE* 50
Figura 23. *RUSLE con GIS* 55
Figura 24. *Fases de trabajo del programa HEC-HMS* 64
Figura 25. *Diagrama de modelamiento con PRMS* 65
Figura 26. *Ciclo hidrológico de SWAT* 69
Figura 27. *Geomática o Geoinformática* 70
Figura 28. *Principales herramientas geomáticas* 71
Figura 29. *Componentes de los SIG* 72
Figura 30. *Clasificación de imágenes en ERDAS* 75
Figura 31. *Entrenamiento y validación en IDRISI* 76

Figura 32. *Interfaz gráfica de ArcGIS* 77
Figura 33. *Cuenca del río Vinces* 80
Figura 34. *Cantones en la cuenca* 80
Figura 35. *Temperatura media* 81
Figura 36. *Precipitación media* 81
Figura 37. *Radiación solar media* 81
Figura 38. *Velocidad del viento* 81
Figura 39. *Ríos de la cuenca* 82
Figura 40. *C. del Rio Guayas* 82
Figura 41. *Geología* 83
Figura 42. *Orografía* 83
Figura 43. *Geopedología* 83
Figura 44. *Textura* 83
Figura 45. *Perfil del cauce* 84
Figura 46. *Curva hipsométrica* 86
Figura 47. *Tributarios de la cuenca hidrográfica del río Vinces* 86
Figura 48. *Curva IDF (Intensidad - Duración - Frecuencia) para M0006* 88
Figura 49. *Curva IDF (Intensidad - Duración - Frecuencia) para M0124* 90
Figura 50. *Factor R* 93
Figura 51. *Factor K* 93
Figura 52. *Factor LS* 93
Figura 53. *Factor C* 93
Figura 54. *Erosión hídrica potencial de la cuenca del río Vinces* 95
Figura 55. *Erosión hídrica actual de la cuenca del río Vinces* 97
Figura 56. *Balance hídrico de la estación M0006* 99
Figura 57. *Balance hídrico de la estación M0124* 100

ÍNDICE DE ECUACIONES

[1]. *Coeficiente de masividad por Martonne*.....22
[2]. *Coeficiente de pasividad por Martonne*.....23
[3]. *Coeficiente orográfico por Martonne*.....23
[4]. *Pendiente promedio de la corriente*.....24
[5]. *Coeficiente de sinuosidad hidráulico por Schumm*.....24
[6]. *Relación de elongación por Schumm*.....25
[7]. *Coeficiente de compacidad por gravelius*.....25
[8]. *Relación de circularidad por Miller*.....26
[9]. *Factor de forma adimensional por Horton*.....27
[10]. *Tc por Kirpich*.....31
[11]. *Tc por SCS*.....31
[12]. *Tc por CHPW*.....31
[13]. *Tc por Témez*.....31
[14]. *Tc por Valencia y Zuluaga*.....31
[15]. *Tc por Chow*.....31
[16]. *Relación de bifurcación por Horton*.....35
[17]. *Frecuencia de cauces por Horton*.....36
[18]. *Densidad de drenaje por Horton*.....36
[19]. *Tiempo base*.....40
[20]. *Probabilidad de ocurrencia del evento*.....44
[21]. *Corrección de intervalos fijos*.....44
[22]. *Intensidad de la lluvia*.....45
[23]. *Intensidad de la precipitación válida para una cuenca*.....45
[24]. *Ecuación de erosividad por Fournier*.....49
[25]. *Ecuación universal revisada de pérdida de suelo (RUSLE)*.....50
[26]. *Factor R de RUSLE*.....51
[27]. *Factor K de RUSLE*.....51
[28]. *Factor L de RUSLE*.....52
[29]. *Coeficiente m del Factor L de RUSLE*.....52
[30]. *Coeficiente β del Factor L de RUSLE*.....52
[31]. *Otra ecuación para el Factor L de RUSLE*.....53

[32]. *Factor S de RUSLE* 53
[33]. *Balance hidrológico general* 56
[34]. *Balance hidrológico por Hargreaves* 57
[35]. *Balance hidrológico para América del Sur por UNESCO* 57
[36]. *Balance hidrológico por Thornthwaite* 58
[37]. *Índice de Aridez* 58
[38]. *Índice de Humedad* 59
[39]. *Índice de Humedad por Thornthwaite* 59
[40]. *Evapotranspiración potencial por Thornthwaite* 61
[41]. *Evapotranspiración potencial por Ivanov* 61
[42]. *Evapotranspiración potencial por Hargreaves* 61
[43]. *Evapotranspiración del cultivo* 62
[44]. *Ecuación de equilibrio del agua por SWAT* 66

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Número máximo de horas luz "N" para diferentes latitudes 122
Anexo B. Radiación solar extraterrestre “Ra” para diferentes latitudes 123
Anexo C. Curva hipsométrica y Altura media de la cuenca 124
Anexo D. Curva hipsométrica de la cuenca del río Vinces 126
Anexo E. Altura media de la cuenca del río Vinces 126
Anexo F. Jerarquización de la cuenca del río Vinces 127
Anexo G. Datos climáticos de la estación M0006 128
Anexo H. Datos climáticos de la estación M0124 129
Anexo I. Datos mensuales de Pmax en 24 horas de la estación M0006 130
Anexo J. Datos mensuales de Pmax en 24 horas de la estación M0124 131
Anexo K. Software HYDROGNOMON para la estación M0006 132
Anexo L. Prueba de Chi-cuadrado para M0006 132
Anexo M. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para M0006 133
Anexo N. Distribución base de Weibull con la Normal para M0006 133
Anexo O. Software HYDROGNOMON para la estación M0124 134
Anexo P. Prueba de Chi-cuadrado para M0124 134
Anexo Q. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para M0124 135
Anexo R. Distribución base de Weibull con la Normal para M0124 135
Anexo S. Software PETP para la estación M0006 136
Anexo T. Software Innersoft BH para la estación M0006 136
Anexo U. Software PETP para la estación M0124 137
Anexo V. Software Innersoft BH para la estación M0124 137
Anexo W. Comparación de la P con la ETo en la estación M0006 138
Anexo X. Comparación de la P con la ETo en la estación M0124 138

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS

A:	Área.
ANOVA:	Análisis de varianza.
B:	Ancho de la cuenca.
BH:	Balance hídrico.
CAD:	Diseño Asistido por Computadora.
CLC:	Programa Corine Land Cover.
CNRH:	Consejo Nacional de Recursos Hídricos.
Dd:	Densidad de drenaje.
DEM:	Modelo Digital de Elevación.
ETM+:	Sensor mapeador temático mejorado plus.
ETP:	Evapotranspiración potencial.
FAO:	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
GIRH:	Gestión Integrada de Recursos Hídricos.
GPS:	Sistema de Posicionamiento Global.
H:	Desnivel altitudinal de la cuenca.
HEC-HMS:	Centro de Ingeniería Hidrológica - Sistema de Modelado Hidrológico.
Hmax:	Cota máxima.
Hmin:	Cota mínima.
Hmed:	Cota media.
HRU:	Unidad de Respuesta Hidrológica.
IEE:	Instituto Espacial Ecuatoriano.
IGM:	Instituto Geográfico Militar.
IHG:	Índice HidroGeomorfológico.
INAMHI:	Instituto Nacional de Meteorología en Hidrología.
Kf:	Factor de forma adimensional por Horton.
LANDSAT:	Tierra y satélite.
Lc:	Longitud del cauce principal.
Lm:	Longitud máxima de la cuenca.
MAG:	Ministerio de Agricultura y Ganadería.

MAGAP: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.

MO: Materia orgánica.

NIR: Infrarrojo cercano (*near infrared*).

Nu: Número de orden.

OMI: Organización Meteorológica Internacional.

OMM: Organización Meteorológica Mundial.

P: Perímetro.

Pan: Pancromática (*panchromatic*).

PMP: Punto de Marchitez Permanente.

PRMS: Sistema de modelamiento de escorrentía - precipitación (*Precipitation Runoff Modeling System*).

Rb: Relación de bifurcación.

ROI: Regiones de interés (*Region of interest*).

S: Pendiente media del cauce.

SCS: Servicio de Conservación de suelos.

SENAGUA: Secretaría Nacional del Agua.

Sh: Coeficiente de sinuosidad hidráulica.

SHP: Formato de archivo informático desarrollado por ESRI (*shapefile*).

SIG: Sistema de Información Geográfica.

SNI: Sistema Nacional de Información del Ecuador.

SRTM: Misión Topográfica del Radar Shuttle.

SWAT: Herramienta de evaluación de suelos y aguas.

SWIR: Infrarrojo de onda corta (*shortwave infrared*).

Tc: Tiempo de concentración.

TIR: Infrarrojo térmico (*thermal infrared*).

TM: Sensor mapeador temático.

USDA: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

1 INTRODUCCIÓN

Según Aguirre (2007), las cuencas hidrográficas son áreas naturales delimitadas física y/o políticamente, donde se llevan a cabo diversas actividades humanas. Constituyen una unidad territorial para planificar u ordenar, ya que existe interacción continua entre la naturaleza y el hombre. Y en dicha unidad territorial es imperante la sostenibilidad para mantener su armonía (Medellín, 1992). Teóricamente existe un desarrollo sostenible cuando el factor social - económico - ambiental son equitativos (Lozano, 1997).

Ramakrishna (1997) indica que, si se maneja de manera cuidadosa su uso, tratamiento, liberación y circulación del líquido vital, lograría citarse como un medio naturalmente recuperable. No obstante, el mal uso antropogénico puede tener efectos adversos aguas abajo, como suele suceder en las cuencas hidrográficas. Por lo tanto, es necesario asegurar un caudal ecológico para los ecosistemas hidrológicos, ya que el agua dulce es indispensable para la existencia y permanencia de todos los hábitats en la tierra. Por eso y más es importante conservar y preservar las cuencas hidrográficas ya que éstas son una pieza clave para el ciclo del agua. En una planificación y ordenamiento territorial se busca reducir los conflictos por uso y aprovechamiento de los recursos naturales, por ende, está implícita la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) de las cuencas, pues, en esta se plantea un manejo completo del territorio, buscando un desarrollo sostenible (Bernex, 2009).

En los últimos años, el uso de herramientas informáticas y modeladores hidrográficos con extensión a Sistemas de Información Geográfica (GIS) han ido en aumento, porque ayudan a evaluar suelo y agua de un territorio natural (cuenca) y su interacción antropogénica, permitiendo comprender y gestionar un sistema fluvial cuyos resultados son utilizados en la proyección temporal, medio y/o extendido plazo, garantizando el recurso vital para presente y futuras generaciones aguas abajo de la cuenca (Oñate, 2009).

Kindsvater (1964) sostiene que la preocupación por las cuencas hidrográficas en Estados Unidos (EEUU) es desde 1808 (cuando Albert Gallatin presentó un informe que proponía la unificación del país a través del uso de sistemas de

transporte fluvial, los cuales se basarían en perfeccionar la accesibilidad y conducción a los cuerpos de agua); pero a finales de 1870 e inicio de 1900 se afianza la idea del concepto de "*River Basin Development*", mediante la fundación de la delegación para el desarrollo en los recursos hídricos: Mississippi en 1870, Missouri en 1884 y Tennessee en 1933. En países de Latinoamérica y regiones Caribeñas fue acogido dicho término cerca de la década de 1960, proporcionándole una orientación completa en el manejo de medios renovables y no renovables, dándole usos específicos como: electricidad, potabilización, riego, etcétera (Fernández-González y Aylward,1999).

La protección y mantenimiento de los medios, y específicamente la gestión integral del recurso agua, siendo un desafío a nivel mundial, puesto que el medio es limitado e importante; y estratégico desde una perspectiva social, económica y ambiental (Global Water Partnership [GWP], 2009).

Fuster (2013) indica que, como respuesta al desafío se logran destacar esfuerzos nacionales e internacionales de tipo público y privado, entre los que se encuentra la Cumbre Mundial realizada (el día 4 en el mes 9 del año 2002) en Johannesburgo, en la "Sostenibilidad para el Desarrollo", donde la GIRH se presenta como el enfoque apropiado para gestionar eficazmente este medio.

En general, a nivel mundial se buscan soluciones para alcanzar un desarrollo sostenible, dándole seguimiento a los factores sociales, económicos y ambientales porque trabajan en sinergia entre sí (Francke, 2002). La expansión poblacional planetaria en aumento constante, es proporcional a la demanda del agua dulce en el planeta Tierra, ya que su uso es indispensable y cotidiano (doméstico, agrícola e industrial), y debido a la dinámica compleja del recurso, es crucial implementar una gestión integral que se adapte constantemente a los cambios en el espacio y el tiempo (Muñoz, Arumí y Rivera, 2013).

El aprovechamiento de los recursos ecológicos es directamente proporcional a la necesidad de la población, donde la expansión de la misma es uno de los precursores del impacto social y ambiental producido en el planeta; y dicho crecimiento universal y, por ende, el consumismo, pondría en cuestión la seguridad alimentaria (Carabias et al., 2009).

En la actualidad, las utilización y actualización científica para distintas áreas son más eficientes, sin embargo, hay otras áreas que el costo de la producción se asocia directamente al deterioro del ambiente, afectando indirectamente al ser humano, como la actividad agropecuaria cuyas labores (labranza, fertilización, control fitosanitario y de malezas, etc.) son necesarias para el desarrollo rural extensivo e intensivo (Martin et al., 2002).

Es importante tener en cuenta la correspondencia entre desarrollo económico y consumo de agua, especialmente porque las actividades humanas demandan cada vez más agua, lo que puede generar conflictos en su uso y aprovechamiento. Sin embargo, es necesario considerar otras valoraciones del recurso hídrico, que van más allá de su valor económico, ya que tiene múltiples usos. Por lo tanto, el manejo integrado del recurso agua (GIRH) debe contemplar el análisis multiobjetivo donde incluya aspectos como sostenibilidad “social, económica y ambiental” (Schardong y Simonovic, 2011).

Ecuador tiene escasos planes que no poseen la importancia requerida para la gestión integral con desarrollo sostenible de sus hidrocuencas (Castro, 2012), y específicamente en la cuenca hidrográfica del río Vinces no existe ningún estudio minucioso y completo, considerando los potenciales servicios ecosistémicos. La caracterización hidrológica se encauza en el estudio a una cuenca, donde las herramientas geográficas permiten diagnosticar la geomorfología, analizar la hidroclimatología, identificar las zonas con riesgo a la erosión y estimar el balance hidrológico, para entender la hidrodinámica fluvial y su potencial uso con fines de riego.

1.1 Planteamiento del problema

Actualmente el manejo del recurso hídrico en cuencas está enfocado a solucionar problemas concernientes al uso y aprovechamiento del agua como tal, excluyendo la importancia asociativa natural existente, lo cual ocasiona problemas ambientales y sociales, y que repercute en la economía del sector.

1.1.1 Situación problémica

El estudio es desarrollado en la hidrocuenca del río Vinces (cuya superficie es de 4,620 km² aproximadamente), influenciando directamente a tres provincias

del Ecuador (Cotopaxi, Los Ríos y Guayas); los cuales poseen un acelerado crecimiento demográfico, además de gran desarrollo agropecuario e industrial. Dichas actividades demandan de abundante consumo hídrico, el cual es indispensable para un adecuado progreso antrópico. La cobertura y uso de la tierra pasa por un proceso dinámico, modelado naturalmente o por acción antropogénica. Esta última ha contribuido en la explosión del desarrollo agropecuario, pudiéndose evidenciar en la superficie estudiada.

1.1.2 Definición del problema

En la cuenca hidrográfica del río Vinces, es de gran importancia ambiental, ya que es una superficie cuya recarga es pluvial, además de poseer vegetación vernácula y animal autóctonos. Pero la expansión antropogénica va en aumento y, por ende, la explosión del desarrollo agropecuario. Cuyo espacio rural posee mucho potencial agrícola y pecuario, ya que tradicionalmente su desarrollo se basa en los cultivos transitorios (cereales, hortalizas, etcétera) y en la ganadería bovina “mayoritariamente”, aunque en los actuales momentos existe una reconversión a cultivos perennes (Frutales, etcétera). De ahí la búsqueda del aprovechamiento sostenible (social - económico - ambiental) de los recursos naturales.

1.1.3 Formulación del problema

¿El agua de la cuenca del río Vinces podrá abastecer a la evidente expansión de la frontera agrícola y por ende a la demanda del riego?

1.1.4 Sistematización del problema

- ¿Cuál es la descripción geomorfológica que posee la cuenca?
- ¿Qué régimen medio y extremo hidroclimático tiene la cuenca?
- ¿Cuáles son las zonas vulnerables a la erosión de la cuenca?
- ¿Cómo es el funcionamiento del sistema fluvial de la cuenca?

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

Caracterizar la cuenca hidrográfica del río Vinces (Ecuador) mediante herramientas geomáticas y ofimáticas, que permitirá entender la dinámica fluvial

y su potencia aprovechamiento con fines de riego para la creciente frontera agrícola.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar la geomorfología de la cuenca del río Vinces mediante herramientas geomáticas.
- Analizar la hidroclimatología de la cuenca del río Vinces mediante herramientas ofimáticas.
- Identificar las zonas con riesgo a la erosión en el río Vinces mediante herramientas geomáticas.
- Estimar el balance hídrico de la cuenca del río Vinces mediante herramientas ofimáticas.

1.3 Hipótesis

El diagnóstico geomorfológico, el análisis hidroclimático, la identificación de zonas con riesgo a la erosión y la estimación del balance hídrico, permitió la caracterización de la cuenca del río Vinces para entender la dinámica fluvial y su potencia aprovechamiento con fines de riego para la creciente frontera agrícola.

1.4 Justificación

Ballarín y Rodríguez (2013) señalan que la gran variedad de ecosistemas presentes en Ecuador implica un importante desafío en el manejo del medio hídrico, pues se requieren estudios específicos para cada cuenca hidrográfica. Sin embargo, es necesario implementar políticas integrales y participativas como parte de la estrategia del Estado para conservar, preservar y restaurar los sistemas equitativamente, asegurando la cantidad y calidad del agua de acuerdo con los principios de sostenibilidad, “tanto para las generaciones presentes como futuras” (Peña, Carter y Ayala-Fierro, 2001). A mediados de 2014, se tomó importancia al recurso vital con la entrada en vigor de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (SENAGUA, 2014), quien establece un acceso al recurso vital a manera de una facultad humana de las personas para tener acceso al agua higieniza, bastante, saludable, admisible y asequible para uso consuntivo, en términos cualitativos y cuantitativos. Esta ley además inhibe cualquier tipo de desestatificación o acaparamiento individual o

colectivo del agua debido a su importancia socioeconómica y ambiental, por lo que no puede ser objeto de ningún acuerdo comercial con organismos gubernamentales, entidades multilaterales o empresas privadas nacionales o extranjeras. Por lo tanto, el manejo del recurso debe ser únicamente estatal o comunal.

Por lo expuesto anteriormente, es indispensable un análisis hidroclimático y geomorfológico a la cuenca del río Vinces para entender el funcionamiento del sistema fluvial, logrando instaurar ordenadamente directrices técnicas que permitirán mejorar el manejo del agua y suelo. Cuya información generada será la antesala para el manejo integral y sostenible del líquido vital (H_2O) en dicha cuenca hidrográfica, consiguiendo la sustentabilidad de sus recursos originarios. Por la falta de información sobre la gestión integral y/o sostenible de una cuenca hidrográfica aledaña o cercana, y en especial para el río Vinces, esta investigación proporciona datos que servirán de referencia para próximas exploraciones relacionadas.

1.5 Metodología de investigación

La investigación en cuestión involucra tanto el enfoque cualitativo como el cuantitativo. El primer enfoque se basa en un pensamiento general positivista, razonado, justificado y específico con resultados orientados, y su función es verificar y confirmar teorías mediante la realización de estudios muestrales representativos. Por otro lado, el segundo enfoque se basa en un juicio empírico, lógica inductiva, encaminada a la objetividad que busca percibir, representar y/o formar teorías, dándole importancia calada, sin necesidad de traducir sus análisis a términos matemáticos.

1.5.1 Tipos de Investigación

Descriptiva: porque el propósito de describir las características en la hidrocuenca que lleva el nombre del río Vinces en Ecuador, cuyo fin es comprender de manera más precisa su dinámica fluvial y utilizar esta información para el riego. Esta investigación se enfoca en el entendimiento de un fenómeno, por lo que los resultados no se valoran cualitativamente.

Cuantitativa: porque el motivo de la investigación es analizar detalladamente los fenómenos hidrodinámicos en la cuenca que lleva el nombre del río Vinces. Para ello, se recopilarán datos y se utilizarán herramientas matemáticas, estadísticas e informáticas para medir estos fenómenos de manera precisa.

Aplicada: porque la meta es descubrir tácticas que puedan ser utilizadas y duplicadas en otras cuencas para resolver una problemática particular. La investigación aplicada utiliza el conocimiento teórico para desarrollar soluciones prácticas, lo cual es comúnmente empleado en áreas como la ingeniería.

Investigación aplicada tecnológica: porque permitirá generar nuevos conocimientos práctico para el sector productivo.

Investigación aplicada científica: porque tiene fines predictivos, permitiendo medir ciertas variables para pronosticar comportamientos de la cuenca.

1.5.2 Métodos de investigación

Deductivo: porque la investigación se enfocará en lo específico, partiendo de un enunciado general y desglosando sus partes o elementos para llegar a conclusiones más precisas. Es decir, el enfoque irá desde lo general hasta lo particular.

Histórico: porque el objetivo del análisis multitemporal es partir del pasado, recorrer el presente y proyectarse al futuro hasta conseguir pormenorizar una comprensión mucho más profunda de la situación estudiada.

1.5.3 Técnicas de Investigación

Trabajo de campo: Destacan dos tipos de datos recolectados, verbales (que incluyen diálogos, intercambios de opiniones y reflexiones relacionadas con los temas de investigación); y no verbales (que consisten en la compilación de datos mediante la visualización inmediata, tanto participante como no participante, así como la observación de hechos sin intervención directa).

Trabajo de oficina: recolección de información relevante a partir de diversas fuentes, ya sean impresas o digitales. Posteriormente se realizará una revisión,

análisis e interpretación de los diálogos de reflexión en relación con la bibliografía utilizada. Finalmente, se redactará el informe de investigación.

1.5.4 Fuentes de información

Primaria: son aquellas que recogen información original publicada por primera vez, sin haber sido censurada, analizada, o interpretada por otras personas. Este tipo de fuentes pueden surgir de diversas actividades creativas o investigaciones y son consideradas parte fundamental de la colección básica de una biblioteca, ya sea en formatos físicos o digitales.

Secundaria: incluyen información primaria que ha sido sintetizada y reorganizada para su posterior uso. Su finalidad principal es facilitar y optimizar el acceso a las fuentes primarias y sus contenidos. Esta colección de referencia es particularmente útil cuando no existe un acceso directo a la fuente original por diversas razones, como falta de recursos o falta de confianza en la fuente primaria. De igual forma, estas fuentes se emplean para respaldar los hallazgos en una investigación y para ampliar la información contenida en las fuentes primarias.

Terciaria: son herramientas de tipo físico o virtual que contienen información relacionada con las fuentes secundarias. Se consideran parte esencial de la colección de referencia de una biblioteca, dado que permiten controlar y acceder a diversos repertorios de referencia, tales como guías de obras de referencia o bibliografías especializadas. Básicamente, estas fuentes se utilizan para facilitar la búsqueda y organización de información precisa en una biblioteca.

1.6 Diseño de investigación

Geomorfología de la cuenca en estudio: La selección del software IDRISI Selva responde al previo conocimiento técnico en hidrología y geomática para la obtención de geoinformación, con dicho programa se calcularon las variables morfológicas de la hidrocuenca que lleva el nombre del Cantón Vinces. Cabe mencionar que el ráster de elevación utilizado fue el generado por la misión Shuttle Radar Topography Mission “SRTM” (http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata). Para la delimitación de la cuenca, se consideró aguas arriba del desagüe de la red de drenaje en estudio; procedimientos expuestos por Nieto et al. (2022).

Hidroclimatología de la cuenca en estudio: La Información hidrológica y meteorológica utilizada en la investigación, fue extraída y tabulada de los ANUARIOS del INAMHI (ver Tabla 1). El modelamiento se lo realizará con el programa HYDROGNOMON, el cual permitirá entender cómo las variaciones climáticas pueden afectar el suministro hídrico, el manejo del recurso agua y la previsión de riesgos hidrológicos para el sitio de influjo en la hidrocuenca; procedimientos expuestos por López, et al (2018).

Tabla 1. *Estaciones hidrológicas y meteorológicas*

Código	Estación	Tipo	Latitud	Longitud	Elevación
H0347	Quevedo	Hidrológica	-1.015	-79.463	100 msnm
H0348	Vinces	Hidrológica	-1.549	-79.751	41 msnm
M0006	Pichilingue	Meteorológica	-1.090	-79.468	120 msnm
M0124	San Juan	Meteorológica	-0.954	-79.319	95 msnm

Zonas con riesgo a la erosión en el río Vinces: En la determinación del proceso de erosión potencial del suelo de acuerdo al marco de modelización de RUSLE con el software QGIS (con GRASS), se aplica la ecuación “A=RxKxLS”, (ver Figura 1) en la cual interviene la erosividad de lluvia “R”, la erodabilidad “K” y la topografía “LS”, los cuales son factores naturales; y para establecer el deterioro edafológico actual, se utilizará la ecuación completa “A=RxKxLSxCxP”, donde involucra los factores antes mencionados, más la cobertura y gestión “C” y práctica de conservación “P”; procedimientos expuestos por Ganasri y Ramesh (2016). Para la interpretación (ver Tabla 2), se utilizaron las clases o intensidad de amenaza de desgaste del suelo por erosión hídrica:

Tabla 2. *Niveles de erosión establecidos por la FAO*

Número de serie	Niveles de erosión	Pérdida potencial de suelo / rendimiento de sedimentos
1	Muy bajo	< 5.00 t/ha/año
2	Bajo	5.00 - 25.00 t/ha/año
3	Moderado	25.01 - 50.00 t/ha/año
4	Alto	50.01 - 100.00 t/ha/año
5	Muy Alto	100.01 - 200.00 t/ha/año
6	Extremo	> 200.00 t/ha/año

Fuente: Behera (2020)

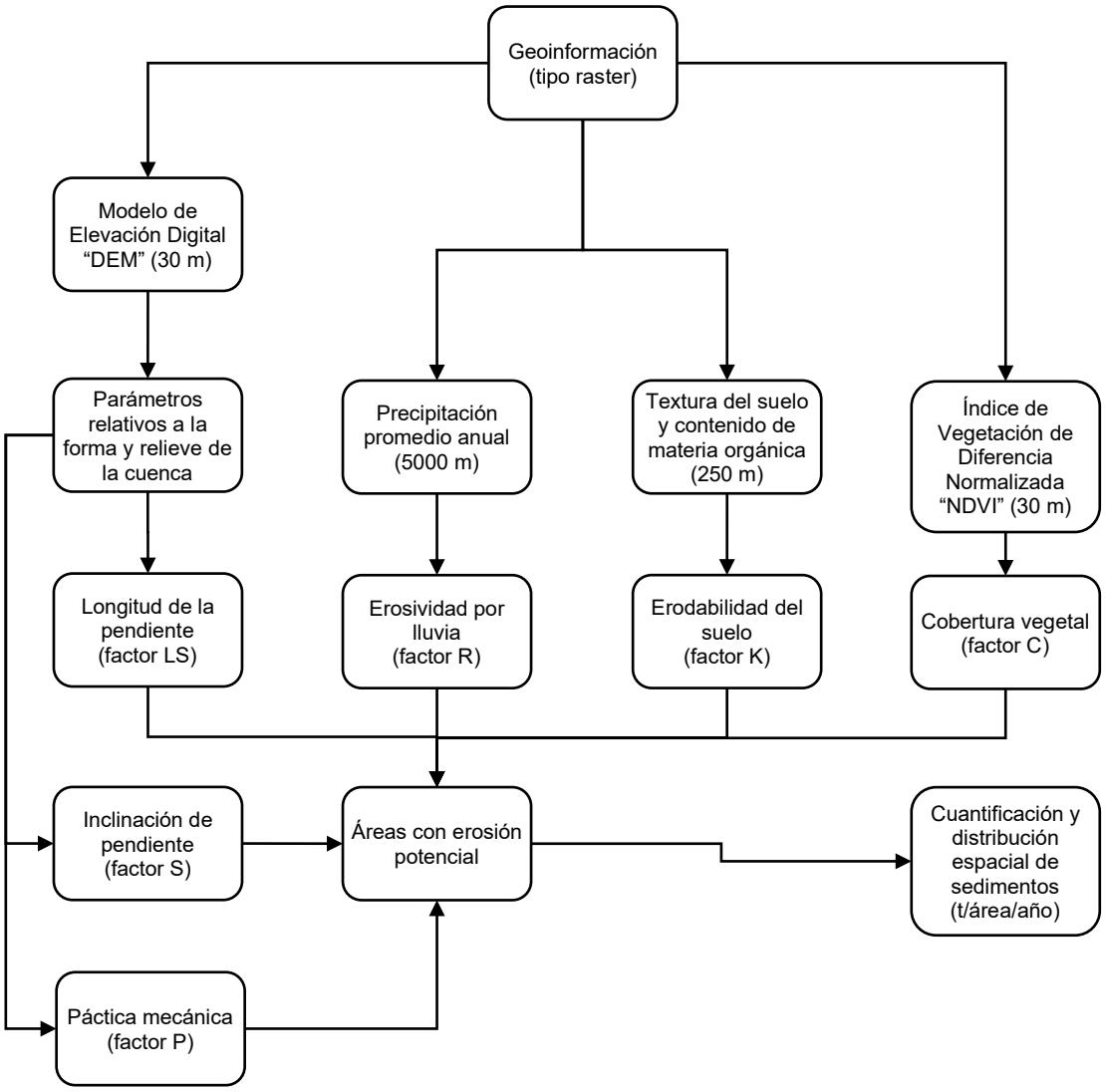


Figura 1. *Flujograma del proceso de erosión*

Balance hídrico de la cuenca en estudio: La Información meteorológica utilizada en la investigación, fue extraída y tabulada de los ANUARIOS del INAMHI. Se utilizó los programas PETP (https://bit.ly/35oQkq4) desarrollado por Gutiérrez (2016), para calcular la evapotranspiración potencial por Thornthwaite; e InnerSoft ISBH (http://isbh.itspanish.org/es/ISBH_es.zip) para estimar el balance hídrico, además de hallar la categorización atmosférica del sitio en estudio por Thornthwaite; dichos procedimientos son expuestos por Alvarenga, et al. (2016).

2 MARCO TEÓRICO

La norma suprema del Estado Ecuatoriano establece claramente que la dirección y el manejo del recurso vital son de carácter exclusivamente público. Esto se hace patente en el Artículo 12, en el cual se establece que la facultad humanitaria del agua es vital, y se reconoce al agua como propiedad natural y estratégica con dominio estatal, lo cual significa que es un recurso que no puede ser vendido o transferido. Además, el Artículo 318 indica que las moléculas de H_2O son fundamental en la naturaleza y para la existencia antropogénica, y debe ser protegido por el Estado, y no puede ser privatizado de ninguna forma.

Valencia (2013) señala que los 31 sistemas hidrográficos del Ecuador están determinados por la cordillera de los Andes, y que el 49% de sus vertientes pertenecen al Océano Pacífico, mientras que el 51% a la Amazonía. Esto hace que el país tenga una gran riqueza en recursos hídricos. Según el CNRH (2002), la escorrentía media total del país es de 432,000 hm^3/año, con una escorrentía específica de 1,600 mm/año, lo que significa que cada habitante tiene acceso a 43,500 m^3 de agua al año, una cifra superior a la media mundial de 300mm/año, lo que equivale a 10,800 m^3/habitante al año (Consejo Nacional de Recursos Hídricos [CNRH], 2002).

Según un informe del INAMHI (2009), la hidrocuenca que lleva el nombre del cantón Vinces ya que es donde desemboca el río, forma parte de la cuenca baja del importante río Guayas, porque es el cuerpo de agua más relevante de la costa del océano pacífico y supone una región de enorme e importancia económica para el Ecuador.

El manejo de cuencas en Ecuador está encaminado a enmendar problemas del sistema fluvial como tal (inundación, azolvamiento, desbordamiento, sequía, etc.) sin darle importancia a la sinergia natural de sus componentes (físicos, biológicos y antropológicos), lo cual ha ocasionado problemas sociales y ambientales (Aguirre, 2007).

2.1 Coberturas y usos del suelo

La cobertura de la tierra se entiende al espacio ocupado, en este caso para una cuenca es la flora (natural, agrícola), cuerpos de agua y/o la zona urbana. Este

tipo de caracterización engloba un amplio rango de aplicaciones, pero básicamente es aplicado en la planificación territorial (Chuvieco, 2010). La cobertura terrestre muestra los elementos físicos que ocupan la superficie (Budreski et al., 2007). Y el uso de la tierra está en congruencia a las acciones humanas y/o a las funciones económicas, como los cultivos y/o estructuras urbanas, desarrolladas en una porción específica del suelo (Lillesand, Kiefer y Chipman, 2008). Watson et al. (2000) sostienen que a menudo se confunden los términos "cobertura de la tierra" y "uso de la tierra": el primero hace referencia a la capa biológica visible de la tierra, como la vegetación natural o antrópica presente; y, por otro lado, el segundo se refiere a las actividades, arreglos e insumos que las personas llevan a cabo en una determinada área cubierta por la tierra. La aplicación más avanzada y significativa en la observación remota es la obtención de mapas que muestran tanto la cobertura como el uso de la tierra (Foody, 2002; Rogan, Franklin y Roberts, 2002). Utilizar la teledetección mediante imágenes satelitales resulta ser la opción más conveniente y eficaz para generar mapas cartográficos de la ocupación del suelo a distintas escalas (Seyler et al., 2002).

Según la EEA (1995), el proyecto CORINE Land Cover (CLC) es un programa que busca coordinar la información ambiental mediante la elaboración de una geodatabase (base de datos geográficos) de la cubierta y el uso del suelo en el territorio europeo a lo largo del tiempo. El objetivo principal del es normalizar las diferentes coberturas terrestres y, por lo tanto, permitir la comparación de los usos del suelo para tomar decisiones informadas. El proyecto CLC es un pionero en la estandarización de las coberturas terrestres para facilitar su comparación y mejor gestión. Siendo ésta una herramienta específica para realizar inventario de coberturas terrestres y la actualización permanente de dicha información, permitiendo evidenciar procesos de cambios (Hazeu, 2003).

A continuación, en la Figura 2 se muestra un mapa con el último levantamiento de información de la cobertura y uso de la tierra en Ecuador:

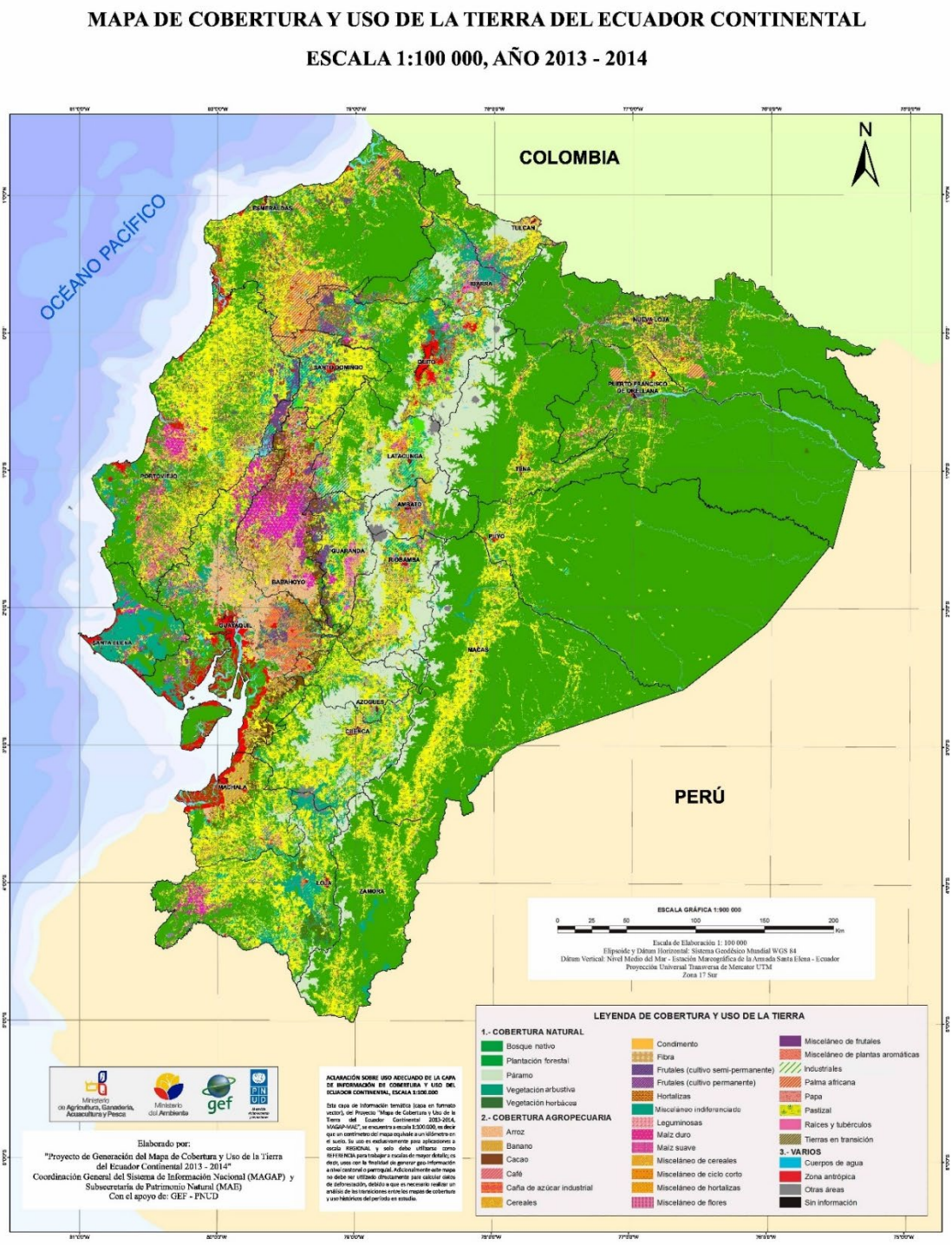


Figura 2. *Mapa con cobertura y uso de la tierra del Ecuador*

Fuente: MAGAP-MAE (2014)

2.2 Cuenca hidrográfica

Casado y Montes (1995), y González (1992) coinciden en que la hidrografía se enfoca en el estudio y la medición de cualquier cuerpo hídrico Terrestre, incluyendo mares, corrientes, ríos, lagos, embalses, entre otros. Por otro lado, la hidrología se centra en el estudio superficial y subterráneo del agua en la Tierra, considerando las fases del ciclo hidrológico (aparición, circulación y distribución) en un contexto espacio-temporal, además de las propiedades biofisicoquímicas del agua e interacciones con el ambiente. Burbano, Becerra y Pasquel (2015) indican que el término "hidrogeología" fue acuñado por primera vez por el francés Lemarck en 1802 para describir los procesos erosivos de los ríos. Posteriormente, en 1880, el término fue reintroducido por el inglés Lucas para integrar el análisis hidrológico con las ciencias geológicas, posicionándose como hidrogeociencia (Werner, 1996).

La hidrogeología estudia el agua superficial, subsuperficial y subterránea del planeta, siendo una rama de la geología aplicada que estudia el origen, circulación, estados, propiedades biofisicoquímicas, condicionamientos subyacentes, interacción con los suelos, rocas y acuíferos, y su explotación (Custodio y Llamas, 1983).

Las cuencas hidrográficas (conocidas como área de captación de un cuerpo de agua dulce) es todo espacio de terreno que contribuye a una corriente natural y que suele estar rodeada por vegetación; esta flora contribuye a mantenerla en buen estado, siendo beneficioso ya que la vegetación minimiza el potencial impacto de la precipitación caída sobre el recurso edáfico, incrementa la penetración del agua a capas o estratos inferiores, y reduce la erosión y sedimentación (Dombeck, 2018). Las hidrocuencas son espacios básicos de gestión territorial (Dourojeanni, Jouravlev y Chávez, 2002), planificados para explotarlos racionalmente, en especial el hídrico, permitiendo la sostenibilidad (Medellín, 1992).

Las cuencas hidrográficas se pueden subdividir en unidades más pequeñas, como subcuencas y microcuencas, o viceversa (la unión de unidades menores logra constituir una unidad mayor), e igualmente las microcuencas o cauces de

unidades menores drenan a cauces de unidades mayores “subcuencas” (Faustino, 1996). Los ríos son cursos de agua dulce con fronteras marcadas por los límites impuestos por el relieve (ver Figura 3). Estos ecosistemas acuáticos se generan a partir del lavado superficial de los suelos y/o de acuíferos subterráneos, los cuales trabajan en sinergia con el medio terrestre y aéreo que los rodea (Pozo y Elosegi, 2009).

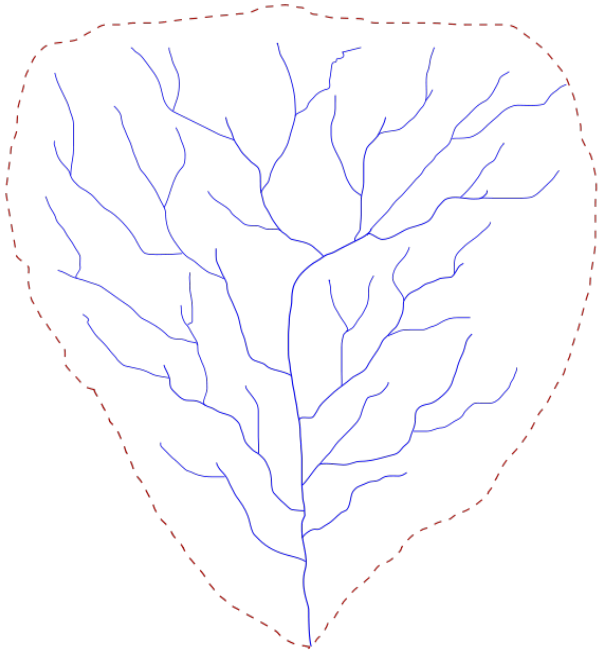


Figura 3. *Cuenca hidrográfica*

Fuente: Dourojeanni et al. (2002)

Las cuencas hidrográficas son más que límites naturales y características biofísicas, es un sistema (ver Figura 4), ya que existe una relación entre recursos naturales y habitantes, los cuales están en constante movilidad por efecto de los escenarios biofísicos, socioeconómicos y culturales (Palacios Ruiz, 2016). Y Ramakrishna (1997) coincide que las variables biofísicos y antropogénicos de la hidrocuenca debe mantener un equilibrio, cuyo ambiente se encuentre en armonía.

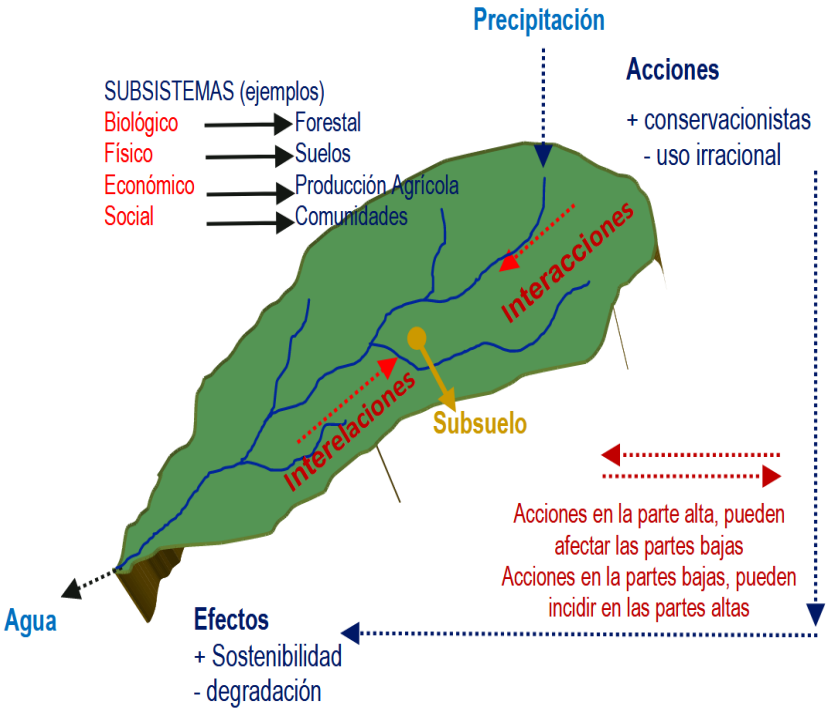


Figura 4. *Cuenca hidrográfica como sistema*

Fuente: Palacios Ruiz (2016)

El entorno físico que recoge y acumula el líquido vital para uso consuntivo "extractivo" (doméstico, agropecuario e industrial) y no consuntivo (recurso natural) se las conoce como hoya hidrográfica. La función de dichas cuencas hidrográficas se fundamenta en la fase o período hidrológico el cual interacciona entre sí, factores abióticos o bióticos. La conservación y preservación del sistema fluvial es un factor importante para el desarrollo integral con sostenibilidad, ya que son espacios sociogeográficos donde las personas socializan y trabajan a partir de la disponibilidad del medio natural (Villón, 2004).

Las potencialidades y usos de una cuenca hidrológica se deben identificar mediante la determinación de su "vocación de cuenca". Esta clasificación puede abarcar diversos usos, tales como hidroeléctrico, urbano, agrícola, forestal, recreativo, ecológico, entre otros. La idea de "vocación de cuenca" se relaciona con la capacidad de un territorio de acoger ciertos tipos de actividades, teniendo en cuenta sus limitaciones y capacidad funcional. Todo esto se lleva mediante las nociones relación y combinación (Gómez, 1994).

2.3 Geología Regional y local

El continente ecuatoriano limita con la placa tectónica oceánica de Nazca que está subyaciendo una longitud anual aproximada es de 54 milímetros, bajo la placa tectónica continental de Sudamérica (Collot et al., 2009) o 55-58 mm/año (Nocquet et al., 2009). Además, la placa está experimentando un movimiento hacia el nordeste mediante la falla dextral (Winter et al., 1993) a una longitud anual cercana a 6 milímetros (Trenkamp et al., 2002). A continuación, las formaciones identificadas en la cuenca del río Vinces:

- Formación Baba (Plio-Pleistoceno) se caracteriza por el depósito de cenizas laháricas en forma de terrazas situado en el nordeste de la cuenca; se puede encontrar más detalles en el mapa geológico de Valencia realizado por IGM (1979b).
- Formación Balzar (Plioceno) está compuesta por conglomerados bien estratificados (arena, limo y arcilla) como en las deposiciones de la formación Pichilingue, que pueden alcanzar hasta 300 metros de profundidad, situados al oeste y noroeste del área de estudio; se puede encontrar más información en los mapas geológicos realizado por Baldock (1982).
- Formación San Tadeo (Pleistoceno) florece en los mapas creados por Baldock (1982), y se compone de piroclastos, conglomerados volcánicos, material lahárico y capas o terrazas de flujos de lodo situadas al norte de la cuenca, contiguo a "El Carmen". Reyes y Michaud (2012) también proporcionan mapas detallados de esta formación, que consiste en lodolitas masivas, poco consolidadas, de color marrón amarillento, combinadas en la formación Balzar, alejadas de la cuenca del río Guayas. Cabe mencionar que dicha información geológicas no se encuentra publicada en las cartas del IGM.
- Formación Pichilingue (Cuaternario) está formada por terrazas indiferenciadas compuestas de arcilla y arena, que son el resultado del proceso erosivo en la cadena montañosa de los Andes en el Pleistoceno. Esto se detalla en los mapas geológicos de Quevedo (1979a), Valencia (1979b) y El Empalme (1979c) elaborados por el IGM. Además, Baldock (1982) determina el mismo nombre a estas “terraza indiferenciada”, y señala

como cubiertas en parte por aluvión tardío, que pueden alcanzar una profundidad de hasta 3 kilómetros desde la parte central de la cuenca del río Guayas.

- Depósitos aluviales (Cuaternario) fueron constituidos durante la Holocena y potencialmente compuestos por arena, limo y arcilla. Información detallada en la carta geológica de Quevedo (1979a), Valencia (1979b) y El Empalme (1979c) elaboradas por el IGM.

2.3.1 Geomorfología local

Según los mapas morfopedológicos de Quevedo elaborados por MAG (1983) y la información hidrogeológica nacional del MAGAP (2005), se puede deducir las geoformas del sector:

- La forma de relieve conocida como “cono o abanico aluvial” está compuesta por cúmulos de canto rodado, aluvión pétreo, materia volcánica y recientes capas piroclástica. Esta zona presenta superficies planas a ligeramente onduladas, en conjunto con cauce estrecho y poco profundo.
- La “vieja llanura de deposición” está constituida por granulometrías gruesas con escasa compactación (arenas y areniscas), y texturas fragmentales, porfiríticas, además de rocas ígnea volcánica que a veces están parcialmente cubierto por material volcánico reciente. El relieve muestra superficies con cumbres redondeadas y gradientes predominantes, cauce estrecho y ligeramente profundo, así como áreas regulares a levemente irregulares, todas ellas con signos de erosión.
- Los “valles fluviales” están compuestos por depósitos aluviales de diversas texturas, en algunos casos tapados por colada piroclástica. Las geoformas orográficas percibidas son terrazas o plataformas remanentes suspendidas a intermedias no diferenciadas, meandriformes, llanura aluvial, donde un largo periodo anual pasan inundados.
- Los “valle de inundación” se han originado a través de depósitos aluviales de diversas texturas. El relieve resultante muestra llanos regulares e irregulares donde posiblemente el agua ha contribuido en su formación, siendo un producto de la morfogénesis hídrica.

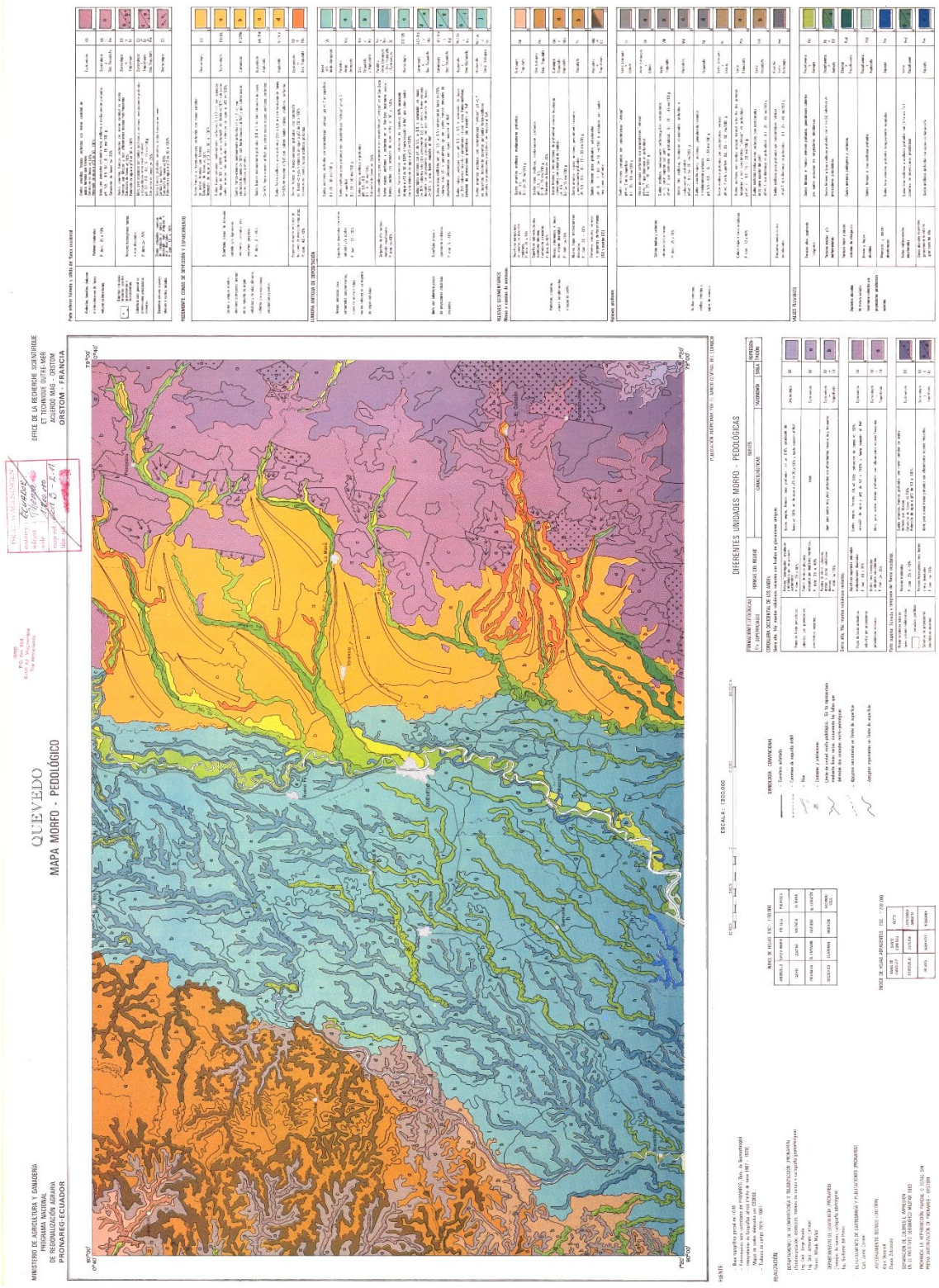


Figura 5. *Mapa Morfo - Pedológico*

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería (1983)

2.4 Características hidrogeomorfológicas de cuencas

La fisiografía de una cuenca hidrográfica permite inferir preliminarmente en el comportamiento hidrológico y sus estimaciones (Klohm y Stanescu, 1970). Estos valores se obtienen mediante los datos la geográficos del área de interés (Gaspari et al., 2010). La morfometría consiente en determinar los parámetros relativos a la forma de una hoya hidrográfica, es decir, precisar su situación actual desde información geométrica de las características físicas, y se obtiene mediante estimaciones de superficie, relieve e hidrografía (Aguirre, 2007). Dicho estudio morfológico de la forma y estructura terrestre de las variables lineales (superficie, relieve y drenaje), permitiendo interpretar la funcionalidad hidrológica para establecer potenciales estrategias de gestión (Gaspari, 2012). La geomorfología fluvial de cuencas consiente en estudiar la orografía y geoforma producido por modeladores naturales, para este caso modelador hídrico, u otros procesos de erosión, transporte y sedimentación, permitiendo determinar el comportamiento hidrológico ante eventos climatológicos (Werritty, 1997).

La hidrogeomorfología proporciona una información hidrológica del régimen, geológica de la cuenca y morfológica de su arroyo, siendo muy útil para la planificación, ingeniería y potencial restauración fluvial (Danés, 2005). La deidad fluvial es esencial en la comprensión del ciclo hídrico, así como su valor ecológico, paisajístico y climático. De ser necesario preservar un cuerpo de agua como parte fundamental de los servicios ecosistémicos o simplemente para corredor de conservación en un espacio, es necesario cuidar en primer lugar la omnipotencia hidroclimática y geomorfológica. Esto es fundamental, ya que garantiza la interconexión y correcto funcionamiento de todos los factores que influyen en el medio de manera directa e indirecta (Ollero, Ballarín y Mora, 2009). Un análisis completo de una cuenca a través del estudio hidroclimático y geomorfológico del medio fluvial es crucial para establecer su calidad y cantidad, además de predecir las tendencias futuras. Esto es así, ya que permite identificar el estado biofísico de la cuenca y, por lo tanto, entender su situación actual y futura (Ollero et al., 2007).

En un estudio realizado en la región costa del Ecuador por el INAMHI (2009) se basó estrictamente en la hidrogeoquímica del agua y su relación con las rocas. Cuya metodología fue el muestreo de agua subterránea, particularmente pozos. Concluyeron que el acuífero principal procede de depósitos volcánicos como las sedimentaciones fluvioarenosas; La composición de la litología se compone con materiales residuales que provienen del proceso de erosión y acumulación de materiales detríticos, encontrados mayormente en las zonas altas; estos materiales tienen una granulometría heterogénea. Verdugo Cárdenas (2017) realizó un análisis morfométrico de la "microcuenca del bosque protector Aguarongo" y de la "cuenca del Paute", provincia del Azuay. Se aplicaron modelos morfométricos como *Hydrologic Modeling* de ERDAS, el cual permitió determinar drenajes, delimitaciones de microcuencas y morfología. El estudio empleó cartografía a escala 1:50,000 y MDT de 3 metros de resolución espacial, para generar parámetros relativos a la forma.

A continuación, parámetros hidrogeomorfológicos concernientes al drenaje:

2.4.1 Parámetros relativos a la forma

En hidrología, el área "A" se refiere a la superficie calculada (ver Tabla 3) sobre un plano horizontal que lo define un parteaguas y que drena en un sistema dirigido hacia un cauce natural (Campos, 1998); el perímetro "P" se refiere a la longitud lineal el mismo parteaguas que delimitada y confina al contorno de la cuenca hidrográfica; la longitud axial o máxima de la cuenca "Lm" se define como la distancia del curso hídrico principal que se ubica desde la desembocadura de la cuenca (aguas abajo) hasta donde inicia la disposición natural de dicho cauce principal (aguas arriba), también conocido como el eje de la cuenca. Por último, el ancho de la cuenca "B" se describe como la fracción del área para la longitud del cauce principal "Lc" (Gaspari et al., 2010). El Instituto Ecuatoriano Forestal y de Áreas Naturales (INEFAN,1995) propuso una clasificación para las cuencas hidrográficas del Ecuador en función al área (ver Tabla 4):

Tabla 3. *Clasificación para las cuencas según su tamaño*

Descripción	Área	
Muy pequeña	< 25 km²	< 2,500 hectáreas
Pequeña	25 - 250 km²	2,500 - 25,000 hectáreas
Intermedia pequeña	250 - 500 km²	25,001 - 50,000 hectáreas
Intermedia grande	500 - 2,500 km²	50,001 - 250,000 hectáreas
Grande	2,500 - 5,000 km²	250,000 - 500,000 hectáreas
Muy grande	> 5,000 km²	> 500,000 hectáreas

Fuente: Campos (1998)

Tabla 4. *Clasificación para las cuencas hidrográficas del Ecuador*

Categoría	Área	
Minicuenca o quebrada	< 40 km²	< 4,000 hectáreas
Microcuenca	40 - 150 km²	4,000 - 15,000 hectáreas
Subcuenca	150 - 1,000 km²	15,001 - 100,000 hectáreas
Cuenca hidrográfica	1,000 - 3,000 km²	100,001 - 300,000 hectáreas
Sistema hidrográfico	> 3,000 km²	> 300,000 hectáreas

Fuente: INEFAN (1995)

Martonne (1940) propuso el Coeficiente de masividad “Cm” (ver Ecuación 1), el cual es la relación entre la altura o cota media “Hmed” de la cuenca (que se obtiene a partir de la diferencia de la cota mayor “Hmax” en metros, con la cota menor “Hmin”) y el área de dicha cuenca “A” en kilómetros cuadrados (ver Tabla 5); lo que puede tener implicaciones en la hidrología y en el comportamiento del flujo de agua en la cuenca (Breña y Jacobo, 2013).

[1]. *Coeficiente de masividad por Martonne*

$$\mathrm{Cm} = \frac{\mathrm{Hmed}}{\mathrm{A}}$$

En la Tabla 5 se interpreta el valor del Coeficiente de masividad por Martonne:

Tabla 5. *Rangos del Coeficiente de masividad por Martonne*

Valor Cm	Interpretación de la masividad
< 35	Muy montañosa
35 - 70	Montañosa
> 70	Moderadamente montañosa

Fuente: Campos (1998)

El Coeficiente de pasividad “Cp” (ver Ecuación 2) está representada por una fórmula trigonométrica, como lo es la tangente del Coeficiente de masividad “Cm” (la tangente de un ángulo en trigonometría se calcula como el cociente entre el cateto opuesto y el cateto adyacente en un triángulo rectángulo), dichos índice de pasividad relaciona el porcentaje de la superficie de la curva situado por encima de una altitud dada y el porcentaje de altitud situado por encima de un nivel de base escogido, cuyo resultado es un valor en grados (Martonne, 1940).

[2]. *Coeficiente de pasividad por Martonne*

$$\mathrm{Cp} = \tan(\mathrm{Cm})$$

Martonne (1940) propuso el Coeficiente orográfico “Co” (ver Ecuación 3), la cual combina dos variables esenciales del relieve: la altura o cota media de la cuenca “Hmed” (que influye sobre la energía potencial del agua); por la gradiente media de la cuenca, representado como Coeficiente de pasividad “Cp” (la cual ejerce una acción sobre la escorrentía cuyo efecto completa las producidas por las precipitaciones). El resultado en porcentaje (%) se puede interpretar con los rangos de pendiente media por Strahler (ver Tabla 6).

[3]. *Coeficiente orográfico por Martonne*

$$\mathrm{Co} = (\mathrm{Hmed})(\mathrm{Cp}) = \mathrm{Radián}(\mathrm{Hmed}^2/\mathrm{A})$$

Pendiente promedio de la corriente “S” se obtiene a partir de la diferencia de la cota mayor “Hmax” con la cota menor “Hmin” (Hmax - Hmin = Hmed), y se divide para la distancia del curso principal “Lc”, cuyo resultado es absoluto y representa el desnivel altitudinal de la cuenca “H”. También se puede presentar de manera

porcentual el resultado, al multiplicarlo por 100 (Strahler, 1957). La rapidez del agua en los cauces de la hoya hídrica dependerá de la inclinación del terreno, tal como se aprecia en la Tabla 6 (Gaspari et al., 2010).

[4]. *Pendiente promedio de la corriente*

$$S = \frac{Hmed}{Lc}$$

Tabla 6. *Rangos de pendiente media por Strahler*

Pendiente	Tipología de la pendiente del terreno
< 0.50%	Muy plano
0.50% - 1.00%	plano
1.01% - 3.00%	Suave
3.01% - 12.00%	Accidentado medio
12.01% - 20.00%	Accidentado
20.01% - 50.00%	Fuerte accidentado
50.01% - 75.00%	Escarpado
> 75.00%	Muy escarpado

Fuente: Strahler (1957)

Schumm (1956) propuso el coeficiente de sinuosidad hidráulico “Sh” para conocer la potencia de operación directa a lo largo de un canal: Más torsión es generalmente usual en canales con bajo porcentaje de inclinación; y Menos torsión es generalmente normal en canales con alto porcentaje de inclinación, lo que provocaría una mayor fuerza erosiva.

[5]. *Coeficiente de sinuosidad hidráulico por Schumm*

$$Sh = \frac{Lm}{Lc}$$

Con el índice de sinuosidad se puede deducir si un cauce es rectilíneo con un valor < 1.5, o meándrico con un valor > 1.5 (Mueller, 1968). En la Tabla 5 se detalla el tipo de canal a través del coeficiente de sinuosidad (Schumm, 1956).

Tabla 7. *Índice de sinuosidad hidráulico por Schumm*

Índice	Tipo de canal
< 1.20	Canal rectilíneo
1.20 - 1.50	Canal transicional
1.51 - 1.70	Canal regular
1.71 - 2.10	Canal irregular
> 2.10	Canal meándrico

Fuente: Schumm (1956)

Schumm (1956) elaboró una fórmula para calcular la relación de elongación “Re” (ver Tabla 8). Es importante este factor porque se correlaciona con la geoforma, y determinándose con el doble del radio de una circunferencia con la misma área de captación, para la distancia del curso máximo (Sala y Gay, 1981).

[6]. *Relación de elongación por Schumm*

$$\mathrm{Re} = 1.1284\left(\frac{\sqrt{\mathrm{A}}}{\mathrm{Lm}}\right)$$

Tabla 8. *Rangos para la relación de elongación por Schumm*

Valor Kc	Forma de la cuenca
< 0.50	Fuerte relieve y pendiente pronunciada
0.50 - 0.80	Cuenca plana con porciones accidentales
> 0.80	Relieve bajo

Fuente: Schumm (1956)

Guevara y Cartaya (1991) expresa que los parámetros de perímetro “P” y área “A” permiten obtener matemáticamente el factor de compresión por gravelius “Kc” (Tabla 9), por lo cual permite caracterizar la forma de la cuenca (Burbano, 1989) relacionándose con el tiempo de concentración “Tc” (Yaguachi, 2013).

[7]. *Coeficiente de compacidad por gravelius*

$$\mathrm{Kc} = \frac{\mathrm{P}}{2\sqrt{(\pi)(\mathrm{A})}}$$

Tabla 9. *Rangos del coeficiente de compacidad por gravelius*

Valor Kc	Forma de la cuenca	Potencial a crecidas
< 1.25	Redonda	Muy alta
1.25 - 1.50	Oval redonda	Alta
1.51 - 1.75	Ovalada oblonga	Moderado
> 1.75	Oblonga rectangular	Baja

Fuente: Gravelius (1914)

Kc = 1.6	Kc = 1.3	Kc = 1.2	Kc = 1.1

Figura 6. *Forma del coeficiente de compacidad por gravelius*

Fuente: Musy (2001)

Miller (1953) planteo una relación de circularidad “Cc” (ver Ecuación 8) el cual relaciona la superficie con una circunferencia equivalente al contorno de la hoya. El índice oscila entre cero y uno, cuyo valor 1 es para una cuenca circular, 0.785 para una cuenca cuadrada y < 0.785 se relaciona con cuencas alargadas.

[8]. *Relación de circularidad por Miller*

$$\mathrm{Cc} = 4\boldsymbol{\pi}\left(\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{P}^2}\right)$$

Tabla 10. *Rangos de la relación de circularidad por Miller*

Valor Kc	Forma de la cuenca	Caudal medio	Potencial a crecidas
< 0.25	Oblonga rectangular	Muy alta	Baja
0.25 - 0.50	Ovalada oblonga	Alta	Moderado
0.51 - 0.75	Oval redonda	Moderado	Alta
> 0.75	Redonda	Baja	Muy alta

Fuente: Miller (1953)

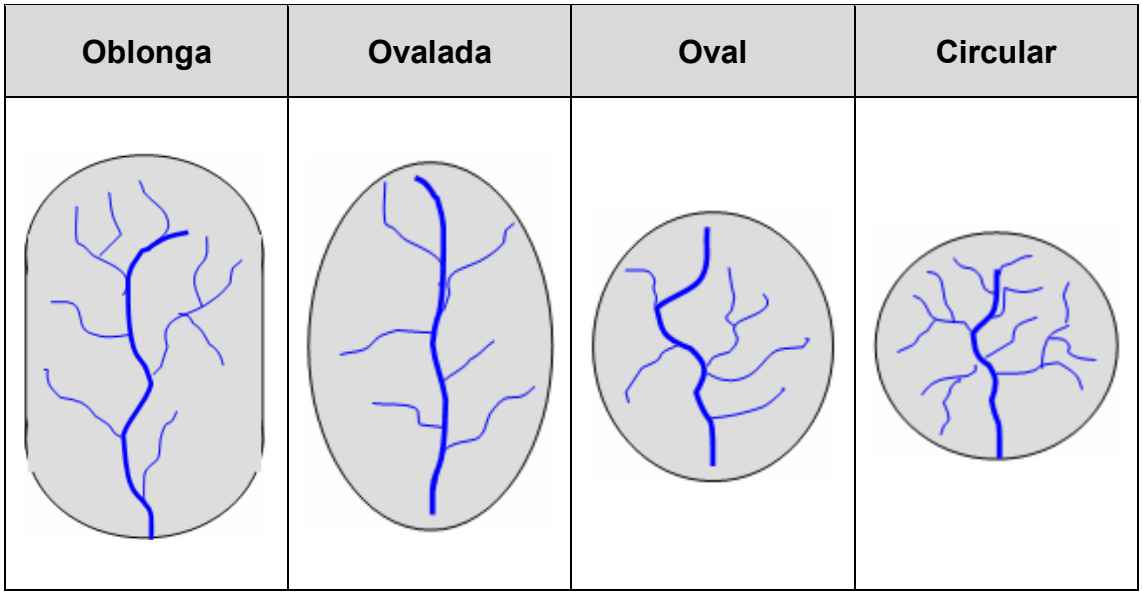


Figura 7. *Forma de la cuenca según la relación de circularidad*

Fuente: Miller (1953)

Fierro y Jiménez (2011) indican que el coeficiente o factor de forma adimensional por Horton “Kf” (ver Ecuación 9) se puede describir como un indicador que delimita la forma geométrica de una cuenca y su capacidad para ser más alargada o redonda. Este indicador permite estimar la rapidez del agua encausada al tributario principal de la hoya, basándose en la correlación del área “A” y la longitud máxima del tributario principal “Lm” (ver Tabla 11).

[9]. *Factor de forma adimensional por Horton*

$$\mathrm{Kf} = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{Lm}^2}$$

Tabla 11. *Rangos del factor de forma adimensional por Horton*

Valor Kf	Forma de la cuenca	Caudal medio	Potencial a crecidas
< 0.25	Estrecha	Muy alta	Baja
0.25 - 0.50	Alargada	Alta	Moderado
0.51 - 0.75	Amplia	Moderado	Alta
> 0.75	Ancha	Baja	Muy alta

Fuente: Horton (1945)

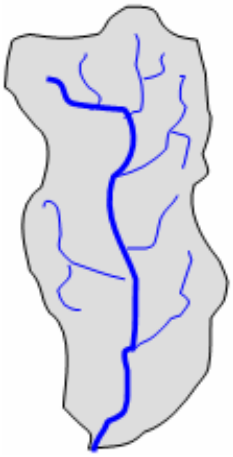
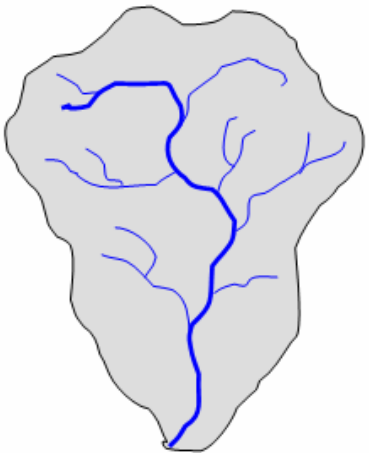
Estrecha	Alargada	Amplia	Ancha
			

Figura 8. *Factor de forma adimensional por Horton*

Fuente: Horton (1945)

Gaspari et al. (2010) interpreta que un coeficiente de forma “Kf” moderado “≤0.65” indica que está menos sujeta a crecidas, a diferencia de una que posee la misma área, pero con mayor valor (ver Tabla 12). Un coeficiente de forma alto “≥0.66” proporciona el grado de achatamiento corto del río principal y por consiguiente tiene una propensión a acumular el flujo de agua durante una lluvia fuerte, lo que puede dar lugar rápidamente a inundaciones importantes.

Tabla 12. *Rangos de factor de forma de la cuenca por Gaspari*

Valor Kf	Forma de la cuenca	Caudal medio	Potencial a crecidas
< 0.20	Muy alargada	Muy alta	Baja
0.20 - 0.35	Alargada	Muy alta	Baja
0.36 - 0.50	Ligeramente alargada	Alta	Moderado
0.51 - 0.65	Ni alargada ni ensanchada	Alta	Moderado
0.66 - 0.80	Ligeramente ensanchada	Moderado	Alta
0.81 - 0.95	Ensanchada	Moderado	Alta
0.96 - 1.10	Muy ensanchada	Baja	Muy alta
> 1.10	Rodeando el drenaje	Baja	Muy alta

Fuente: Gaspari et al. (2010)

La forma de la cuenca influye directamente sobre el caudal de salida “Q” y el tiempo de concentración “Tc” (ver Figura 9).

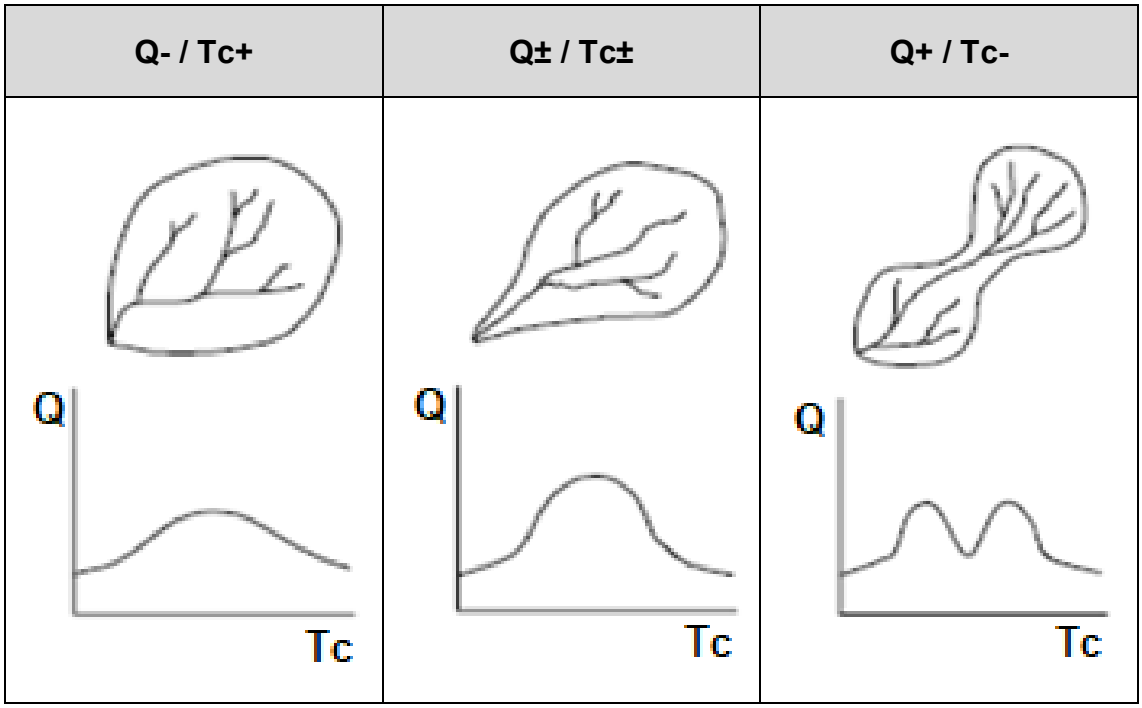


Figura 9. *Factor de forma de la cuenca por Gaspari*

Fuente: Gaspari et al. (2010)

Izzard (1946) define al “Tc” como el mayor tiempo requerido para escurrir superficialmente el agua, a partir de cualquier lugar en la hoya, para conseguir manar de la misma. Refiriéndose al periodo transcurrido a partir de que el punto más lejano en la cuenca comienza por generar escorrentía superficial hasta que alcanza su punto de salida, en forma simultánea (Sharifi y Hosseini, 2011).

Viessmann, Knapp, Lewis y Harbaugh (1977) indica que el “Tc” es el tiempo final (valor final) comprendido entre la precipitación efectiva y la escorrentía superficial. Corroborado por Témez (1991) quien señala que el “Tc” es la disparidad entre el momento en que finaliza el escurrimiento superficial directo y la precipitación efectiva, medidos a través del hidrograma.

Pasado el “Tc” se cree que integralmente la hoya contribuyó en la descarga. La duración de la tempestad es inversamente proporcional a la intensidad de dicha tempestad (>duración, <intensidad). Donde, el tiempo crítico, sería “Tc”, ya que es el punto en el que esta relación se cumple. El verdadero “Tc” proviene de varios componentes como la geoforma (cuenca alargada o rectangular posee mayor “Tc”), pendiente (mayor declive origina escorrentía acelerada con menor “Tc”), área (características edáficas y cobertura vegetal), etcétera (MTC, 2008).

Monsalve (1999) sostiene que existen muchas ecuaciones empíricas clásicas para determinar del tiempo de concentración (ver Tabla 13). Para el Tc (medido en horas) se pueden emplear diferentes fórmulas, que necesitan de parámetros propios de la hoya: Distancia del curso principal “Lc” (km); inclinación promedio del curso “S” (m/m) o “*S*” (%)”; diferencia entre la mayor y menor altura del área “H” (msnm); superficie de la hoya “A” (km²). Es recomendable el uso de varias ecuaciones con el respectivo promedio, ya que las estimaciones fueron investigadas para condiciones distintas a la zona de estudio. Témez (1991) recomienda que los Tc deben estar entre 0.25 y 24 horas. Y Vélez (2011) indica que teóricamente los rangos deberían ser: rápido (< 8 horas), moderado (8 - 16 horas), lento (> 16 horas). A continuación, se aprecian varias ecuaciones para estimar el tiempo de concentración por diversos investigadores:

Tabla 13. *Cálculo del tiempo de concentración*

[10]. *Tc por Kirpich* $\mathrm{Tc} = 0.06628\left[\frac{(\mathrm{Lc})}{\sqrt{(\mathrm{S})}}\right]^{0.77}$	Kirpich (1940) elaboró la ecuación aplicable a cuencas con áreas de 1 a 3000 km². Esta se basó en datos del Servicio de Conservación de Suelos "SCS", de 7 cuencas rurales en Tennessee y Pensilvania (EEUU), que tenían pendientes elevadas (de 3 a 10%) y canales claramente determinados.
[11]. *Tc por SCS* $\mathrm{Tc} = \left[\frac{(0.871)(\mathrm{Lc})^3}{(\mathrm{H})}\right]^{0.385}$	California Culvert Practice (1955) fundamentalmente derivó la ecuación de Kirpich, para desarrollar la ecuación que inicialmente se aplicó a pequeñas cuencas montañosas en California.
[12]. *Tc por CHPW* $\mathrm{Tc} = 0.95\left[\frac{(\mathrm{Lc})^3}{(\mathrm{H})}\right]^{0.385}$	Kirpich (1940) Fórmula de "California highways and Public Works" (Kirpich) para cuencas cuya área sea superior a 200 ha. Basado en el Método de SCS - California.
[13]. *Tc por Témez* $\mathrm{Tc} = 0.3\left[\frac{\mathrm{Lc}}{(\mathrm{S})^{0.25}}\right]^{0.76}$	Témez (1978) desarrolló la ecuación después del análisis a diversas cuencas españolas, cuyo fundamento fue considerar la longitud del cauce principal y la gradiente. Además, la recomendación es que se aplique a pequeñas cuencas rurales de hasta 200 km².
[14]. *Tc por Valencia y Zuluaga* $\mathrm{Tc} = \left[\frac{(1.7694)(\mathrm{A}^{0.325})}{(\mathrm{Lc}^{0.096})(S^{0.290})}\right]$	Valencia y Zuluaga (1981) proponen una ecuación para Antioquia, Colombia, la cual posee una buena aproximación, posiblemente se deba a que analiza tres variables (área, longitud del cauce principal y su pendiente).
[15]. *Tc por Chow* $\mathrm{Tc} = 0.0195\left[\frac{(\mathrm{Lc})^3}{(\mathrm{H})}\right]^{0.385}$	Chow (1964) propuso una ecuación en función de la estimación del flujo superficial el cual según él dura de 30 a 50 metros, por las irregularidades topográficas del terreno tiende a agrupar flujos en tributarios menores, que posteriormente se concentraran para formar cauces principales.

Fuente: Vélez (2011)

2.4.2 Parámetros relativos al relieve

El parámetro más importante del relieve es la curva hipsométrica, ya que indica el potencial evolutivo inherente a la cuenca hidrográfica, obtenida a través de la distribución proporcional del área de la hoya en función a la altura sobre el nivel del mar (Gaspari et al., 2010).

La superficie concerniente es la porción porcentual de la superficie (a/A), del cual se toma el porcentaje de área acumulada para graficar; mientras que la altura relativa es la fracción de las cotas (H), del cual se toma el promedio para graficar (Quezada, Cerda y Jensen, 2010).

Su relación hipsométrica, también, se asocia con los ciclos evolutivos de la cuenca “edad de los ríos” (ver Figura 10), donde: curva A (<1) “Río Joven” es una cuenca erosiva; curva B (=1) “Río maduro” es una hoya equilibrada; curva C (>1) “Río viejo” es una hoya sedimentaria (Campos, 1992).

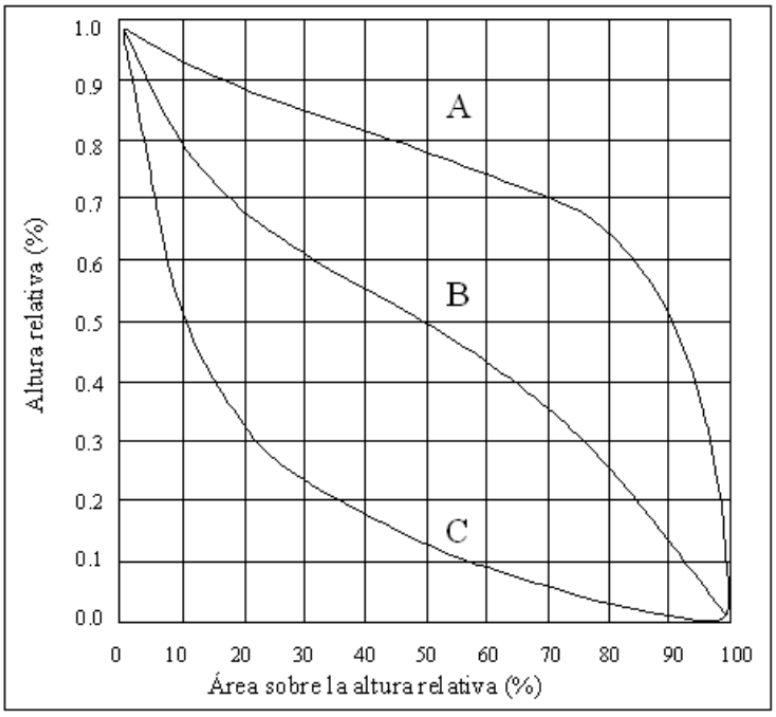


Figura 10. *Ciclo evolutivo de la cuenca*

Fuente: Strahler (1952) y Campos (1992)

2.4.3 Parámetros relativos a la red de drenaje

Debido a la gran diversidad que existe en los sistemas fluviales, se han propuesto varias clasificaciones para lograr una comprensión más completa de sus patrones naturales (Beltrán, 2010).

Gaspari et al. (2010) destaca el proceso de ordenamiento de redes de drenaje consiste en establecer una jerarquía entre las cuencas hidrográficas basándose en la cantidad de ramificaciones que tienen. Si comparamos dos cuencas de tamaño similar y una de ellas tiene más ramificaciones que la otra, esto sugiere que la primera tiene un mayor riesgo de erosión, transporte de sedimentos y escurrimiento directo.

Es posible utilizar los juicios definidos por Horton (1945), Schumm (1956) y Strahler (1957) para establecer el número de orden en una red (Burbano, 1989).

Horton (1945) indica que la confluencia de cauces hídricos constituye a una red natural en una hoya hidrográfica, del cual ha establecido un sistema de clasificación según la jerarquía, llamado “orden de río”. Considera que todo afluente inicial es de orden 1 “u”, pero cuando hay una confluencia, el afluente más largo toma el siguiente orden inmediato superior “u+1” y conserva este orden hasta que exista otra confluencia. Pero sigue siendo necesario en varios momentos alterar la disposición adjudicada inicialmente a diferentes cursos.

Schumm (1956) y Strahler (1964) coinciden en que el orden 1, son los ríos que no tienen afluentes y por ende se les asigna dicho orden inicial; Cuando dos ríos de orden UNO se unen, constituyen el río de orden DOS; Si dos ríos de orden DOS se unen, forman el río de orden TRES y así repetidamente; Si dos ríos de diferente orden se unen, el río resultante mantiene el orden del río de mayor orden. Según Gaspari et al. (2010) la diferencia con Horton radica en que, a partir de las confluencias, los tributarios mayores se apropian del curso menor, renombrando al cauce que siga dicho recorrido (ver Figura 11).

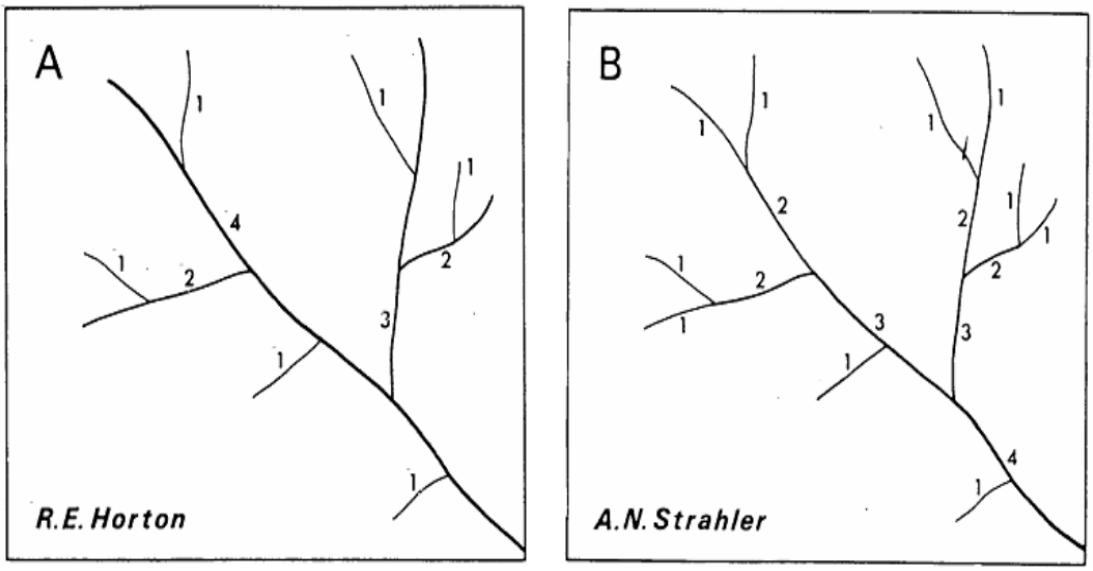


Figura 11. *Jerarquización de una red hidrográfica*

Fuente: Beltrán (2010)

Horton (1945) ha desarrollado un sistema para organizar las redes hidrográficas; A través de un análisis cuantitativo, se han descubierto patrones relacionados con la bifurcación y la densidad de drenaje, que están influenciados por factores geoecológicos. La clasificación de los canales del sistema de drenaje se basa en el procedimiento propuesto por Gravelius.

Strahler entre 1952 y 1957 estudió y mejoró la jerarquización de Horton, facilitando el modelo de organización por Horton - Strahler, esquema de clasificación más utilizado en la hidrología (Strahler, 1964). El estudio entre la relación del orden “Nu”, longitud “Lu” y área “A” establece la cimentación del estudio morfométrico de las redes de drenaje, denominándose Leyes de Horton a los primeros resultados empíricos sobre estas regularidades.

Según Horton (1945), la relación de bifurcación (conocida como “Rb”), es un indicador del sistema y su nivel de torrencialidad. El valor promedio de relación de bifurcación puede ser utilizado como una medida representativa de la cuenca. En cuencas uniformes, el valor de Rb tiende a mantenerse constante, generalmente entre 3 y 5.

La Ley de Horton establece que el número de ríos en cada orden disminuye gradualmente en una serie calculada; donde el primer valor de esta serie, es el tributario de menor orden y la Rb es el resultado final (Horton, 1945).

[16]. *Relación de bifurcación por Horton*

$$\mathrm{Rb} = \frac{\mathrm{Nu}}{\mathrm{Nu} + 1}$$

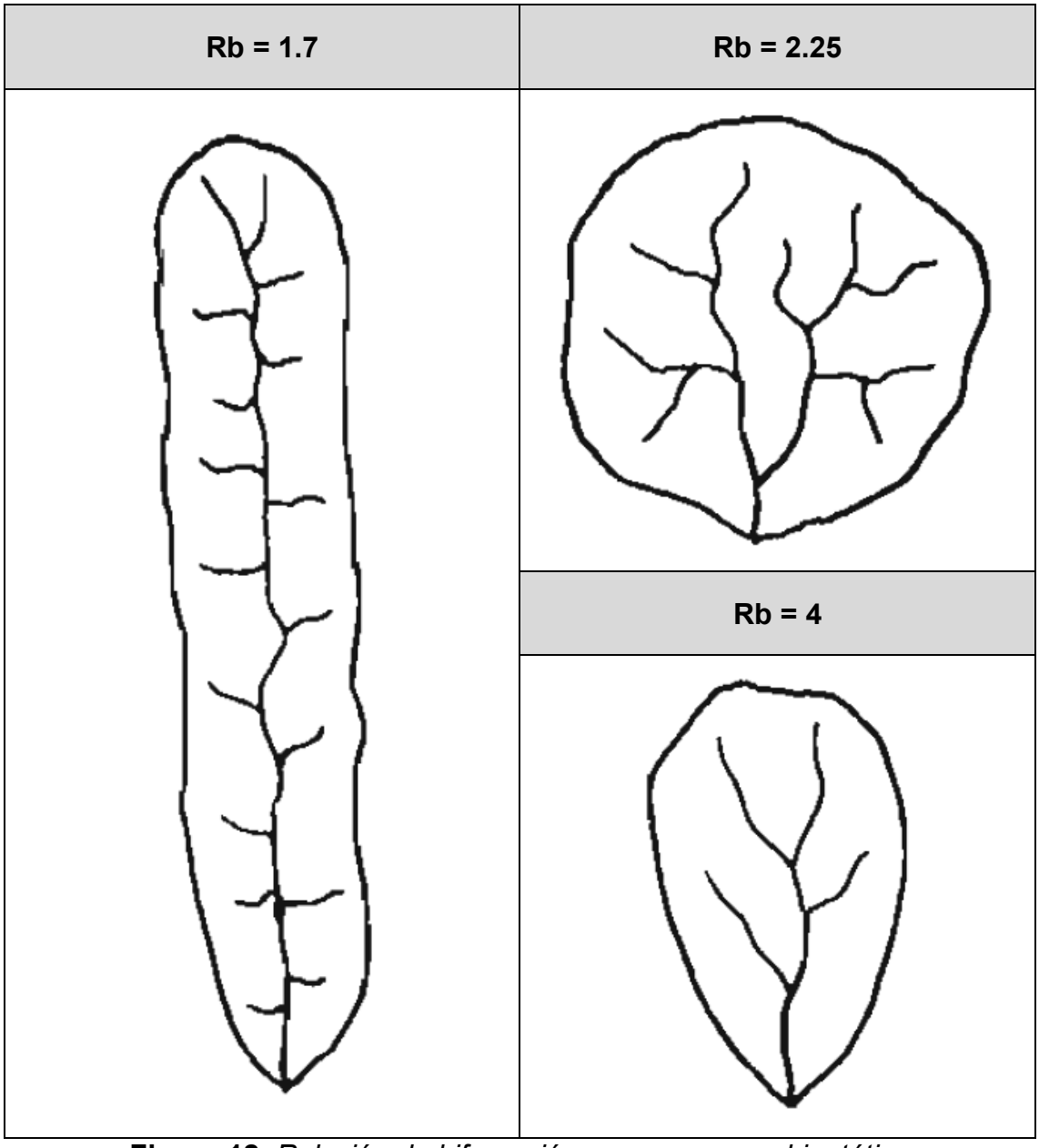


Figura 12. *Relación de bifurcación en una cuenca hipotética*

Fuente: Campos (1998)

Según Tricart (1965), la frecuencia de los ríos “Fu” (ver Ecuación 17), es un indicador de la textura del drenaje; Cuyo valor más relevante, es el correspondiente a los ríos de primer orden, ya que son estos los que tienen mayor capacidad erosiva.

[17]. *Frecuencia de cauces por Horton*

$$\mathrm{Fu} = \frac{\mathrm{Nu}}{\mathrm{A}}$$

Según Horton (1945), la densidad de drenaje “Dd” (ver Ecuación 18) es influenciada por las propiedades litológicas y estructurales de los materiales, especialmente su permeabilidad. Estos factores afectan la variedad y densidad vegetativa de la zona, además, son influenciados por las condiciones climáticas (Tabla 14). Las rocas blandas con baja permeabilidad y poca cobertura vegetal presentan las densidades de drenaje más altas, en zonas de precipitación intensa y espaciada.

[18]. *Densidad de drenaje por Horton*

$$\mathrm{Dd} = \frac{\Sigma \mathrm{L}}{\mathrm{A}}$$

A continuación, la interpretación de los valores de la de densidad de drenaje por Horton (ver Tabla 14):

Tabla 14. *Rangos de densidad de drenaje por Horton*

Valor Dd	Dd	Textura	Susceptibilidad a crecidas
< 1.00	Muy baja	Gruesa	Muy alta
1.00 - 2.00	Baja	Media G	Alta
2.01 - 3.00	Media	Media F	Media
> 3.00	Alta	Fina	Baja

Fuente: Horton (1945)

Strahler (1964) expresa que áreas con alta resistencia a la erosión, elevada permeabilidad del suelo y relieve poco pronunciado se asocian con valores bajos. Por otro lado, valores altos de "Dd" suelen estar relacionados con terrenos montañosos, suelos impermeables y poca cobertura vegetal (ver Figura 13).

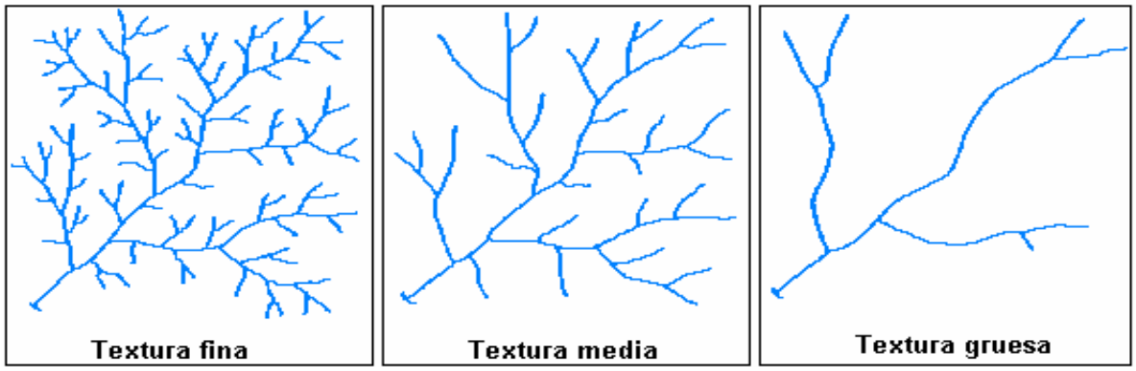


Figura 13. *Textura de drenaje*

Fuente: Strahler (1964)

Strahler (1964) indica que existen diferentes tipos de drenaje que reflejan interrelaciones biofísicas, pudiendo agruparse en cuatro usuales: dendrítico, paralelo, enrejado y rectangular (ver Figura 14).

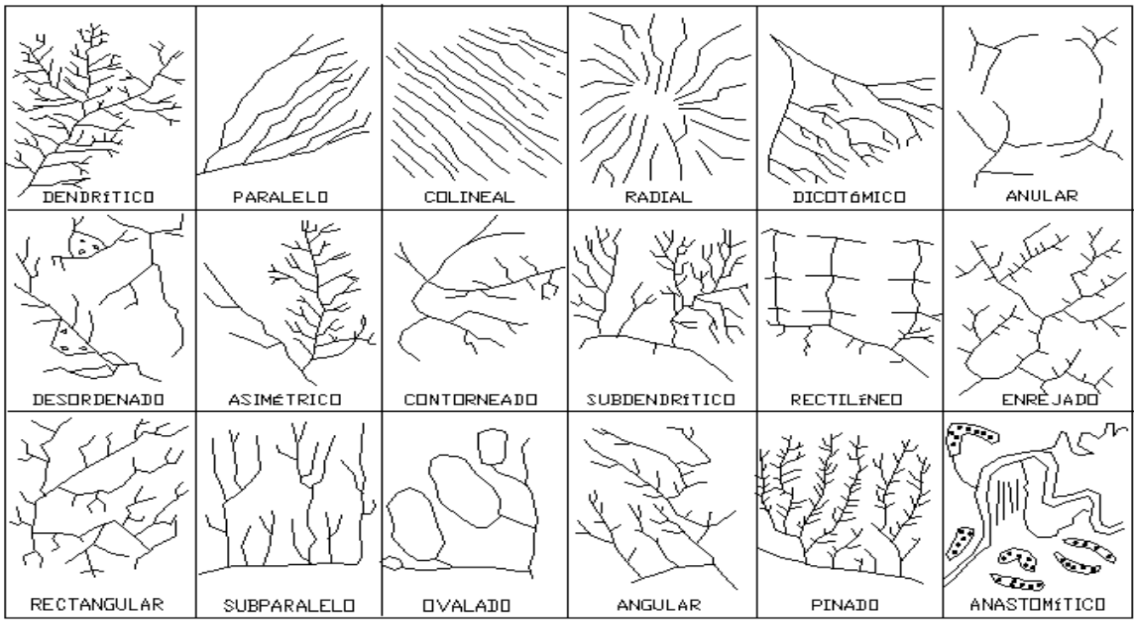


Figura 14. *Patrones de drenaje*

Fuente: Strahler (1964)

2.5 Hidrograma

Iglesias et al. (2021) indican que se denomina hidrograma, al gráfico que representa la evolución de los caudales que pasan por un punto de un río con el tiempo; siendo una curva con subidas y bajadas que representan las aportaciones por lluvia y los agotamientos en sequía (ver Figura 15).

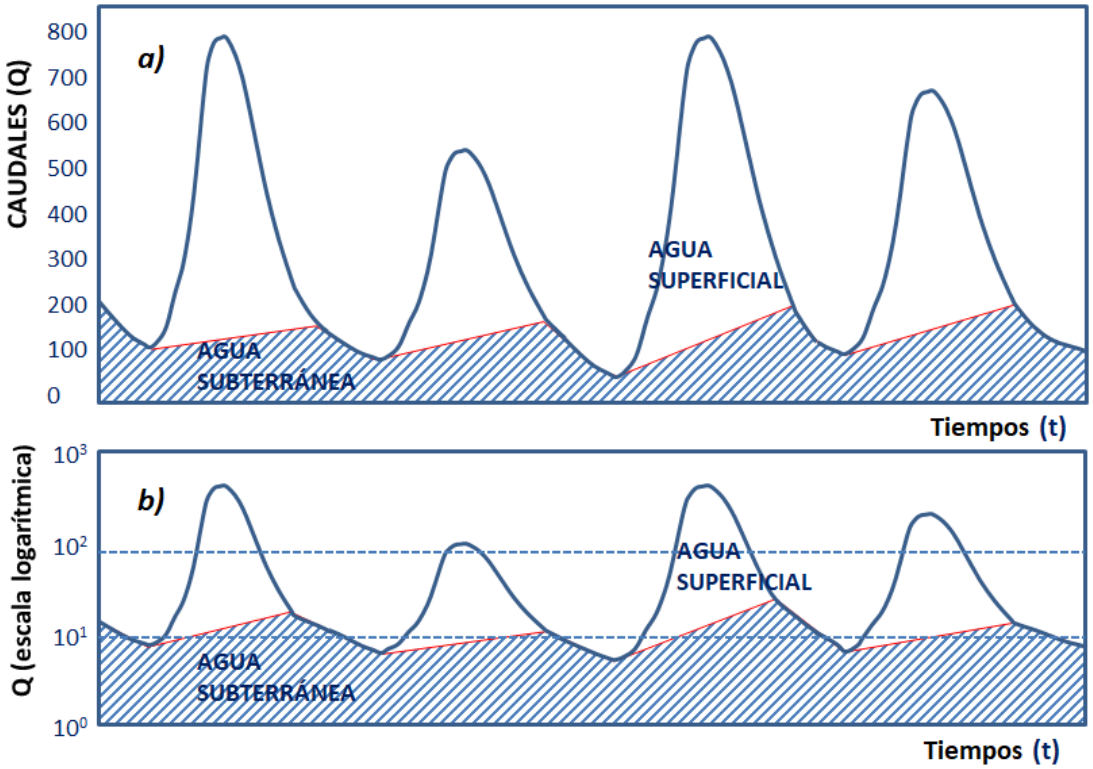


Figura 15. *Evolución de los caudales mediante un hidrograma*

Fuente: Musy (1998)

La parte a) es un hidrograma métrico o normal, mientras que en la parte b) se dibuja el mismo hidrograma, pero con el eje vertical de caudales en escala logarítmica. En esta última se aprecia, que los agotamientos son líneas rectas; luego cuando en los tramos de estío la curva toma una línea recta, a partir de ese punto empieza el periodo de agotamiento “en épocas sin lluvias, el agua que pasa por los ríos solo puede venir de lo que aporten las fuentes, dado que el agua de superficie ha escurrido con anterioridad” (Iglesias et al., 2021).

Musy (1998) enseña que la geoforma de una hoya hidrográfica repercute en la representación de su hidrograma característico. Por ejemplo: una cuenca en forma de abanico (Figura 16) presenta un menor tiempo de concentración y genera mayor caudal; a diferencia de una cuenca en forma alargada con la misma precipitación, genera un menor caudal de salida, ya que el tiempo de concentración es mayor.

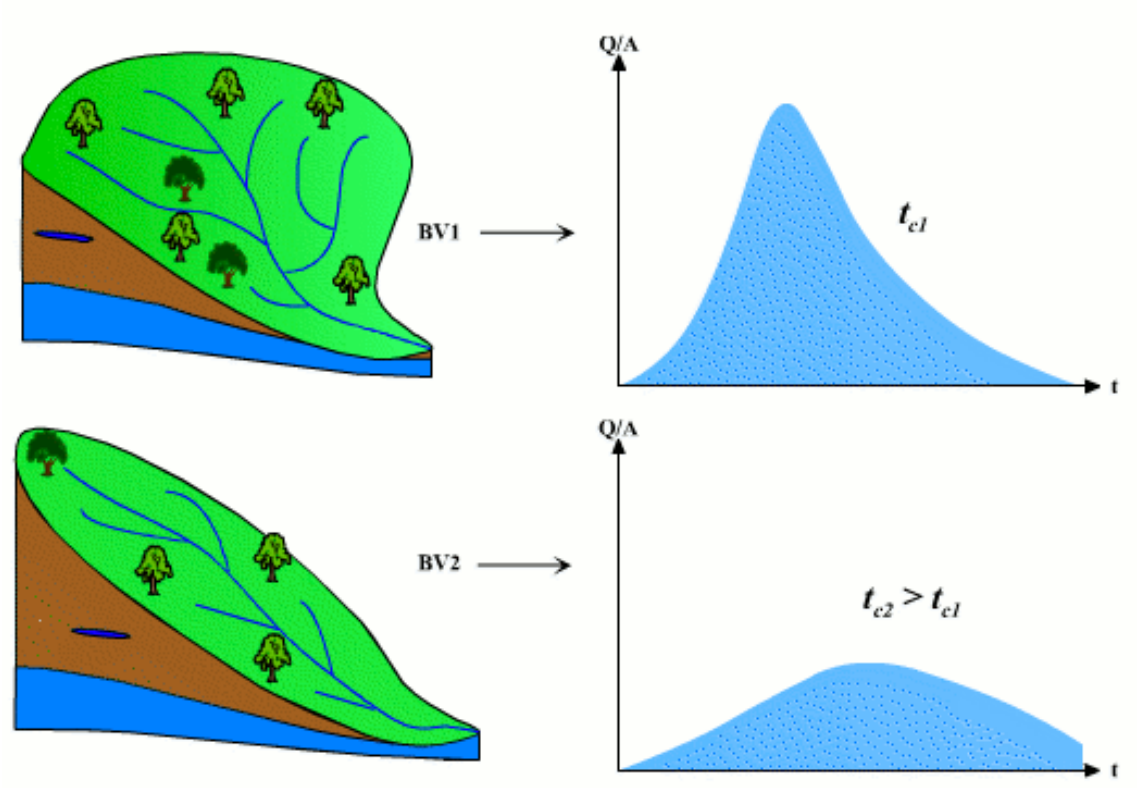


Figura 16. *Hidrograma característico según la forma de la cuenca*

Fuente: Musy (1998)

Sánchez (2022) proponen dos experimentos para el estudio: el primero se realizará en un canal rectangular en condiciones de laboratorio donde se producirán precipitaciones constantes y se medirá el caudal de salida del canal (ver Figura 16). Debido a que se tratará de una lluvia artificial de intensidad constante, el hietograma será uniforme. El hidrograma comenzará a aumentar desde el inicio de la precipitación (t_0), incrementando el caudal hasta que la primera gota caiga en el punto más alejado del canal, momento en que se llegará al caudal máximo (t_1). A partir de ese momento, el caudal se mantendrá constante (igual a la intensidad de la precipitación) hasta que la lluvia constante termine. En caso que la precipitación cese abruptamente en el instante t_2, el caudal disminuirá gradualmente a medida que la lámina de agua del canal se acerca a la salida. Finalmente, en el instante t_3, cuando la última gota de lluvia alcanza la salida la caudal se iguala a cero.

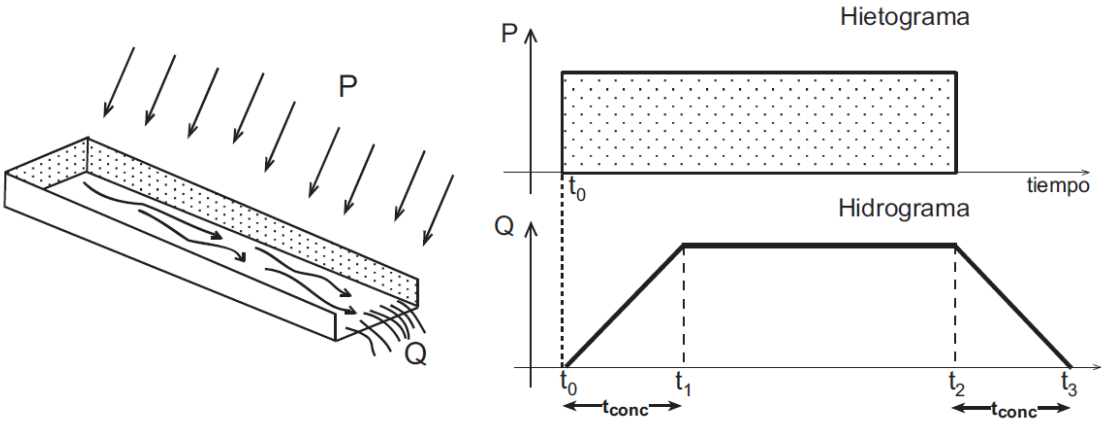


Figura 17. *Hietograma e hidrograma artificial*

Fuente: Sánchez (2022)

En el experimento anterior, el lapso de tiempo desde t_0 hasta t_1 es igual al período de t_2 hasta t_3. Este lapso de tiempo simboliza el tiempo que tardaría una gota de lluvia en alcanzar la salida desde el punto más alejado de la cuenca. En una cuenca hidrográfica real, esto se conoce como tiempo de concentración y es una medida importante en el análisis de la conducta hidrológica de una cuenca (Figura 15). A continuación, la ecuación t_b:

[19]. *Tiempo base*

$$t_b = t_p + t_c$$

Donde:

t_b = tiempo base del hidrograma

t_p = duración de la precipitación

t_c = tiempo de concentración

Sánchez (2022) nuevamente plantea (segundo experimento) repetir la experiencia con un recipiente de forma similar a la de una cuenca natural, el hidrograma obtenido sería con crecida real (ver Figura 18).

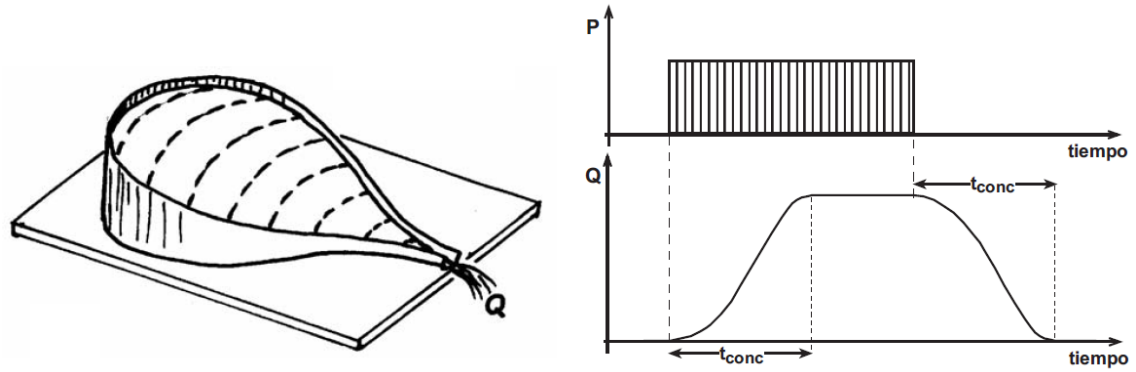


Figura 18. *Hietograma e hidrograma natural*

Fuente: Sánchez (2022)

En el modelo de la cuenca (ver Figura 16), las líneas de puntos (isócronas) situadas a la izquierda indican las áreas que tardan el mismo tiempo en llegar a la salida. Al inicio de la precipitación, en el primer intervalo de tiempo (Δt), el agua de la primera banda llega a la salida. En el segundo intervalo de tiempo, las aguas de la primera y segunda bandas llegan a la salida, y así sucesivamente hasta que, si la lluvia es prolongada, en el noveno intervalo de tiempo y los siguientes, llegará el agua de toda la cuenca. Si la precipitación cesase repentinamente, en el primer intervalo de tiempo faltaría en la salida el agua correspondiente a la primera banda, mientras que en los intervalos de tiempo anteriores se medirían las caídas de agua de las bandas primera y posteriores. En el segundo intervalo de tiempo faltarían las caídas de la primera y segunda bandas, y en el último hidrograma solo se contabilizaría el agua caída en la novena banda en el intervalo anterior al fin de la precipitación (Sánchez, 2022).

Una isócrona es una línea que une puntos dentro de una cuenca que comparten el mismo tiempo de llegada al punto de salida. Las líneas más lejanas al punto de salida corresponden al tiempo que le toma a toda la superficie de la hidrocuenca favorezca a la corriente hacia el sitio de salida posterior a una lluvia uniforme. Al trazar una red de isócronas, se puede obtener una comprensión parcial del comportamiento hidrológico de una cuenca y se puede establecer la importancia referente todas y cada una de sus subcuencas (Musy, 2001).

2.6 Distribuciones teóricas de probabilidad

Según Villón (2007), para seleccionar un modelo probabilístico adecuado que revele satisfactoriamente la conducta de una variable hidroclimática; el hidrólogo debe tener acceso a datos de precipitación, evapotranspiración, temperaturas y caudales, así como conocimiento del problema físico. En estas modelaciones, es necesario obtener las medidas y realizar una prueba de bondad de ajuste, como se muestra a continuación en el esquema de la Figura 19:

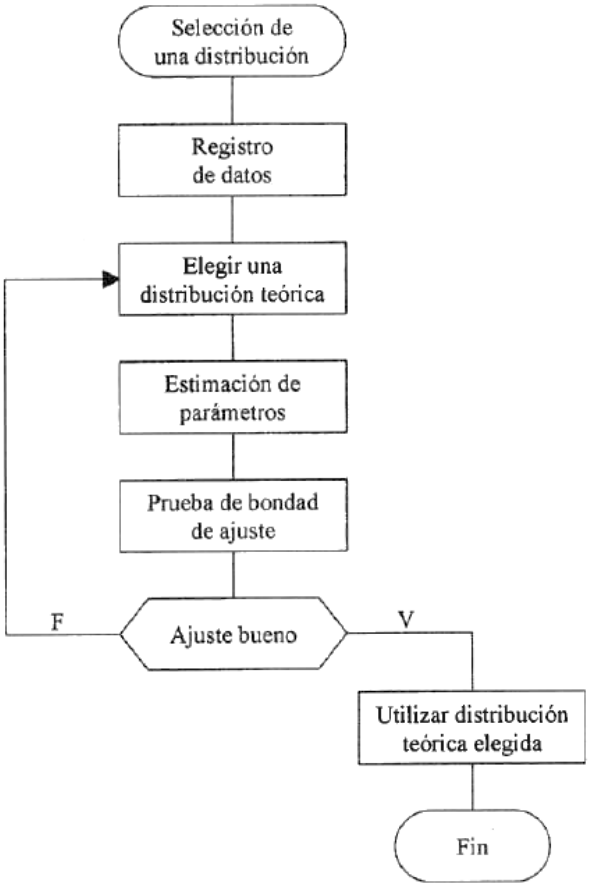


Figura 19. *Proceso de selección de una distribución teórica*

Fuente: Villón (2007)

Villón (2007) menciona sobre la prueba “bondad de ajuste”, la cual indica que es adecuado el modelo probabilístico elegido, pudiéndose usar para pronosticar con cierta posibilidad ocasional de un fenómeno hidrometeorológico con determinada magnitud o determinar su magnitud para una fase de ocurrencia específica. Algunas de las distribuciones hipotéticas frecuentemente usadas en hidrografía

son: la normal; log-normal de 2 o 3 parámetros; gamma de 2 o 3 parámetros; log-Pearson tipo III; Gumbel y log-Gumbel.

A continuación, se muestra gráficamente la función “densidad de la distribución normal estándar”, que es una función continua y simétrica con respecto a la media “$\overline{X}$” (Figura 20), así como la graficación de dicha función “densidad de la distribución normal estándar” (Figura 21):

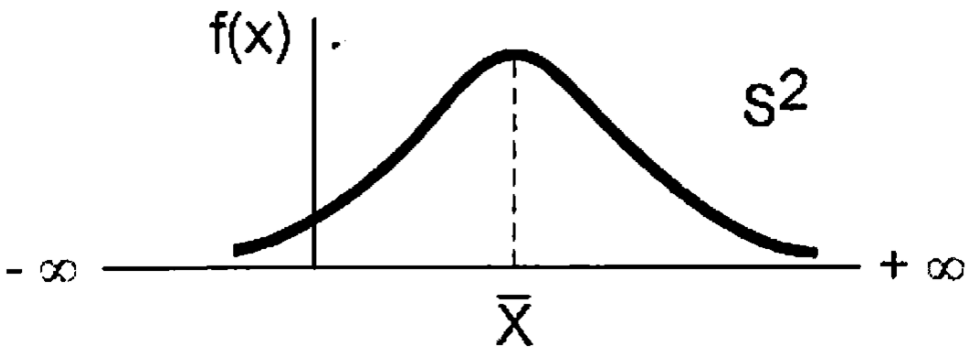


Figura 20. *Función densidad de la distribución normal*

Fuente: Villón (2007)

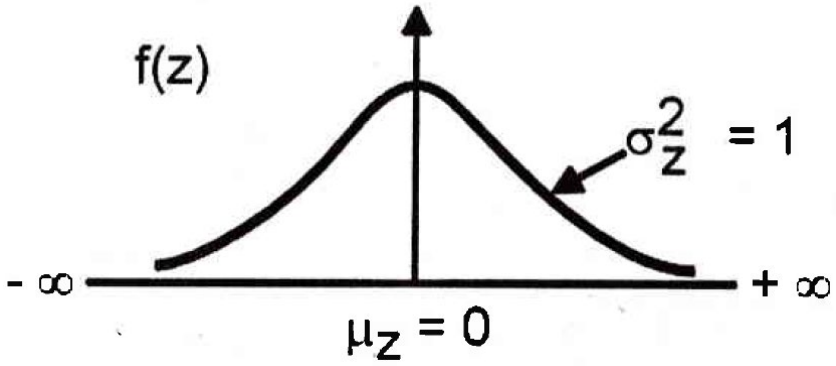


Figura 21. *Función densidad de la distribución normal estándar*

Fuente: Villón (2007)

Luego de haber definido la “DISTRIBUCIÓN TEÓRICA DE PROBABILIDAD” que coincida con la información evaluada, toca definir los “PERIODO DE RETORNO” específico para cada caso. Para ellos, algunos cálculos necesarios como la Probabilidad de ocurrencia del evento (ver Ecuación 20):

[20]. *Probabilidad de ocurrencia del evento*

$$\mathrm{F} = \left[\frac{(\mathrm{T}-1)}{(\mathrm{T})}\right](100)$$

Donde:

F = Probabilidad de ocurrencia (%)

T = Tiempo del perdido de retorno (años)

OMM (2009, 184) indica que los datos de precipitación de lluvia se obtienen como los obtenidos en horas fijas, puede no reflejar las cantidades máximas verdaderas durante el período deseado. Sin embargo, estudios de datos basados en miles de años y diversas estaciones, sustentan multiplicar por 1.13 (factor de corrección) los datos máximos de precipitación del año, representados en días u horas para un determinado momento que va de una a veinticuatro horas, potencialmente se obtendrían resultados próximos a la realidad:

[21]. *Corrección de intervalos fijos*

$$\mathrm{Pc} = [(1.13)(\mathrm{P})]$$

Donde:

Pc = Precipitación corregida (mm)

P = Datos de precipitación (mm)

Campos (1978) establece los factores para la relación de duración lluviosa en un día (ver Tabla 15), lo cual permite estimar las precipitaciones máximas “Pmax” para diferentes Tiempos de duración "D":

Tabla 15. *Factores para la relación de duración lluviosa*

Tiempos de duración "D"									
1 h	**2 h**	**3 h**	**4 h**	**5 h**	**6 h**	**8 h**	**12 h**	**18 h**	**24 h**
0.30	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.80	0.91	1.00

A continuación, la Intensidad de la lluvia "I" en función de la Frecuencia del Periodo de Retorno “T”, para distintos Tiempo de duración “D”:

[22]. *Intensidad de la lluvia*

$$\mathrm{I} = \left[\frac{(\mathrm{Pmax})}{(\mathrm{D})}\right](100)$$

Donde:

I = Intensidad de la lluvia (mm/h)

Pmax = Precipitación máximas (mm)

D = Tiempo de duración (hora)

Y finalmente la representación matemática de las curvas Intensidad - Duración (Tiempo de duración) - Frecuencia (Período de retorno), la cual es aplicable a través de métodos de regresión para cada Periodo de Retorno "T":

[23]. *Intensidad de la precipitación válida para una cuenca*

$$\mathrm{Ip} = \left[\frac{(\mathrm{K})(\mathrm{T})^{\mathrm{m}}}{(\mathrm{t})^{\mathrm{n}}}\right]$$

Donde:

Ip = Intensidad de la precipitación (mm/h) válida para una cuenca

T = Frecuencia del Periodo de Retorno (años)

t = Tiempo de duración de la precipitación (min) cada 5 minutos por 1 hora

K, m, n = Parámetros de la regresión potencial para ajuste

2.7 Orientación de la cuenca

Chow et al. (1988) mencionan que la orientación de una cuenca hidrográfica puede influir en diversos procesos hidrometeorológicos como la precipitación, la evapotranspiración y la radiación solar incidente. Cabe mencionar que también afecta la distribución de la nieve y el flujo de las corrientes dentro de la cuenca.

En este caso la radiación solar: la orientación de la cuenca determina la cantidad de sol que recibe durante el día y el ángulo de los rayos solares sobre la misma. Las cuencas con orientación Norte - Sur (N-S) son aquellas donde el cauce principal corre hacia el norte o hacia el sur, por ende, no recibe insolación uniforme en las dos vertientes durante todo el día; A diferencia de las cuencas

con orientación Este - Oeste (E-O / E-W) son aquellas donde el cauce principal corre hacia el este o hacia el oeste, por ende, recibe insolación en las dos vertientes durante todo el día (Chow et al., 1988).

2.8 Erosión, arrastre y sedimentación

La meteorización es la disgregación natural de rocas (con minerales y sin minerales) cuando entran en contacto directo con el ambiente (atmósfera, hidrosfera, biósfera, criósfera), sucede superficialmente en la tierra, siendo un proceso estático. Y dando paso a un proceso geológico dinámico como es la erosión, trasporte y sedimentación: dicha erodabilidad del suelo es el desgaste (fisicoquímico) del suelo superficial (entidad no consolidada) por agentes exógenos como el hídrico (pluvial o fluvial) o eólico, o por el roce incesante de otras entidades (glaciares y/o granizo); el arrastre (movimiento de masas) es el movimiento de los materiales desgastados; sedimentación es la acumulación de estos materiales en un determinado lugar (aluvión, eluvión o coluvión), después de haber sido arrastrados. Cabe mencionar que este proceso dinámico es natural, pero las actividades antropogénicas pueden causar perturbaciones y acelerarlo (Bullock, 2005).

Saha et al. (2019) indican que la erosión del suelo puede afectar a los recursos ecosistémicos, como degradar la calidad del líquido vital, modificar el paisaje, alterar los ecosistemas y afectar negativamente a la agricultura porque disminuye el contenido orgánico del suelo, por ende, el desdoblamiento y asimilación de nutrientes, reduciendo la productividad de los suelo, además de cambios en la estructura edáfica e influyendo en la potencial contención de agua, lo que pudiera comprometer la seguridad alimentaria. Sin mencionar los impactos fuera del sitio de la erosión, que pudieran provocar un mayor peligro de anegaciones y reducir la utilidad de los reservorios (Ramos y Martínez, 2004). En los últimos años ha existido un progresivo atractivo por el estudio del impacto de la erosión en cuerpos de agua, viéndose reflejado en los numerosos simuladores basados en procesos físicos, que identifiquen y estimen áreas con riesgos potenciales, lo cual permite gestionar las áreas (Benavidez et al., 2018).

Dichos modelos usan la fórmula de preservación de la masa de los depósitos (Aksoy y Kavvas, 2005; Bulygina et al., 2006).

La erosión del agua es uno de los principales impactos ambientales del uso de la tierra. Cuando se producen pérdidas de suelo y agua, se eliminan nutrientes fundamentales para el desarrollo y el mantenimiento del cultivo, con resultados perjudiciales desde la perspectiva de sostenibilidad de la agricultura y el medio (ambiente). Además, provocan otros efectos nocivos, como la sedimentación de las masas de agua. La evaluación de las pérdidas edáfica debidas a la erosión del agua en las subcuencas es esencial para predecir la degradación del suelo (Mendes et al., 2018).

La erosión hídrica es la remoción edáfica por el agua y el transporte de los materiales erosionados lejos del punto de remoción. La acción del agua correspondida a la lluvia erosiona el suelo y provoca actividades como la erosión en cárcavas, barrancos y riachuelos, lo que provoca los efectos de las inundaciones y la sedimentación. Además, la gravedad de la erosión hídrica depende de la inclinación, textura, retención hídrica en el suelo, el origen de la roca subyacente, cobertura y tipo de vegetación, la intensidad, duración y frecuencia de las lluvias (McIvor et al., 2014).

2.8.1 Tipos de erosión hídrica

Calle (2021) a continuación menciona que existen varios tipos de erosión hídrica: Erosión por salpicadura es el tipo de erosión causada por gotas de lluvias que actúan sobre los agregados de tierra estéril, directamente relacionada con la lluvia y energía cinética (velocidad de lluvia) emitida directamente a la arena fina.

Erosión laminar: se entiende como la remoción uniforme de suelos en capas delgadas en consecuencia de la escorrentía superficial; Erosión por surcos se forma con el aumento de la precipitación como resultado, el caudal, la altura y la rapidez hídrica junto con la topografía microscópica de este lugar puede provocar derrumbes y aumento significativo de la tasa de desgastes; Erosión en cárcavas se desarrolla por la acción de las escorrentías y drenajes superficiales, la profundidad y forma de los hoyos están definidos por las características de la regolita y su nivel de adherencia. Erosión en cursos permanentes ocurre

principalmente en las orillas de los cuerpos de agua y esta aumenta con la eliminación de la cubierta vegetativa que es la defensa de ribera, y hace que la corriente natural se desestabilice ocasionando el derrumbe.

2.8.2 Proceso de la erosión Hídrica

La erosión hídrica es el resultado de los procesos en los que se produce la separación, movimiento y almacenamiento del material edáfico, provocados por el trabajo erosivo de las gotas al precipitar y la corriente hídrica superficial terrestre (diversas formas de erosión, como la salpicadura la erosión en sabana, la erosión en rampas y entre rampas, que ocurren simultánea o independientemente, se observan ampliamente en las tierras agrícolas). Dicho proceso es variable en el tiempo, controlado tanto por la lluvia como por el flujo superficial. Una mejor comprensión de los cambios dinámicos en la carga de sedimentos y la distribución del tamaño con varias fuerzas erosivas puede ayudar a desarrollar y verificar modelos de erosión (Hao, 2019).

Hao (2019) indica que el fenómeno de desprendimiento del suelo y la selección del tamaño de los sedimentos varía con el tiempo, es generalmente reconocido como un proceso común en las investigaciones de desgaste basados por eventos. Además, se ha observado ampliamente que las partículas finas de sedimento fueron altamente enriquecidas o beneficiadas tanto por la gota de lluvia como por la escorrentía durante el corto período de tiempo en la etapa inicial de la tormenta, mientras que partículas gruesas eran propensas a tener una menor impacto o eficiencia de erosión.

Quiñonez (2019) menciona componentes que actúan en el porcentaje por erosión hídrica: Clima mediante energía cinética de la precipitación que está influenciada por varios factores, pero es importante tener en cuenta que algunas tormentas pueden tener una capacidad de más erosiva que otras, y también depende del lugar. Infiltración cuyo proceso ocurre cuando el agua penetra en el suelo intersticial, logrando que el suelo actúe como un espacio de almacenamiento de agua. Cabe mencionar que la condición inicial edáfica o la cubertura vegetativa son los elementos que afectan la percolación, sin mencionar su porosidad, conducción y humedad que se encuentra en el mismo.

Vegetación actúa como cobertura del suelo contra el mal tiempo y fenómenos atmosféricos, sobre todo como protección contra la corrosión, porque absorben la fuerza de la precipitación en contacto con el suelo. También las raíces de la vegetación ayudan a sostener el suelo, manteniendo la densidad del suelo para impedir movimientos de masa en inclinaciones y/o fallas en talud. Característica edáfica porque no todas las edafologías son iguales, en su aguante al desgaste. La capacidad de erosión de los suelos está determinada por la textura, estructura, humedad, materia orgánica y permeabilidad. Pendiente y Topografía porque la cuantía y la celeridad de la corriente está determinada por la gradiente y longitud del terreno, en mayor o menor medida.

2.8.3 Erosión media anual del suelo

Fournier (1960) propuso una ecuación de erosividad (ver Ecuación 24) y menciona que la degradación del suelo se puede estimar a través de la Erosividad media anual “Emed” (t/ha/año), donde se necesita: Precipitación media del mes más lluvioso “Pmax” en milímetros, Precipitación media anual “Pmed” en milímetros, Altitud media de la cuenca “Hmed” en metros y Coeficiente de pasividad “Cp” (también conocido como pendiente media de la cuenca).

[24]. *Ecuación de erosividad por Fournier*

$$\mathrm{Emed} = \{(2.65)\ [\log(\mathrm{Pmax}/\mathrm{Pmed})]\} + \{(0.46)[\log(\mathrm{Hmed}/\mathrm{Cp})]\} - (1.56)$$

2.8.4 Ecuación universal revisada de pérdida de suelos

Phinzi and Ngetar, (2019) señala que los modelos empíricos de erosión, como la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelos (RUSLE) es un método sencillo pero exhaustivo, utilizado para valorar el desgaste edáfico y sus componentes causales, conocido como pérdida media anual de suelo “A” (t/ha/año). Específicamente, RUSLE considera la lluvia (R), la topografía (LS), la erosionabilidad del suelo (K), el manejo de la cubierta (C) y la práctica de apoyo (P) como factores importantes que afectan la erosión del suelo. La introducción de RUSLE fue un intento directo de abordar las limitaciones del predecesor USLE (ver Figura 22), como la corrección del clásico factor USLE-R para tener en cuenta la lluvia en el agua estancada e introducción de nuevas ecuaciones basadas en la proporción de erosión entre surcos y entre surcos que acomodan

aspectos complejos del factor topográfico, aunque ambos mantienen los mismos principios empíricos y estructura fundamental, dichos modelos pueden expresarse matemáticamente:

[25]. *Ecuación universal revisada de pérdida de suelo (RUSLE)*

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

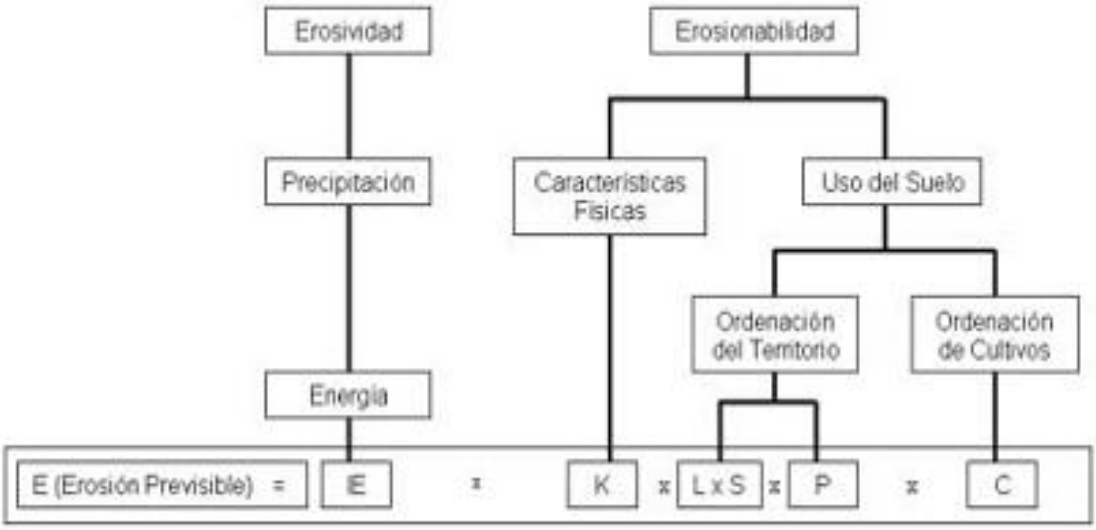


Figura 22. *Factores implicados en la USLE*

Fuente: Wischmeier y Smith (1978)

Factor R (índice de erosividad de la precipitación en megajoules por milímetros por hectárea y hora “MJ/mm/ha/h” = UE): la erosión de la precipitación está influenciada por el clima y a menudo se manifiesta sobre la cuantía y violencia de la precipitación, que determina la probabilidad erosiva edáfica. Se han desarrollado varios indicadores de erosión para medir el efecto de las gotas de precipitación en el suelo (energía e intensidad máxima en 30 minutos), además de la cuantía y la velocidad del escurrimiento que puede estar relacionadas con la cantidad de lluvia (Calderón, 2020). Djoukbala et al. (2018) mencionan que la precipitación media mensual se representa con “Pi” (mm) y precipitación media anual con “P” (mm) en la ecuación que se presenta:

[26]. *Factor R de RUSLE*

$$R = 1.74 \log \sum_{i=1}^{12} \frac{Pi^2}{P} + 1.29$$

Factor K (erodabilidad del suelo en toneladas por hectárea por unidad de erosión "t/ha/UE"): la erodabilidad se determina como la textura edáfica por escurrimiento y movimiento hídrico debido a la lluvia. Dicho factor está relacionado con los efectos combinados de la precipitación, la escorrentía y el desgaste, lo que explica el efecto de las propiedades edáficas. Los modelos USLE y RUSLE utilizan un modelo empírico basado en las propiedades físicas edafológicas, como la textura, estructura, materia orgánica y permeabilidad del suelo (Calderón, 2020). Jaber e Issa (2018) mencionan como se estructura la ecuación, en el cual: m_s es el porcentaje de fracción arenosa (partícula de 0.5 - 2 mm de ⌀); m_{silt} es el porcentaje de fracción de limosa (partícula de 0.002 - 0.05 mm de ⌀); m_c es el porcentaje de fracción arcillosa (partícula de <0.002 mm de ⌀); orgC es el porcentaje de fracción de carbono orgánico contenido:

[27]. *Factor K de RUSLE*

$$K_{USLE} = (f_{csand})(f_{cl-si})(f_{orgc})(f_{hisand})$$

$$K_{RUSLE} = K_{factor}$$

$$K_{RUSLE} = [(K_{USLE})(0.1317)]$$

$$f_{csand} = \{(0.2) + (0.3)e^{[-0.0256 \text{ x } m_s \text{ x } (1-\frac{m_{silt}}{100})]}\}$$

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

$$f_{orgc} = \left[\frac{0.25orgC}{(orgC)+e^{(3.72-2.95org)}}\right]^{0.3}$$

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

Con ayuda de la Geoinformación de los suelos del mundo, se obtienen valores de los diferentes tipos de suelos que se encuentren dentro del área de estudio. Comprobación $F_K = \left[\left(F_{sand} + F_{clay}\right)\left(F_{org} + F_{silt}\right)\right]/(100)$

Factor LS (longitud de pendiente y magnitud de pendiente “adimensional”): se denomina elemento topográfico, porque definen la longitud de la pendiente (L) como la correlación entre el desgaste edáfico en una inclinación específica y el desgaste edáfico en una inclinación estándar (22.13 m de largo); por otro lado, el efecto de la inclinación (S) se refiere a la relación entre al desgaste edáfico en una superficie con una pendiente específica y al desgaste edáfico en una superficie con pendiente estándar (9%), cuanto mayor sea la pendiente, será mayor la erosión (Eisenberg, 2020). Cuando se trata de calcular el factor para cuencas, hay técnicas específicas, como el método de “jerarquización de una red de drenaje o densidad de una cuenca” y “pendiente media” de Horton (1945) o el método “contorno - punto - extremo” de Williams y Berndt (1976), que se describen en el manual “Restauración hidrológica forestal y control de la erosión” (López, 1994).

Eisenberg (2020) indica que el Factor L (longitud de la pendiente) representa la relación entre la pérdida de suelo observada, definida con la siguiente ecuación:

[28]. *Factor L de RUSLE*

$$\mathrm{L} = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^{\mathrm{m}}$$

Dónde “λ” representa la distancia de la gradiente en metros y “m” es la longitud y gradiente, calculándose como:

[29]. *Coeficiente m del Factor L de RUSLE*

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

El coeficiente “β” se calcula con la siguiente ecuación con un rango entre 0 y 1, donde θ es el ángulo de la gradiente:

[30]. *Coeficiente β del Factor L de RUSLE*

$$\beta = \frac{(\sin\theta)/(0.0896)}{3(\sin\theta)^{0,8} + (0.56)}$$

Otra ecuación fue adaptada para el enfoque RUSLE con el fin de describir mejor el desgaste edáfico con aumento gradual de la gradiente como:

[31]. *Otra ecuación para el Factor L de RUSLE*

$$L_{(i,j)} = \frac{\left(A_{i,j-in} + D^2\right)^{m+1} - \left(A_{(i,j)-in}^{m+1}\right)}{\left(D^{m+2}\right)\left(x_{ij}^{m}\right)(22.13)^{m}}$$

Donde $A_{i,j\text{-}in}$ es la acumulación de flujo en metros cuadrados, con una entrada con una celda malla i,j. La D es el tamaño de la celda de la red en metros, y $X_{i,j}$ es (sen Ai,j + cos Ai,j) y Ai,j es el aspecto de la celda de rejilla i,j.

Schmidt et al. (2019) recomienda que para determinar el Factor S (inclinación) usar la función propuesta de McCool et al. (1987) porque permite diferencia la correlación entre el desgaste edáfico e inclinación de la pendiente en radianes (sinθ) con dos funciones: una para pendientes con una inclinación menor al 9% y la otra mayor o igual al 9%; las funciones son las siguientes:

[32]. *Factor S de RUSLE*

$$S_{<9\%} = (\,10.8 \sin\theta + 0.03\,)$$

$$S_{\geq 9\%} = (16.8 \sin\theta - 0.50)$$

Para el valor total del rango de la pendiente se establecieron clases, rangos y descripciones de las pendientes (ver Tabla 16):

Tabla 16. *Interpretación de pendientes para el Factor LS*

Clase	Rango	Descripción
1	<5%	Pendiente débil
2	5-12%	Pendiente suave
3	12-25%	Pendiente moderada
4	25-40%	Pendiente fuerte
5	40-70%	Pendiente muy fuerte
6	>70%	Pendiente abrupta

Fuente: Rosado (2021)

Factor C (cubierta vegetal y manejo del suelo “adimensional”): refleja el efecto en la tasa de erosión del suelo y muestra cómo se distribuirá el potencial de pérdida a lo largo del tiempo, según diferentes coberturas o uso del suelo, con diferentes prácticas de manejo. Dicho valor, se define como la correlación entre

el desgaste edáfico con cultivos específico y el desgaste equivalente en parcelas piloto. Siendo importante intuir el patrón de uso para dar valores confiables (Calderón, 2020). Los resultados van desde 0.0 “suelos completamente protegidos” y 1.0 “suelos completamente desprotegidos”, ver tabla siguiente:

Tabla 17. *Interpretación de uso de suelo para el Factor C*

Uso de suelo	Factor C
Bosque primario (con maleza densa)	0.001
Bosque de segundo crecimiento con buen sotobosque y alta cobertura de mantillo	0.003
Bosque de segundo crecimiento con parches de arbustos y cultivos de plantación de cinco años o más	0.006
Arbustos con parches o pastizales abiertos perturbados	0.150
Arbustos con parches o pastizales abiertos perturbados	0.2-0.4
Zonas rurales urbanizadas, con huertos familiares	0.200
Cultivos perennes (es decir, plátano, coco)	0.1-0.3
Suelos desnudos	1.000

Fuente: Salvacion (2020)

Factor P (prácticas de conservación del suelo “adimensional”): el componente indica la importancia de métodos para preservación edáfica, que reduce la pérdida de suelo al cambiar los patrones de flujo, pendientes o direcciones del flujo superficial. Los valores del coeficiente oscilan entre 0 “buenas prácticas de conservación” y 1 “malas prácticas de conservación” (Ganasri y Ramesh, 2016).

Tabla 18. *Interpretación del Factor P*

Pendiente	Cultivo a nivel	Cultivo en fajas	Terrazas	
			Desagüe encespedadas	Infiltración con contrapendiente
1-2%	0.60 (Longitud de ladera <121.92m)	0.30	0.12	0.05
3-8%	0.50 (Longitud de ladera <60.96m)	0.25	0.10	0.05
9-12%	0.60 (Longitud de ladera <36.576m)	0.30	0.12	0.05
13-16%	0.70 (Longitud de ladera <24.384m)	0.35	0.14	0.05
17-20%	0.80 (Longitud de ladera <18.288m)	0.40	0.16	0.06
21-25%	0.90 (Longitud de ladera <15.24m)	0.45	0.18	0.06

Fuente: Wischmeier y Smith (1978)

2.8.5 Parámetro RUSLE usando geomática

Existe un creciente interés en el uso de la geomática, como los Sistemas de Información Geográfica (GIS) que integran sensores remotos, en la geociencia para derivar parámetros RUSLE, lo que permite evaluar y estimar la erosión del suelo a nivel regional. Este modelo matemático utiliza múltiples factores, como la orografía, el uso de la tierra, la cobertura vegetativa y la erosividad de la lluvia

(Phinzi y Ngetar, 2019). Mediante el uso de un GIS, es posible recopilar datos geoespaciales de cada uno de estos factores y utilizarlos en el modelado RUSLE para obtener un valor de la erosión edáfica en diferentes áreas de una región determinada. Además, estos sistemas pueden identificar los sitios con mayor susceptibilidad al desgaste y permitir que los esfuerzos de conservación se concentren en dichas áreas (Brahim et al., 2020). Por otro lado, la teledetección, implica la adquisición de información sobre objetos a partir de mediciones realizadas sin contacto físico con ellos, ofrece una fuente principal de datos para estimar directa o indirectamente los parámetros RUSLE (Phinzi y Ngetar, 2019).

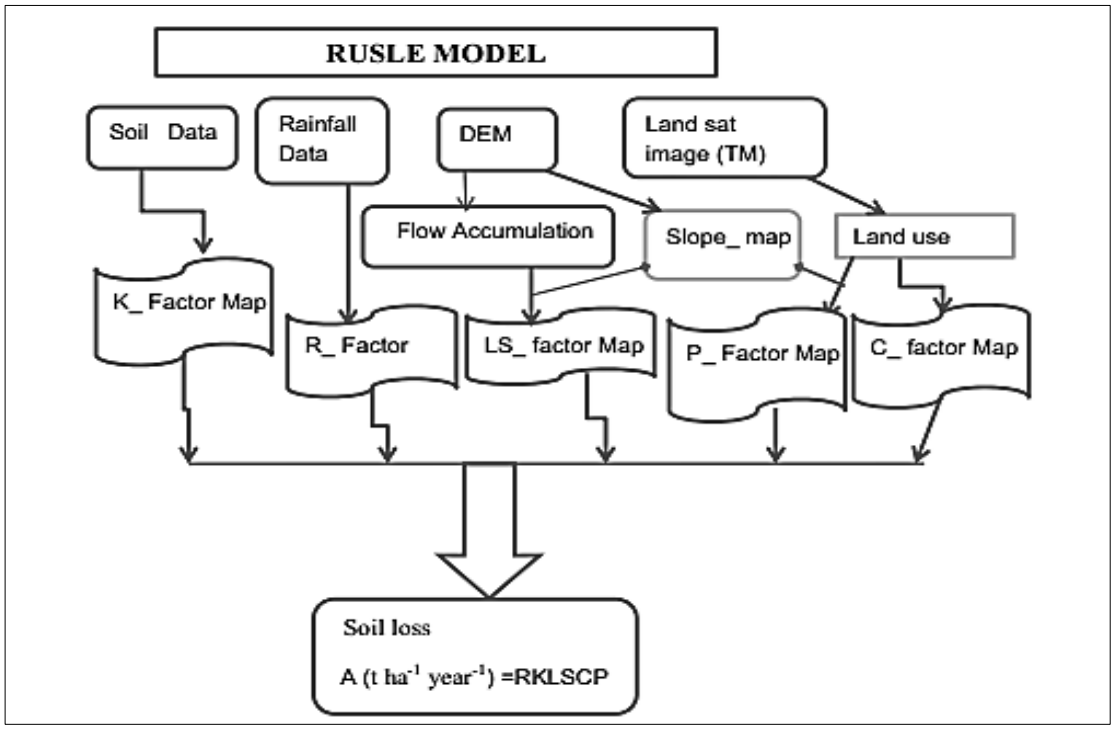


Figura 23. *RUSLE con GIS*

Fuente: Sewnet y Sewnet (2016)

2.9 Balance hídrico de cuencas

La UNESCO (1982) explica que el balance hídrico “BH”, desde la perspectiva hidrológica, analiza en esencia la conservación de masas, es decir, que en cualquier período de tiempo un volumen de agua está condicionado por la diferencia del volumen almacenado (siendo la variación del almacenamiento igual a la variación entre las entradas y salidas). En términos edafoclimáticos, es una representación hipotética de los cambios hídricos entre suelo, atmósfera y

plantas, admitiendo intuir las pérdidas y ganancias hídricas que se registran en una zona estudiada (Jiménez Otárola, 1994).

Espinoza (2012) asevera que una cuenca hidrográfica de algún cuerpo de agua es la única superficie nativa para la cual las estimaciones del balance hídrico a gran escala pueden compendiarse, ya que la precisión de la ecuación está condicionada por el tamaño de la hidrocuenca. Cuanto más pequeña sea la cuenca, más compleja es su comprobación, porque es difícil evaluar las contribuciones secundarias, tales como interacción con cuencas adyacentes, infiltración y/o percolación del agua, almacenamiento del agua (lagos, embalses, etc.) y la hidrodinámica con bosques y/o zonas agrícolas.

La valoración de los cuerpos de agua demanda una evaluación acertada del balance hídrico, es decir, entender el ciclo hidrológico en sus múltiples etapas e interacciones (Eischeid et al., 2000).

Por otra parte, los datos hidrometeorológicos históricos son importantes para poder realizar el balance, ya que está supeditado a los resultados que se deseen alcanzar, por ende, se debe considerar la disponibilidad de estaciones vecinas al sitio por estudiar y de información histórica ya que la Organización Meteorológica Internacional (OMI, 1935) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1956) recomiendan que las normales climáticas deben ser estimadas usando datos de un periodo mínimo consecutivo de 30 años últimos.

Llorens (2003) indica que el balance hidrológico es un término simplista, aunque la cuantificación de sus variables es compleja por la carencia de valores directos como la evapotranspiración (respecto a la ubicación espacial); perdida de agua por las fluctuaciones hídricas acopiada para la cuenca y recarga acuífera. Básicamente, la fórmula general que se utiliza en el “BH” es igual a la diferencia entre precipitación “P” (mm), evapotranspiración potencial “ETP” (mm), escorrentía superficial “Es” (mm), e infiltración “I” (mm).

[33]. *Balance hidrológico general*

$$\mathrm{BH} = \mathrm{P} - \mathrm{ETP} - \mathrm{Es} - \mathrm{I}$$

Existen otras modificaciones como el descrito por Castro y Guzmán (1985), donde el método de Hargreaves ofrece ventajas al considerar el tipo de

vegetación con fácil sistematización, cuyas variables son la lluvia media “P” (mm), evapotranspiración potencial media “ETP” (mm), caudal medio “Q” (mm), cambio en el almacenamiento “C” (mm), y término residual “T” (mm).

[34]. *Balance hidrológico por Hargreaves*

$$\mathrm{BH} = \mathrm{P} - \mathrm{ETP} - \mathrm{Q} - \mathrm{C} - \mathrm{T}$$

La UNESCO (1982) indica que es necesaria la evaluación del balance hídrico en forma integral con todos sus componentes, acorde con las características propias de la zona. Además, resalta que los componentes más importantes para analizar el BH son la precipitación líquida y/o sólida “P”; pérdidas por evaporación, transpiración y/o sublimación “ETP”; ingreso de agua superficial a la cuenca “QEsup”; ingreso de agua subterránea a la cuenca “QEsub”; egreso de agua superficial de la cuenca “QSsup”; salida de agua subterránea de la cuenca “QSsub”; variación del almacenamiento o regulación del agua en la cuenca “V” (ríos, lagos, embalses, pantanos, campos de nieve, glaciares, capa subterránea); e incluye un término residual de discrepancia, error de medición o estimación “T”; existen otros parámetros que se encuentran implícitos en la “ETP” como la temperatura, humedad, insolación, radiación, solar y viento.

[35]. *Balance hidrológico para América del Sur por UNESCO*

$$\mathrm{BH} = \mathrm{P} + \mathrm{QEsup} + \mathrm{QEsub} + \mathrm{ETP} + \mathrm{QSsup} + \mathrm{QSsub} + \mathrm{V} + \mathrm{T}$$

La clasificación climática de Thornthwaite es un sistema desarrollado por el climatólogo estadounidense Charles Warren Thornthwaite en la década de 1940; este sistema se utiliza para clasificar los diferentes tipos de climas en función de las variables de temperatura y precipitación. Utiliza los índices de calor y humedad para determinar el tipo de clima predominante en una región determinada. El índice de calor tiene en cuenta la temperatura media mensual y la duración del período de crecimiento, mientras que el índice de humedad considera la relación entre la precipitación y la evaporación potencial. El cálculo del balance hídrico mediante el método de Thornthwaite, permite cuantificar aproximaciones en los distintos componentes del recurso hídrico en el suelo. Esta ecuación no tiene una expresión única, sino que depende del intervalo de tiempo sobre el cual se aplica y de los distintos procesos físicos que existan en

el sistema fluvial (Israelsen y Hansen, 1965). Para cuantificar los distintos componentes del balance hídrico en el suelo, se suele escribir en milímetros por unidad de tiempo (generalmente mes o año), donde precipitación “P” (mm) es igual a las sumas de escorrentía superficial “Es” (mm), evapotranspiración potencial “ETP” (mm) e infiltración “I” (mm).

[36]. *Balance hidrológico por Thornthwaite*

$$\mathrm{P} = \mathrm{Es} + \mathrm{ETP} + \mathrm{I}$$

El Índice de Humedad (Ih), el Índice de Aridez (Ia) y el Índice de Humedad de Thornthwaite (Im) son medidas utilizadas en la climatología para evaluar la disponibilidad de agua en un determinado lugar, analiza patrones de humedad y planificar el uso sostenible de los recursos naturales (Wheeler and Brunn, 2002). Son importantes para comprender el régimen de agua de un lugar y evaluar su idoneidad para diferentes actividades (agricultura, gestión de recursos hídricos y conservación de ecosistemas), a continuación, cada uno de los índices:

Índice de Aridez (Ia) es una medida que indica el nivel de aridez o sequedad de un área. Se obtiene al restar el valor de la evaporación potencial de la precipitación. Un valor alto de índice de aridez indica que la evaporación supera la precipitación, lo que indica condiciones secas y una baja disponibilidad de agua en la región.

[37]. *Índice de Aridez*

$$\mathrm{Ia} = 100\left[\frac{(\mathrm{ETP} - \mathrm{ETR})}{\mathrm{ETP}}\right]$$

Tabla 19. *Interpretación del Índice de Aridez*

Índice	Calificación cualitativa	Descripción
< 15	Altos excedentes	Altos excedentes de agua
15 - 19	Excedentes	Excedentes de agua
20 - 29	Moderado y excedentes	Moderado y excedentes de agua
30 - 39	Moderado	Moderado
40 - 49	Bajo	Moderado a deficitario de agua
50 - 59	Deficitario	Deficitario de agua
> 60	Altamente deficitario	Altamente deficitario de agua

Índice de Humedad (Ih) es una medida que cuantifica la cantidad de humedad disponible en una región. Se calcula teniendo en cuenta la relación entre la

precipitación y la evaporación potencial. Si el índice de humedad es alto, indica que hay una buena disponibilidad de agua en la región, lo que favorece el crecimiento de vegetación y la actividad biológica.

[38]. *Índice de Humedad*

$$\mathrm{Ih} = \left[\frac{(100)(\text{Exceso hídrico})}{(\mathrm{ETP})}\right]$$

Índice de Humedad de Thornthwaite (Im) es una medida más precisa y detallada de la humedad en un área determinada. Thornthwaite desarrolló este índice teniendo en cuenta factores como la temperatura y la duración del período de crecimiento de las plantas. Se utiliza para estimar la humedad del suelo y evaluar el equilibrio hídrico en una región a lo largo del año.

[39]. *Índice de Humedad por Thornthwaite*

$$\mathrm{Im} = \left\{\frac{[(100)(\text{Exceso hídrico})] - [(60)(\text{Déficit hídrico})]}{(\mathrm{ETP})}\right\}$$

Tabla 20. *Clasificación de climas según categorías de humedad*

Clima	Tipo de clima	Humedad	Estación	Árido
A	Super húmedo	> 100	r	<16.7
B4	Muy húmedo	80 a 100	s	16.7-33.3
B3	Húmedo	60 a 80	w	16.7-33.3
B2	Moderadamente húmedo	40 a 60	s2	>33.3
B1	Ligeramente húmedo	20 a 40	w2	>33.3
C2	Sub húmedo - húmedo	0 a 20		**Húmedo**
C1	Sub húmedo - seco	0 a -20	d	<10
D	Semiárido - seco	-20 a -40	s / w	10-20
E	Árido	-40 a -60	s2 / w2	>20

Interpretación de la variabilidad estacional por eficiencia de humedad: r (poca o ninguna deficiencia de agua); d (poco o ningún excedente de agua); s (moderado excedente de agua en invierno); w (moderado excedente de agua de verano); s2 (gran excedente de agua de invierno); w2 (gran excedente de agua de verano).

Maderey y Jiménez (2005) explican que para realizar el cálculo del balance hidrológico (BH) es necesario contar con ciertos datos mínimos, entre los cuales se encuentra la precipitación (P), que es un importante ingreso hídrico en el ciclo hidrológico y puede presentarse de diversas formas, como lluvia, neblina, nieve

o rocío. El control de la precipitación se efectúa con las estaciones meteorológicas mediante instrumentos como pluviógrafos o pluviómetros, ya que varía en el espacio y en el tiempo en la cuenca. La escorrentía superficial (Es), es el caudal hídrico que no se evapora ni se infiltra, sino que fluye superficialmente por los cauces después de una lluvia intensa en un efímero temporal. A diferencia de la escorrentía subsuperficial (basal), que recarga los arroyos naturales durante el período de estiaje. Por último, la infiltración (I) se refiere a la cantidad de agua proveniente de la precipitación que recorre la superficie terrestre e invade los poros del suelo y subsuelo, ya sea de manera total o parcial.

La evapotranspiración potencial “ETP” es un dato necesario para el cálculo del “BH”, siendo el segundo parámetro más significativo en el ciclo hidrológico, porque es la cuantía hídrica que regresa al ambiente, mediante la transpiración vegetal y por evaporación del suelo. Es difícil contabilizar, sobre todo por la falta de estaciones que facilitan su registro en campo, por lo que resulta conveniente su deducción mediante fórmulas empíricas (Bruijnzeel, 1991).

Thornthwaite (1948) señaló que la ETP es la evapotranspiración producida si la humedad y cobertera vegetal del suelo estuvieran en condiciones óptimas, basado en la atención de la eficiencia térmica el cual expresa indicadores de humedad y aridez a partir del balance del agua. Introduciendo la primera noción sobre la ETP, siendo asumida ampliamente, dada las aportaciones a las ciencias edafoclimáticas e hidrológicas, desde una perspectiva geográfica. Presume un gran progreso a diferencia de otras evaluaciones, ya que parte del clima que afecta a la edafología y a la vegetación, es decir, a la evapotranspiración cuya resultante es la disposición del agua en el suelo (Custodio y Llamas, 1983).

La ecuación de la ETP descrita por Thornthwaite (1948) indica que “T_{med}” es la temperatura media mensual en grados Celsius (ºC); “I” el índice de calor anual proveniente de la sumatoria del índice de calor mensual “i”; “N” número máximo de horas luz en función de la latitud (ver Anexo A); y “d” número de días al mes.

[40]. *Evapotranspiración potencial por Thornthwaite*

$$\mathrm{ETP} = \left\{ 16 \left[\frac{(10)(\mathrm{T_{med}})}{\sum \left(\frac{\mathrm{T_{med}}}{5} \right)^{1.514}} \right]^{\left[(0.0000006751^3) - (0.0000771\mathrm{I}^2) + (0.01792\mathrm{I}) + (0.49239) \right]} \right\} \left[\frac{\mathrm{N}}{12} \right] \left[\frac{\mathrm{d}}{30} \right]$$

Un método simple para obtener la "ETP" es el planteado por investigador ruso Ivanov (1954) quien analiza dos variables medias, como la "T_{med}" y la "HR_{med}".

[41]. *Evapotranspiración potencial por Ivanov*

$$\mathrm{ETP} = [(0.0108)(25 + \mathrm{T_{med}})^2 (100 - \mathrm{HR_{med}})]$$

Otra ecuación de ETP es la propuesta por Hargreaves y Samani (1948) donde indica que la temperatura mensual es en grados Celsius (ºC) siendo "Tmax" la temperatura máxima, "Tmin" la temperatura mínima y "Tmed" la temperatura media; y "Ra" radiación solar extraterrestre en milímetros por día (mm/día) en función de la latitud (ver Anexo B).

[42]. *Evapotranspiración potencial por Hargreaves*

$$\mathrm{ETP} = [(0.0023)(\mathrm{Tmed} + 17.78)(\mathrm{Ra})(\mathrm{Tmax} - \mathrm{Tmin})^{0.5}]$$

Doorenbos y Pruitt (1977) sostienen que el término ETP podría ser confuso, pues cada tipo de vegetación evapotranspira diferente cantidad de agua, estableciéndose conceptos paralelos:

La evapotranspiración del cultivo de referencia "ETo" estudia la evapotranspiración "ET" pedida por la atmósfera sobre una superficie cultivada (independiente del tipo) sin deficiencia de agua y con buenas condiciones aerodinámicas, donde el suelo no tiene ningún efecto, pero los factores climáticos afectan directamente a la ET (Penman, 1948 y Monteith, 1965).

La evapotranspiración del cultivo en condición estándar "ETc" se refiere a la ET de cualquier cultivo que se encuentra en condiciones óptimas (sin plagas o enfermedades, abundante agua, buena nutrición, superficie apropiada y clima favorable) donde alcance la máxima producción. La ETc se obtiene multiplicando ETo por un coeficiente de cultivo "Kc" (Allen et al., 2006).

[43]. *Evapotranspiración del cultivo*

$$\mathrm{ETc} = (\mathrm{ETo})\ \mathrm{x}\ (\mathrm{Kc})$$

En síntesis, estas diferencias son esenciales en la ingeniería de los cultivos, pero desde la perspectiva hidrológica y específicamente al considerar la ET intrínsecamente del balance frecuente de un cuerpo de agua, los conceptos de "ETo" o "ETP" son equiparables sin distinción (Doorenbos y Pruitt, 1977).

2.10 Modelos hidrológicos

La particularidad del uso de modeladores hidrológicos es de simular los fenómenos naturales que pudieran suscitarse (Cabrera, 2011), siendo una representación sintetizada de la operación de un sistema fluvial, en este caso de una cuenca hidrográfica. Sus ingresos y egresos son variables cíclicas medibles cuya distribución es un conjunto de cálculos que relacionan los ingresos con los egresos en función del tiempo (Urciuolo et al., 2007).

En el pronóstico del flujo hídrico en una cuenca, se demanda el uso de modeladores, los cuales evalúan diferentes parámetros naturales (edafoclimáticos, topográficos y cobertura terrestre). Los modelos hidrológicos tratan de replicar el mecanismo físico que genera la escorrentía superior y llenado para los acuíferos subyacentes a partir de la evapotranspiración y lluvia (Xu y Singh, 2004).

La capacidad de procesamiento de los ordenadores influye directamente en el modelamiento hidrológico, ya que ha ayudado a evolucionar de modelos 1D a esquemas en dos dimensiones (2D), permitiendo cuantificar parámetros hidráulicos; especialmente sobre simulaciones a gran escala que pudieran verse afectada por el paso del agua (Brunner, 2014).

Los modelos numéricos han progresado con el paso del tiempo, porque actualmente poseen la capacidad y adaptabilidad para representar fenómenos naturales, resultando de mucha importancia en la predicción de fenómenos, permitiendo anticipar eventos sobre la zona de influencia, para adoptar medidas preventivas (Bladé, Sánchez Juny, Sánchez, Niñerola y Gómez, 2009).

Los modelos estadísticos y específicamente los autoregresivos móviles aplican procesos hidrológicos estacionales univariados, permitiendo crear, tabular y pronosticar datos sintetizados con principios estadísticos y funcionalidad de autocorrelación serial (Salas y Obeysekera, 1992).

2.10.1 Modelo hidrológico HEC-HMS

HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*) es un Sistema de Modelado Hidrológico desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (HEC, 2019), cuyo programa es de uso libre, permitiendo estimar hidrogramas de egresos de un recurso hídrico a partir de eventos fuertes (lluvias máximas). Para ejecutar estas estimaciones es necesario datos de un hietograma de lluvias para posterior calcular precipitaciones excesivas o netas. El modelo puede emular la contestación que tendría una cuenca en su escurrimiento superior, el cual se calcula restando pérdidas por infiltración de una precipitación, sobre una base de velocidad de infiltración hídrica edafológica (Villón, 2016). Con los datos necesarios (cuenca y precipitaciones), el programa HEC-HMS realiza los cómputos de las subcuencas en las tres etapas iniciales (A, B, C), y computar para cada tránsito a lo largo de un cauce en la última fase (D), cuyo hidrograma es de salidas (ver Figura 24). El proceso es sumar los caudales generados en las uniones, para finalmente proporcionar los hidrogramas por subáreas y/o para el área completa (Sánchez, 2015).

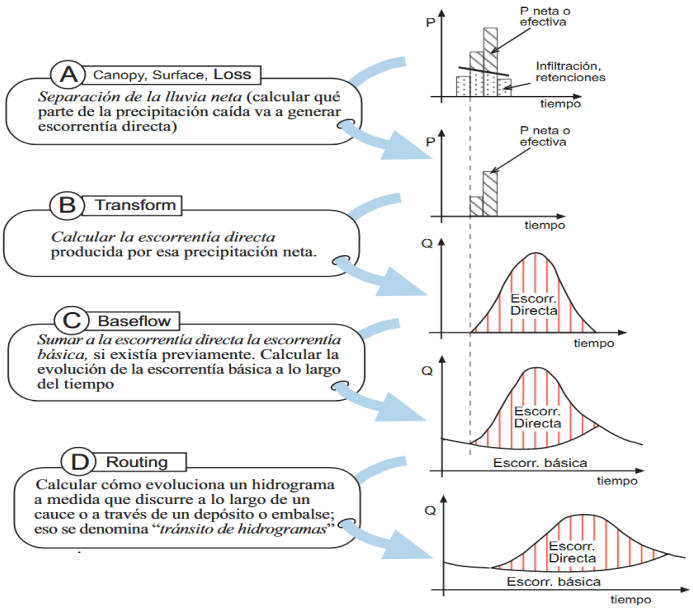


Figura 24. *Fases de trabajo del programa HEC-HMS*

Fuente: Sánchez (2015)

2.10.2 Modelo hidrológico PRMS

Chacón y Varas (2001) exponen que el PRMS (*Precipitation Runoff Modeling System*), desarrollado por USGS (2019), es un modelo semi-distribuido con base física, diseñado para simular el balance hídrico en una cuenca sobre una base continua, cuya interacción atmósfera-vegetación-suelo son incluidos, a través de datos edafoclimáticos, coberturas y geomorfología. El modelamiento busca los mejores resultados en caudales, para tal efecto integra el concepto de Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU), cuya noción permite analizar a la cuenca como una suma de sub áreas, cada una de las cuales tiene un comportamiento propio. Markstrom et al. (2015) indican que los HRU en el modelo PRMS son unidades homogéneas, el cual modela por separado donde cada uno posee su propio grupo de parámetros, cuyo resultado es el modelamiento de caudales, permitiendo operar de dos modos: diario y tormenta. En el modo diario se simula para cada HRU como promedios diarios. El modo tormenta se aplica a eventos individuales, y algunos son simulados en intervalos de tiempo mucho más pequeños que un día (ver Figura 25).

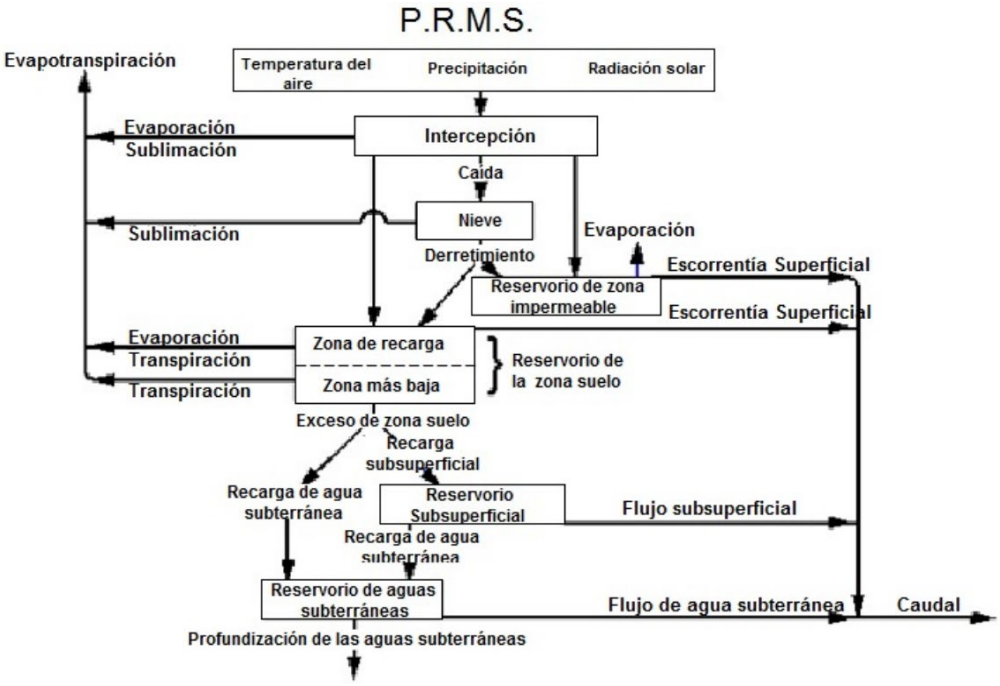


Figura 25. *Diagrama de modelamiento con PRMS*

Fuente: Chacón y Varas (2001)

2.10.3 Modelo hidrológico SWAT

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) de tiempo continuo, desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-ARS, 2019), se encuentra actualmente integrado con ArcMap y se conoce como ArcSWAT. Este software es una herramienta diseñada para evaluar el suelo y el agua, y fue creado para prever cómo el suelo y la vegetación afectan la producción hídrica, sedimentos y agroquímicos en cuencas complicadas con suelos heterogéneos, cuyo manejo y uso se extiende a lo largo de períodos prolongados. El software simula procesos físicos, como el movimiento del agua, y requiere información detallada sobre factores como el clima, los suelos, la topografía, la vegetación, entre otros (Torres et al., 2005).

El programa SWAT simula el ciclo hidrológico, con una ecuación basada en un balance hidrológico (equilibrio del agua) para establecer entradas y salidas con potenciales almacenamientos hídricos en la hoya hidrográfica. Para la simulación se fracciona espacialmente en subcuencas, siendo muy útil para áreas cuya condición edáfica es heterogénea o impactan considerablemente la

hidrología del sector. La información se organiza en categorías como clima, unidades de respuesta hidrológicas (HRU), estanques/humedales, agua subterránea, canal principal o zona drenada. Las HRU son áreas dentro de la subcuenca que tienen combinaciones de cobertura terrestre, suelo y pendiente en la cuenca. Esto acrecienta la precisión y proporciona una excelente representación física del balance hídrico (Neitsch el al., 2009). SWAT propone una ecuación para el equilibrio hídrico de suelos, cuyos parámetros diarios son el contenido final de agua en el suelo “SWt” (mm), contenido inicial de agua del suelo “SW0” (mm), tiempo “t” en día “i”, cantidad de precipitación “Rday” (mm), cantidad de escorrentía superficial “Qsurf” (mm), cantidad de evapotranspiración “Ea” (mm), cantidad de agua percolada en el perfil del suelo “Wseep” (mm), y cantidad de flujo retornado “Qgw” (mm).

[44]. *Ecuación de equilibrio del agua por SWAT*

$$\mathrm{SWt} = \mathrm{SW0} + \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{t=i}} (\mathrm{Rday} - \mathrm{Qsurf} - \mathrm{Ea} - \mathrm{Wseep} - \mathrm{Qgw})$$

SWAT emplea un modelo desarrollado por Nicks (1974) para generar las lluvias diarias en simulaciones, así como para completar los registros medidos que presenten datos faltantes. Este modelo, que sigue un enfoque de primer orden en la cadena de Markov, define un día como lluvioso o seco al comparar números aleatorios (comprendidos entre 0.0 y 1.0) que generan posibilidades mensuales. En caso de que el día se clasifique como lluvioso, la cantidad de lluvia será sesgada o se determinará mediante una distribución exponencial modificada.

En cuanto a la evaluación de la ETP, el SWAT ofrece tres opciones: según Hargreaves, Hargreaves y Riley (1985), Priestley y Taylor (1972), Penman (1948) y Monteith (1965). Cualquiera de ellas proporciona una proporción de la evaporación y la transpiración que ocurre en una superficie uniformemente protegida con vegetación en desarrollo y que tiene acceso al agua terrestre, asumiendo que no está afectada por el microclima.

La escorrentía superficial, es el flujo que se produce sobre una superficie inclinada con ayuda de la lluvia. El SWAT supone los contenidos de escorrentía para cada HRU, usando el método modificado de curvas numéricas del SCS

(USDA-SCS, 1972). En este método, la gráfica no es lineal con el contenido de humedad del suelo, ya que los límites para la humedad aprovechable son la capacidad de campo “CC” y el punto de marchitez permanente “PMP”.

Al calcular la tasa final de infiltración, SWAT resta el volumen de escorrentía superficial de la cantidad de precipitación y luego mide el volumen hídrico ingresado al perfil terrestre. El método de infiltración que utiliza el software, desarrollado por Green y Ampt, simula claramente la infiltración, aunque solicita información de lluvia en un pequeño intervalo de tiempo (Green y Ampt, 1911).

- **Sensibilidad, calibración, validación e incertidumbre del SWAT**

SWAT cuenta con funciones de auto calibración y análisis de sensibilidad, aunque su confiabilidad y credibilidad descansan en los datos pertinentes para llevar a cabo una calibración y validación exhaustiva (Neitsch et al., 2009). La calibración implica ajustes entre los escurrimientos impartidos y los calculados, lo que requiere la modificación de datos relevantes de los parámetros que ejercen mayor influencia. Por otro lado, la validación del modelo de SWAT implica una comparación entre los escurrimientos calculados y aquellos estipulados en la cailbración, pero durante un período estipulado que difiere de ésta (Torres et al., 2005). Para optimizar estas etapas, Abbaspour (2009) sugiere incorporar CUP (Calibration and Uncertainty Procedures), a fin de facilitar el proceso de análisis de sensibilidad, calibración,validación e incertidumbre.

Para calibrar los parámetros de caudal con precisión, Yacoub y Pérez Foguet (2011) recomiendan realizar un análisis de sensibilidad previo, el cual permitiría identificar los parámetros que deben ser ajustados y optimizar el tiempo de procesamiento aprovechando aquellos parámetros que sean sensibles e independientes. El análisis de sensibilidad determina la relación entre la variación de los inputs y los outputs del modelo, con el fin de reducir el número de parámetros que deban ser modificados durante la calibración (Van, Francos, y Bauwens, 2002). La calibración, por su parte, evalúa la similitud entre las variables simuladas y las observadas, y existen varios índices estadísticos que permiten realizar comparaciones precisas, como el coeficiente de correlación de Pearson, el coeficiente de determinación y el coeficiente de eficiencia de Nash y

Sutcliffe (1970). Si se detecta alguna desviación significativa, es necesario ajustar los parámetros más significativos del modelo mediante una serie de análisis de sensibilidad realizados con la herramienta SWAT-CUP (Abbaspour, 2009). Este proceso se debe repetir hasta que los resultados de la comparación sean satisfactorios. Una vez que se haya calibrado adecuadamente el modelo, se procede a su validación utilizando una muestra de datos que no se hayan empleado en la calibración.

La validación de un modelo implica generalizar su alcance y, por ende, sus resultados al cambiar algunas de las situaciones fundamentales del modelo ensayado (Baldasano, 2010).

La incertidumbre se refiere al nivel de precisión con el que un modelo simula la realidad, es decir, el nivel de arreglo entre la información simulada y los datos reales del sistema que se está modelando. Para evaluar la incertidumbre, es necesario comparar la información simulada por el modelo con los verdaderos datos del régimen analizado, lo que se consigue mediante diversas tecnologías estadísticas y gráficas (López, 2012). Al finalizar el modelo SWAT, este arroja una serie de resultados, entre esos es el ciclo hidrológico, del cual se obtiene el balance hídrico (ver Figura 26).

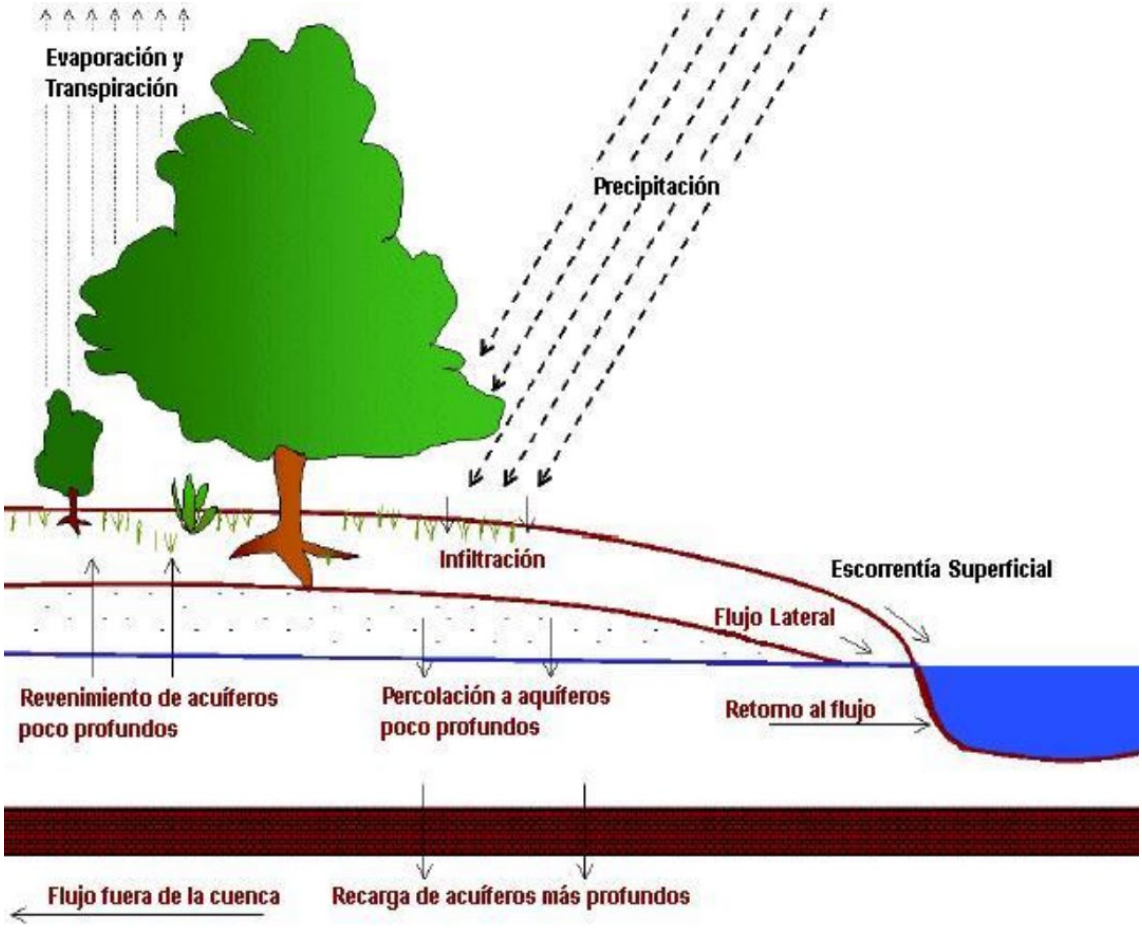


Figura 26. *Ciclo hidrológico de SWAT*

Fuente: Torres et al. (2005)

2.11 Geomática

En 1981, un agrimensor-geómetra quebequense llamado Paradis acuñó la palabra geomática en un artículo publicado en la revista "Le géomètre canadien". Él argumentó que, en la salida del siglo XX, la necesidad de tener información geoespacial alcanzaría niveles sin precedentes en la historia, y que para satisfacer dicha necesidad sería esencial integrar las disciplinas tradicionales de la agrimensura con los medios y métodos modernos para la captación, tratamiento, almacenamiento y difusión de datos en una nueva disciplina. Según Orellana y Ballari (2009), la geomática es una fusión favorable de la geografía e informática que se podría equiparar con el término geoinformática. Este campo permite mejorar la gestión de los espacios territoriales a través de la utilización de herramientas y programas computacionales.

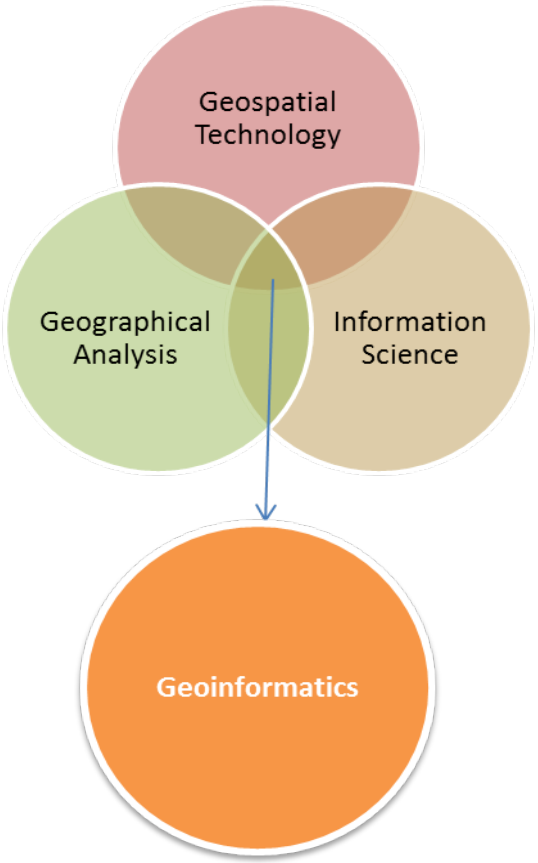


Figura 27. *Geomática o Geoinformática*

Fuente: Fernandez y Gil (2012)

Fernández y Gil (2012) coinciden en que la geomática deriva de las palabras "geo" (referente a la Tierra) y "mática" (referente a la informática), y es multidisciplinaria, ya que abarca todas las áreas relacionadas con el análisis superficial terrestre (como la agrimensura, cartografía, teledetección y los sistemas de información geográfica) mediante la integración y aplicación de tecnologías de la información y la comunicación (TIC), como satélites, drones, sensores y software específicos, utilizados para el proceso de información alfanumérica y gráfica.

Las principales herramientas geomáticas se clasifican en dos: Diseño asistido por computador “CAD” y Sistemas de Información Geográfica “GIS” (ver Figura 28). Por lo habitual, la primera herramienta, permite elaborar planos a escala grandes (representación en la que el objeto real ha tenido que reducirse poco), pudiendo trabajar con archivos vectoriales (puntos, líneas y polígonos); y la segunda herramienta, permite elaborar mapas a escala pequeña (representación

en la que el objeto real ha tenido que reducirse mucho), pudiendo trabajar con archivos vectoriales y raster (imágenes provistas por la teledetección y/o fotogrametría).

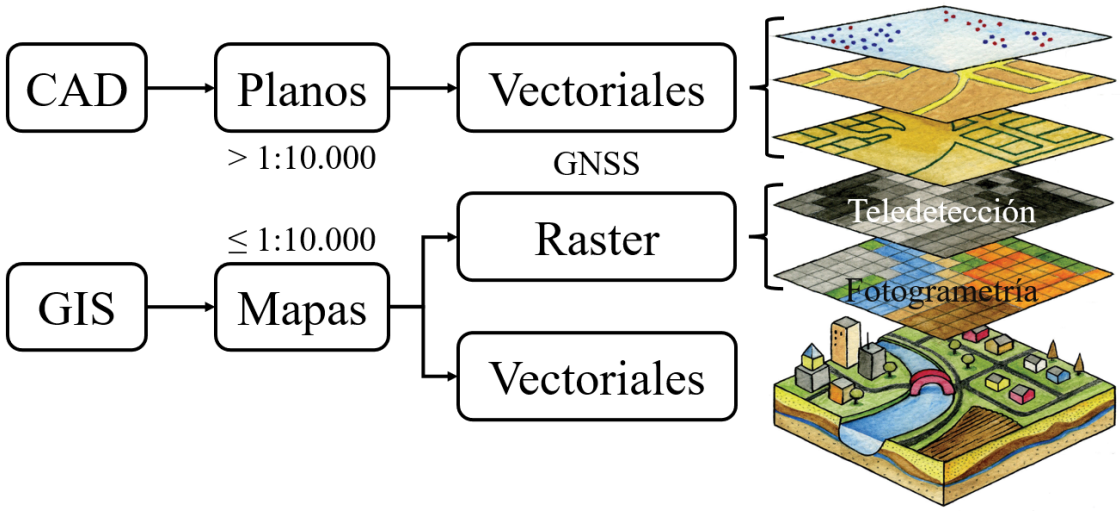


Figura 28. *Principales herramientas geomáticas*

2.11.1 Diseño asistido por computadora

El CAD (Diseño Asistido por Computadora), popularmente conocido como Diseño Asistido por Ordenador, se refiere al uso de computadores para crear, modificar, analizar y optimizar diseños. El desarrollo inicial del CAD se atribuye en gran parte al ingeniero francés Pierre Bézier, quien estudió en la prestigiosa Escuela Nacional Superior de Artes y Oficios (Arts et Métiers ParisTech) del Instituto Tecnológico de París. Él desarrolló los principios fundamentales del CAD con su programa UNISURF en 1966, según Rojas y Rojas (2006). La herramienta CAD se divide en programas de dibujo 2D y de modelado 3D. Las diferencias entre un diseño asistido por computadora (CAD) y un SIG, radica en que los CAD permiten desarrollar información de tipo vectorial en 2 y/o 3 dimensiones con formato de archivo informático de dibujo computarizado (DWG). A diferencia de los SIG que procesan información de tipo vectorial y ráster 2-3 dimensiones, además de integrar una Base de Datos (Matt Ball, 2009).

2.11.2 Sistemas de Información Geográfica

Roger Tomlinson (“padre del GIS”) diseñó el primer SIG a mediados de los años 1960, llamado CGIS (*Canada Geographic Information System*) aplicado a la

gestión de sistemas ecosistémicos. Todo gracias a la teledetección, la cual ha tenido un papel importante en los SIG, como fuente de tecnología y datos, ya que los primeros satélites fueron desarrollados en los años 1950. Desde entonces, varias cosas interesantes han pasado en la corta historia de los SIG (URISA, 2017). Bolstad (2016) expresa que los GIS están compuestos por cinco elementos primordiales, así se aprecia en la Figura 29. El contexto de estos elementos se define mediante software tecnológico que requiere, y se complementa con, hardware potente, ya que se usan herramientas complejas para el proceso de información numérica y gráfica. Los métodos proporcionados por los GIS permiten la captura, manipulación, almacenamiento, análisis y visualización de información geoespacial. Siendo condición *sine qua non* las personas capacitadas para obtener el máximo provecho posible.

Figura 29. *Componentes de los SIG*

Fuente: Bolstad (2016)

2.11.3 Teledetección

Pérez Navarro (2011) indica que la detección a distancia (teledetección) es la técnica de observar remotamente la atmosfera y la tierra, a través de la interacción con sensores (cámaras fotográficas, escáner multiespectral, radar, etc.), los cuales captan la radiación electromagnética de los objetos. Dichos sensores son portados por plataformas terrestres (aviones, drones, globos,

helicópteros, etc.) y extraterrestres (estaciones orbitales, satélites, naves espaciales, etcétera).

Con respecto a su fuente, existen tres tipos de radiación electromagnética: la radiación solar reflejada por objetos, que incluye la luz visible y el infrarrojo reflejado; la radiación terrestre emitida por objetos en forma de infrarrojo térmico; y la radiación emitida por sensores y reflejada por objetos, conocida como radar. Se denomina teledetección pasiva a las técnicas que se basan en los dos primeros tipos, mientras que la teledetección activa se refiere al uso de la última (Chuvieco, 1990).

La Teledetección es una técnica de detección y medición de características de un objeto distante que se ha utilizado en diversas áreas para la creación de mapas temáticos, los cuales tienen como objetivo principal describir el terreno. Esta ciencia se basa en el uso de energía electromagnética emitida o reflejada. Históricamente, la información se obtenía a través de la fotografía aérea (desde 1858, cuando se tomó la primera fotografía aérea desde un globo). Actualmente, esta técnica ofrece instrumentos para la observación del universo mediante las longitudes de onda, mayor que las del espectro visible, desplegados en satélites y aviones (Pérez y Muñoz, 2006).

Para la clasificación de tierras existe gran cantidad de información espacial descriptiva, cuyos procedimientos son ideales para ser instrumentados por un SIG. La clasificación de tierras con fines agropecuarios se sustenta con: Características y cualidades cartográficas de tierras, exigencias agroecológicas, manejo y uso terrestre (Flores y Parra, 1997).

Un estudio multitemporal tiene como finalidad descubrir cambios entre dos períodos de tiempo previamente establecidos, identificando los cambios en el entorno físico que puedan ser causados por factores naturales o antropológicos, así como las posibles repercusiones (Chuvieco, 1990). La idea es que, mediante la comparación de imágenes capturadas en distintas fechas, se pueda deducir los cambios del ambiente y/o las posibles consecuencias de la actividad antrópica en dicho ambiente, para así planificar medidas adecuadas que eviten su deterioro o aseguren su mejor conservación (González et al., 1992).

La clasificación supervisada es realizada por un operador (preferiblemente familiarizado con el área de interés), el cual define las firmas espectrales por clases, identificando áreas muestreadas (“puntos de control”) (Chuvieco, 2002). Dicho método supervisado permite delimitar áreas representativas sobre una imagen. En bibliografía anglosajona las áreas de entrenamiento se denominan, training fields (Chuvieco, 2010).

Las imágenes satelitales proveen información espacio - tiempo, donde los datos son cuantitativos y continuos para grandes superficies (Franco, 2017). A continuación (ver Tabla 21), se presentan el número de bandas, tamaño del píxel con la resolución espacial y los rangos del espectro con la resolución espectral de dos imágenes Landsat (5 y 8), correspondientes a los años 1990 y 2015:

Tabla 21. *Rango espacial y espectral de imágenes de Landsat 5 y 8*

Bandas de los satélites (sensor)		Resolución Espacial		Resolución Espectral	
Landsat 5 (TM)	**Landsat 8 (ETM+)**	**Landsat 5**	**Landsat 8**	**Landsat 5**	**Landsat 8**
	Band 1 (Coastal)		30 m		0.43 - 0.45 µm
Band 1 (Blue)	Band 2 (Blue)	30 m	30 m	0.45 - 0.52 µm	0.45 - 0.51 µm
Band 2 (Green)	Band 3 (Green)	30 m	30 m	0.53 - 0.60 µm	0.53 - 0.59 µm
Band 3 (Red)	Band 4 (Red)	30 m	30 m	0.63 - 0.69 µm	0.64 - 0.67 µm
Band 4 (NIR)	Band 5 (NIR)	30 m	30 m	0.76 - 0.90 µm	0.85 - 0.88 µm
Band 5 (SWIR1)	Band 6 (SWIR1)	30 m	30 m	1.55 - 1.75 µm	1.57 - 1.65 µm
Band 7 (SWIR2)	Band 7 (SWIR2)	30 m	30 m	2.08 - 2.35 µm	2.11 - 2.29 µm
	Band 8 (Pan)		15 m		0.50 - 0.68 µm
	Band 9 (Cirrus)		30 m		1.36 - 1.38 µm
Band 6 (Thermal)	Band 10 (TIR1)	120 m	100 m	10.40 - 12.50 µm	10.60 - 11.19 µm
	Band 11 (TIR2)		100 m		11.50 - 12.51 µm

Fuente: Earth Observing System (EOS, 2019)

2.11.4 Software ERDAS

ERDAS (siglas en inglés “Sistema de análisis de datos de los recursos de la tierra”), ahora propiedad y desarrollado por Hexagon Geospatial, una división de Intergraph, comenzó como un sistema de procesamiento para imágenes satelitales, liderando el análisis de datos espaciales en grandes áreas. El desarrollo del producto fue estimulado por el lanzamiento exitoso del satélite

Landsat de los EEUU en la década de 1970. Por primera vez, las imágenes digitales de toda la superficie terrestre estaban disponibles para el público (ERDAS, 1997).

El *software* ERDAS Imagine permite realizar una clasificación de usos y coberturas (suelo, agua, vegetación, etc.) con las imágenes (ver Figura 30), identificando las características terrestres basadas en el análisis multiespectral. Existen dos formas de clasificar los píxeles en diferentes categorías: Supervisados (guiados por el usuario) y no supervisados (procedimientos guiados por computadora). El modelo espectral contemporáneo en la información de cada píxel es utilizado como una fuente alfanumérica para la sistematización (Long y Srihann, 2004).

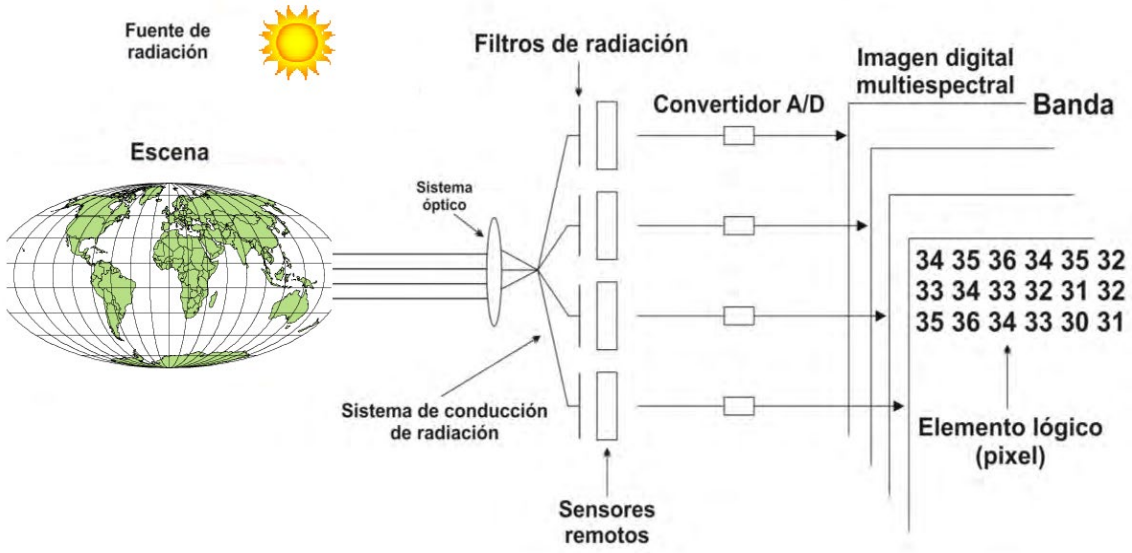


Figura 30. *Clasificación de imágenes en ERDAS*

Fuente: Jensen (1996)

2.11.5 Software IDRISI Selva

Eastman et al. (2012) explican que el software IDRISI fue desarrollado por la Universidad de Clark de Massachusetts (Clark Labs), recibiendo su nombre en honor al investigador musulmán “Abu Abd Allah Muhammed al-Idrisi” que vivió entre los años 1100 y 1166 A.C. Los autores indican que desde 1987, este programa ha sido utilizado en más de 175 países del mundo por profesionales multidisciplinarios involucrados en el cuidado ambiental, gracias a las herramientas geoespaciales que posee, que permiten el análisis y la

visualización de datos geoinformáticos digitales. Una de las características más notables de IDRISI en comparación con otros Sistemas de Información Geográfica (GIS) es que puede procesar imágenes para fines hidrológicos. De acuerdo con Eastman et al. (2012), IDRISI es un líder en funcionalidad analítica para ráster ya que posee la misma funcionalidad que los Sistemas de Información Geográfica (GIS), desde la gestión de las geodatabase y modelización espacio - temporal, hasta la mejora y sistematización de imágenes (ver Figura 31). Además, ofrece utilidades específicas para monitoreo y gestión ambiental, así como estudios temporales seriados del cambio y que apoyan la toma de decisiones con juicios multiobjetivo. También proporciona análisis de incertidumbre, modelos de simulación, interpolación de superficies y caracterización estadística para una mejor toma de decisiones.

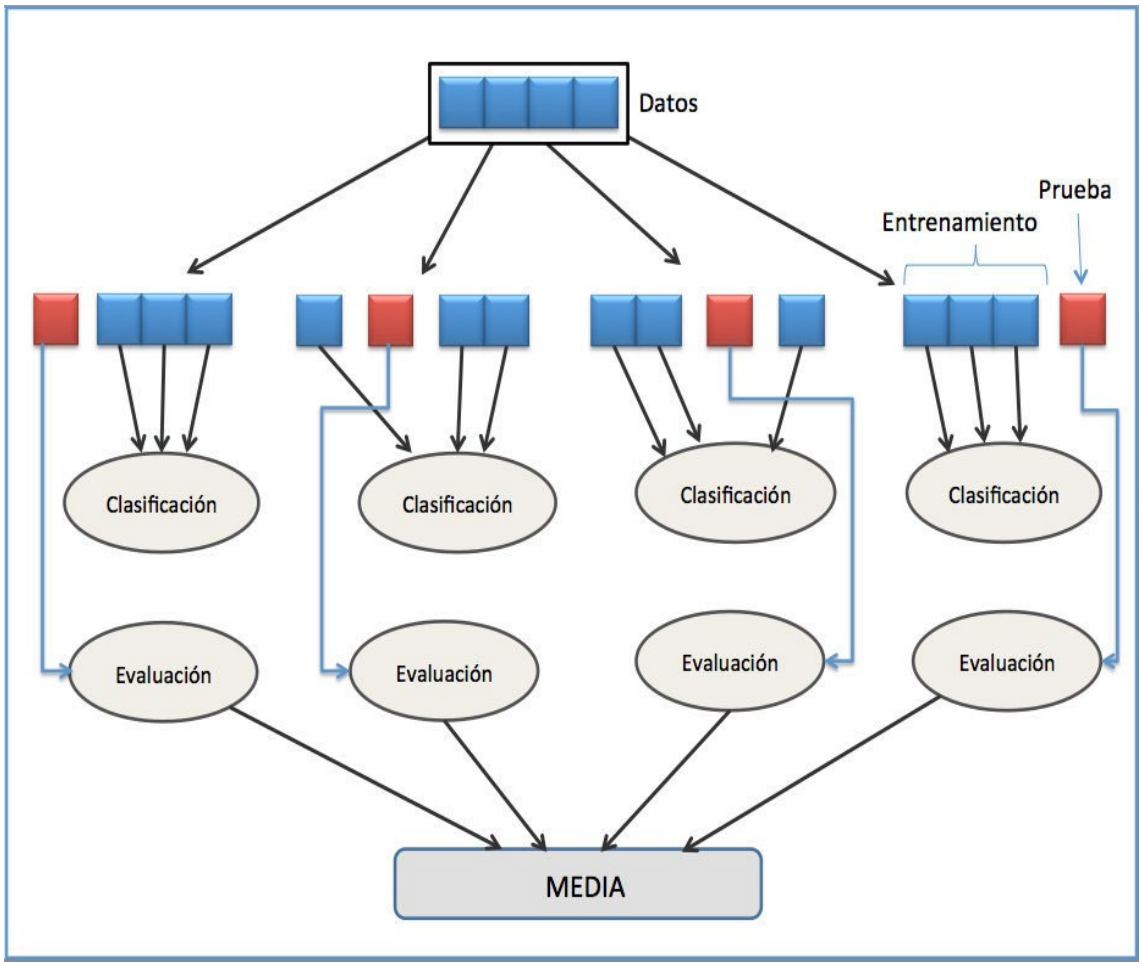


Figura 31. *Entrenamiento y validación en IDRISI*

Fuente: Fuller, Hardiono y Meijaard (2011)

2.11.6 Software ArcGIS

Bolstad (2016) indica que ArcGIS, en sus diversas versiones (escritorio, servidor o en línea), comprende el paquete de *software* GIS más popular (momento de la publicación). ESRI, el desarrollador de ArcGIS, con presencia mundial, lo viene perfeccionado desde inicios de 1980. Además del programa, ESRI también proporciona servicios sustanciales de capacitación, soporte y asesoramiento en oficinas regionales e internacionales (ver Figura 32). Diseñado para proporcionar un gran conjunto de geoprocesamiento, desde la entrada pasando por el análisis hasta las diversas formas de salida. Como tal, el producto es pesado, complejo y sofisticado, pero admite múltiples formatos, muchos tipos y estructuras de datos y, literalmente, miles de operaciones posibles que pueden aplicarse a la información espacial, por ende, se requiere previa capacitación para dominio del programa (Kennedy, 2013).

ArcMAP es el componente principal del conjunto de programas en ArcGIS, cuya utilidad principal es el geoprocesamiento espacial de datos alfanumérico y gráfico, para la obtención de mapas temáticos. Pero el plus que lo hace destacar entre otros *softwares* es la compatibilidad con herramientas ingenieriles, uno de ellos es el SWAT el cual se encarga de evaluar el suelo y agua, integrando la geomática (Neitsch et al., 2009).

Figura 32. *Interfaz gráfica de ArcGIS*
Fuente: Franco (2017)

2.12 Gestión integral y sostenible de cuencas hidrográficas

El principal objetivo de la gestión o manejo integral de cuencas consiste en lograr el uso racional de los medios naturales, ya que el ser humano ejerce un papel esencial en el deterioro o la sostenibilidad ambiental, tal como sostienen García, Alvira, Alonso y Escobar (2016). La planificación en el enfoque del manejo completo de hoyas hidrográficas, porque pretende encontrar las principales alternativas de explotación, administración y mantenimiento de la riqueza natural, con base en la situación actual y los problemas que enfrenta los sistemas hídricos; en dicha gestión, la sociedad debe participar activamente, según señalan Forbes y Hodges (1971).

Para llevar a cabo un plan de gestión integral, es necesario evaluar los impactos de la cuenca, tanto positivos como negativos, y analizar las características equilibradas entre los aspectos social, económico y ambiental. Se deben establecer acciones concretas orientadas al mantenimiento y preservación del medio natural a lo largo del tiempo, mientras se promueve el desarrollo sostenible de los asentamientos, de acuerdo con Soria y Chebez (2001). La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es una sucesión de acciones dirigidas a minimizar el impacto negativo y maximizar el impacto positivo del aprovechamiento de los recursos primarios. Es importante que dicha extracción se realice de forma racional y equitativa, buscando siempre la sostenibilidad ambiental, como indica Ramakrishna (1997).

Ramírez López (2015) presenta opciones para lograr una gestión sostenible de la subcuenca del río Pitura, ubicada en la provincia de Imbabura, Ecuador. Para lograr esto, se llevó a cabo una determinación biofísica y socioeconómica de la zona, que identificó las características y problemáticas del sitio estudiado. Los problemas transcendentales fueron la poca organización de uso del territorio, lo cual afecta los ecosistemas naturales, y un mal administración de las acciones agrícolas que se basan en la ganadería. Con base en esta caracterización, se elaboró un plan de manejo con programas y proyectos que ayudarán a solucionar los problemas observados en la subcuenca. La propuesta busca la conservación

integral de los recursos para mejorar su administración y el desarrollo comunitario.

Tucci (2009) propone un plan de gestión integrado del recurso agua para Ecuador siendo trascendental para el progreso nacional. Sin embargo, el autor señala que los principales problemas relacionados con este recurso son de tipo social y ambiental, como la falta de procedimiento para las aguas residuales y la vulnerabilidad ante desastres naturales. Según el GWP (2009, p.20), el Manejo Integral del Agua es un asunto que busca promover la gestión y progreso ordenado del recurso fluvial en interacción con otros recursos naturales. El objetivo es extender el bien socioeconómico de modo equitativo sin complicar la sostenibilidad de los sistemas existentes.

2.13 Prácticas para conservación de los suelos

La erosión hídrica del suelo es la forma más extendida de desgaste en todo el mundo y siendo analizada como una de las principales amenazas para los servicios ecosistémicos del suelo. Aunque dicha erosión no puede evitarse totalmente, puede reducirse a un nivel máximo aceptable, o desarrollarse una tolerancia, aplicando técnicas de conservación del suelo, utilizado en todo el mundo para alterar positivamente procesos naturales (Xiong, et al 2018). Elegir las medidas adecuadas para mantener la erosión del suelo dentro de rangos tolerables es un componente esencial de la gestión sostenible del suelo (FAO [Food and Agriculture Organisation], 2016). Ha sido bien estudiada y se centran en la efectividad de ciertas prácticas que se clasifican en tres grupos: biológicas (forestación, regeneración natural); manejo de tierras (labranza cero y recuperación de tierras) e ingeniería (arado, plantación en líneas de contorno, terrazas, riego y drenaje). Las eficientes alternativas para la preservación edáfica deben centrarse en los modelos espaciales de la cobertura vegetativa que reduce la conectividad entre sedimentos; y la relación entre laderas y transferencia de sedimentos en canales erosionados (García-Ruiz et al., 2017).

3 MARCO CONTEXTUAL

3.1 Localización

La investigación se enfocó en la cuenca hidrográfica del río Vinces cuya extensión es de 4,600.00 km² aproximadamente, ubicada en el centro oeste del Ecuador entre las coordenadas proyectadas UTM “X/Y” (Este/Norte): 630000m / 9980000m y 740000m / 9780000m; coordenadas geográficas (Longitud/Latitud): 79º49'54.475"W / 0º10'51.27"S y 78º50'32.645"W / 1º59'20.334"S (ver Figura 33). Cabe mencionar que diez cantones son influenciados directamente por la subcuenca (Santo Domingo; Pujilí, Sigchos, La Maná; Buena Fe, Valencia, Quevedo, Mocache, Palenque, Vinces), distribuidos en tres provincias: Santo Domingo de los Tsachilas, Cotopaxi y Los Ríos (ver Figura 34), este último es quien posee más territorio en la subcuenca. A continuación, en las siguientes figuras se muestran mapas de ubicación del área de estudio:

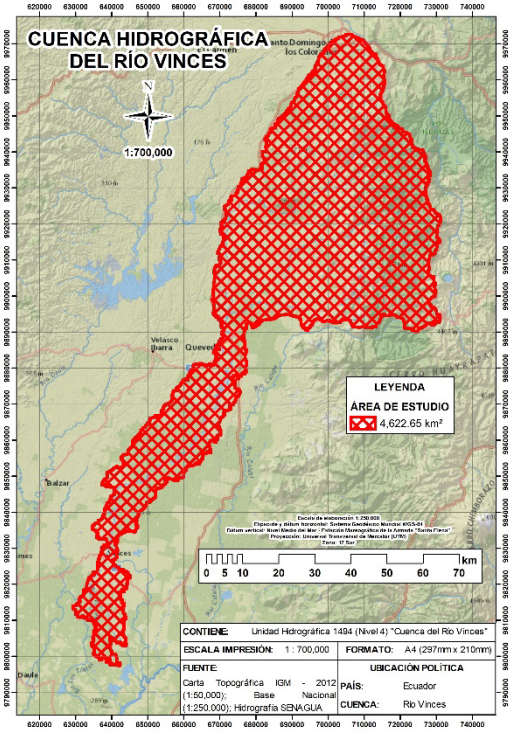


Figura 33. *Cuenca del río Vinces*

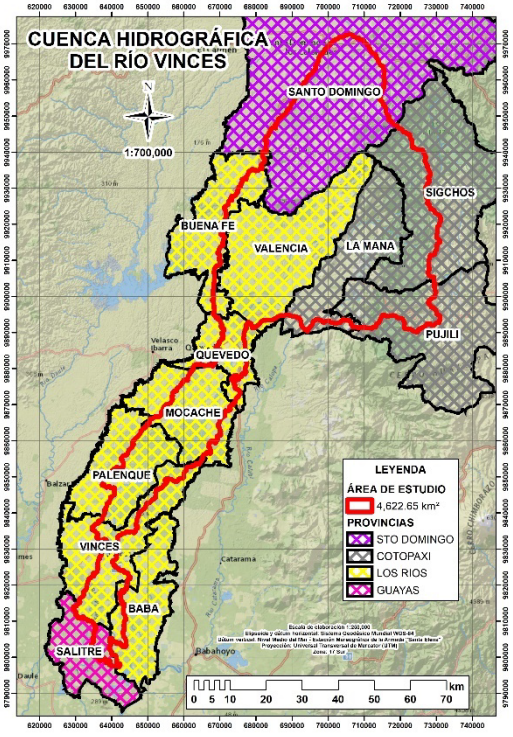


Figura 34. *Cantones en la cuenca*

3.2 Clima

El área de estudio (cuenca hidrográfica del río Vinces) posee un rango en temperatura de 5.30-25.60ºC, precipitación de 768-2831mm, radiación solar de 11642-16013kJ/m²/día, y velocidad del viento de 1.30-4.02m/s. A continuación, en las siguientes figuras (35-38) se muestran los distintos elementos del clima:

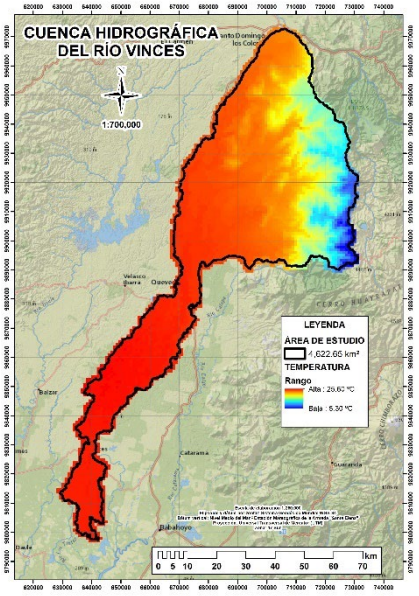


Figura 35. *Temperatura media*

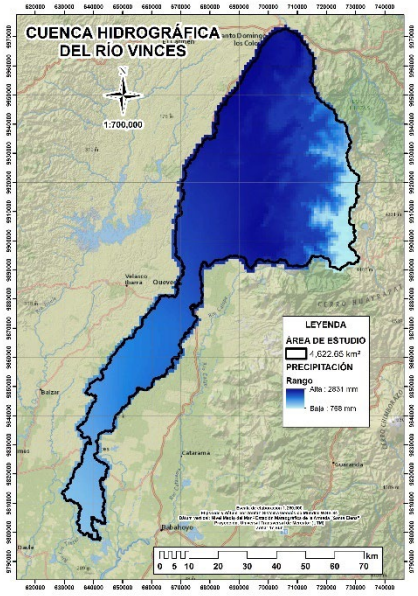


Figura 36. *Precipitación media*

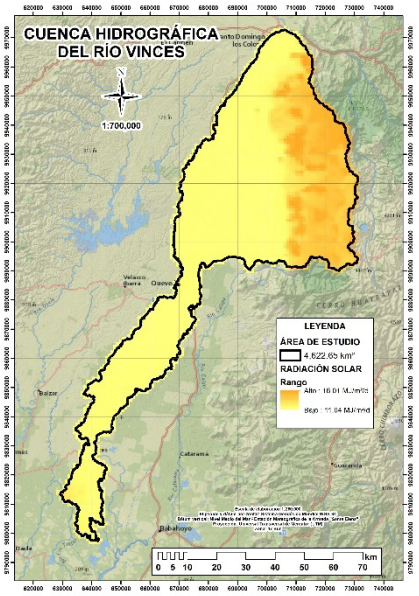


Figura 37. *Radiación solar media*

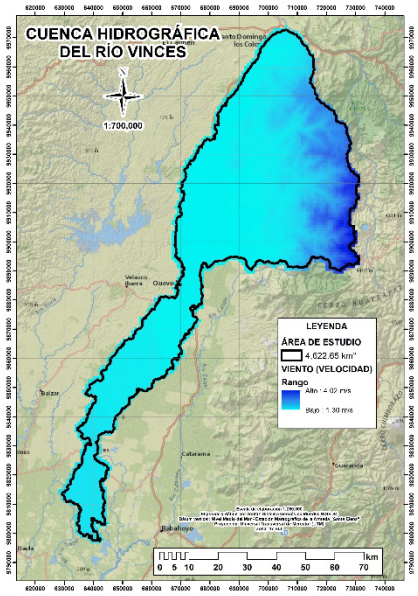


Figura 38. *Velocidad del viento*

3.3 Hidrografía

La cuenca del río Vinces está conformada por varios afluentes (tributarios), los cuales toman diferentes nombres a lo largo de su recorrido, desde el norte inicia como río Baba, río Lulo y río San Pablo, los cuales forman al río Quevedo, donde aguas abajo toma el nombre de río Mocache y en la desembocadura de la cuenca, el río toma el nombre del cantón que atraviesa “Vinces” (ver Figura 39). Es importante destacar que esta cuenca es una de las siete que forman la cuenca exorreica (cuyas aguas van hacia el mar) del río Guayas. El río Guayas es el sistema fluvial más relevante de la costa sudoccidental del Pacífico y su red de drenaje se origina en las derivaciones occidentales de la Cordillera de los Andes y en la vertiente oriental de la Cordillera Costanera Chongón-Colonche. Los ríos Daule y Babahoyo son parte de esta red y se unen a cinco kilómetros de la ciudad de Guayaquil para formar el río Guayas (ver Figura 40). A continuación, en las siguientes figuras se muestran mapas hidrográficos:

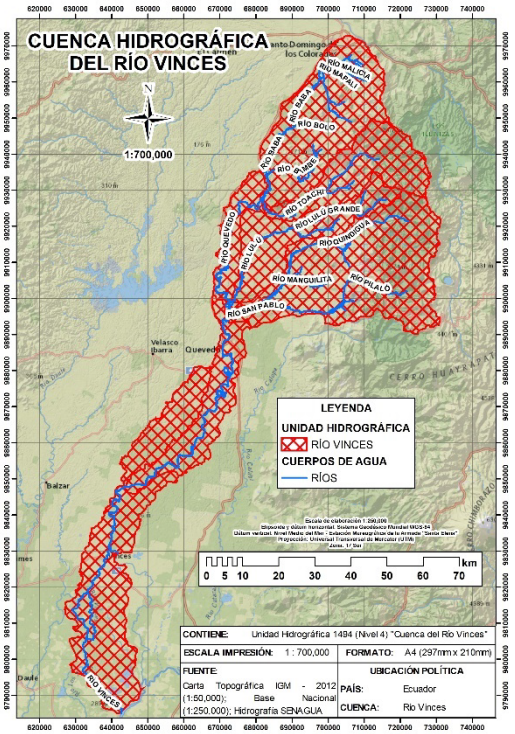


Figura 39. *Ríos de la cuenca*

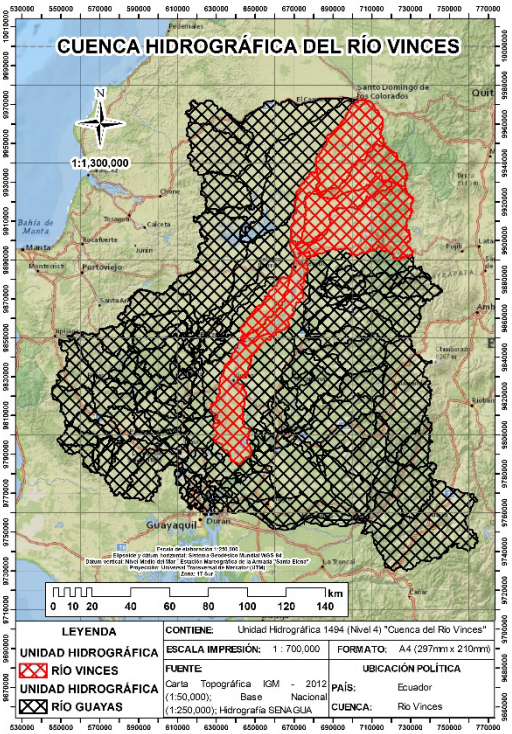


Figura 40. *C. del Rio Guayas*

3.4 Geología y geopedología

La geología preponderante de la cuenca es la Formación Macuchi, cuya Edad es Paleoceno-Eoceno (ver Figura 41); la orografía va desde los 0 msnm hasta 33.33 msnm (ver Figura 42); la geopedología que destaca es andisoles (ver Figura 43) y la textura dominante es franco (ver Figura 44).

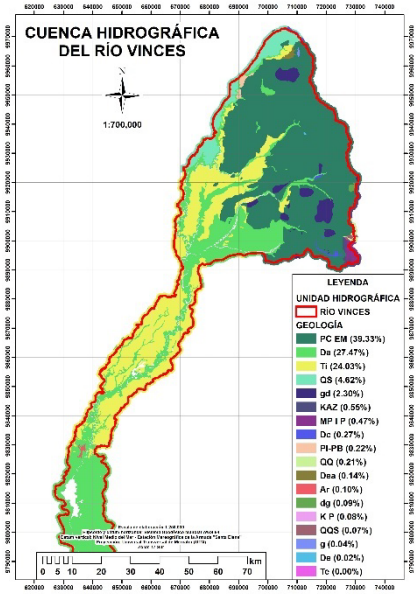


Figura 41. *Geología*

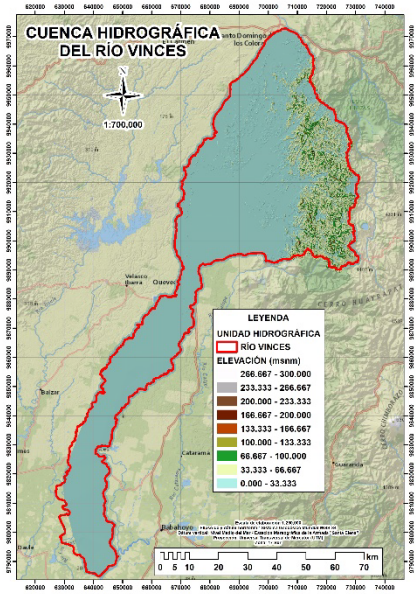


Figura 42. *Orografía*

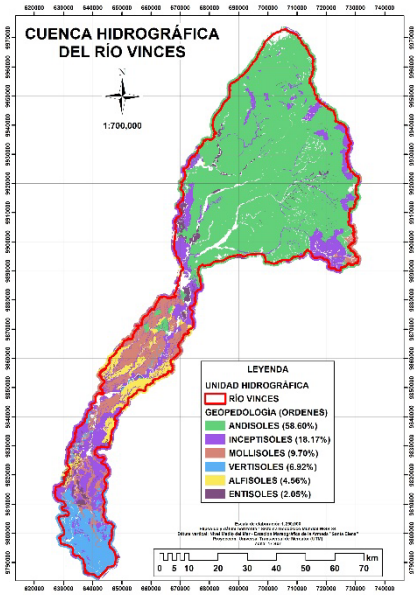


Figura 43. *Geopedología*

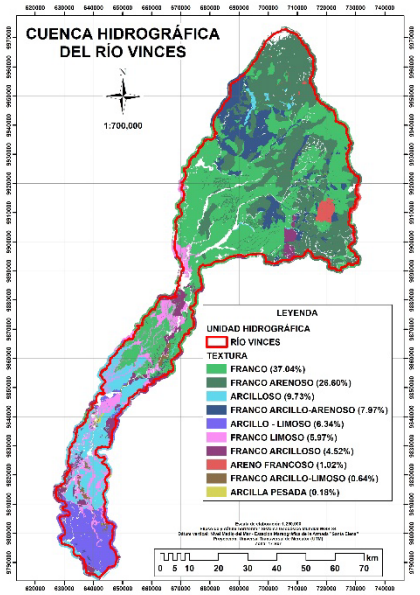


Figura 44. *Textura*

4 RESULTADOS

4.1 Geomorfología de la cuenca del río Vinces

Según los resultados obtenidos de la evaluación geomorfológica del río Vinces (ver Tabla 22) indica un área de 4,716.94 kilómetros cuadrados agrupándose como cuenca según INEFAN (1995); una pendiente accidentada según Strahler (1957) ya que su valor es 15.89%; la relación de elongación (0.25) indica que posee un fuerte relieve según Schumm (1956); el Índice de compacidad (3.53) por gravelius, la Relación de circularidad (0.08) por Miller y Factor de forma (0.05) por Horton coinciden que es una cuenca rectangular y alargada; la Relación hipsométrica (1.40) indica que la cuenca es sedimentaria según Strahler (1952); Cabe mencionar que la Pendiente media del cauce principal es sueve (2.09%); Coeficiente de sinuosidad hidráulico indica que su cauce es irregular (1.87) pudiendo encontrarse meandros en su curso según Schumm (1956) y Mueller (1968); y según Témez (1991) y Vélez (2011) el tiempo concentración medio (33.79) de la cuenca es lento, pero hay que considerar la envergadura de la misma.

A continuación, en la Figura 45 se muestra el perfil longitudinal del cauce principal obtenida en la simulación morfométrica con IDRISI, la cual indica que la cuenca posee una pendiente pronunciada al inicio, es suaviza aproximadamente a los 50 kilómetros de recorrido.

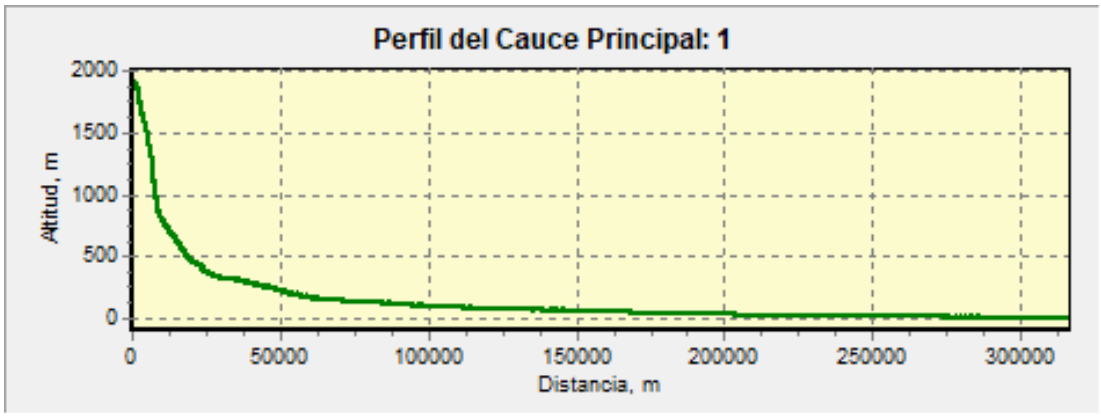


Figura 45. *Perfil del cauce*

A continuación, en la Tabla 22 se muestra las características morfométricas de la cuenca obtenidas en IDRISI:

Tabla 22. *Características morfológicas de la cuenca por IDRISI*

Parámetros	Datos		Interpretación
Área del recurso hídrico (A)	4,716.94	km²	Cuenca
Perímetro de la cuenca (P)	859.86	km	
Elevación máxima de la cuenca (Hmax)	4,140.00	msnm	
Elevación mínima de la cuenca (Hmin)	0.00	msnm	
Elevación media de la cuenca (Hmed)	1,341.07	msnm	
Coeficiente de masividad (Cm) por Martonne	0.44		Muy montañosa
Coeficiente orográfico (Co) por Martonne	15.85	%	Accidentado
Gradiente media de la cuenca (Sc)	9.03	°	
Pendiente media de la cuenca (Sc)	15.89	%	
Relación de elongación (Re) por Schumm	0.25		Fuerte relieve
Índice de compacidad (Kc) por gravelius	3.53		Rectangular
Relación de circularidad (Cc) por Miller	0.08		Alargada
Factor de forma (Fc) por Horton	0.05		Muy alargada
Relación hipsométrica (RH)	1.40	(C)	Cuenca erosionada
Longitud máxima del cauce principal (Lmcp)	316.31	km	
Longitud directa del cauce principal (Ldcp)	168.93	km	
Elevación máxima del cauce principal (Hmaxcp)	1927.00	msnm	
Elevación mínima del cauce principal (Hmincp)	5.00	msnm	
Elevación media del cauce principal (Hmedcp)	966.00	msnm	
Gradiente media del cauce principal (Scp)	1.20	°	Suave
Pendiente media del cauce principal (Scp)	2.09	%	
Coeficiente de sinuosidad hidráulico (Shcp)	1.87		Canal irregular
Tiempo concentración (Tc) por SCS	39.84	horas	
Tiempo concentración (Tc) por CHPW	39.83	horas	
Tiempo concentración (Tc) por Kirpich	39.62	horas	
Tiempo concentración (Tc) por Chow	38.84	horas	
Tiempo concentración (Tc) por Témez	26.20	horas	
Tiempo concentración (Tc) por Valencia y Zuluaga	18.39	horas	
Ecuación de erosividad por Fournier	1.99	t/ha/a	Muy bajo
Orientación de la cuenca	N - S		Insolación desigual

A continuación, en la Figura 46 se muestra la curva hipsométrica obtenida en la simulación morfométrica con IDRISI, la cual indica que la cuenca es tipo C “ríos viejos”, siendo sedimentaria, cuyo estado es erosionado (ver Anexo C).

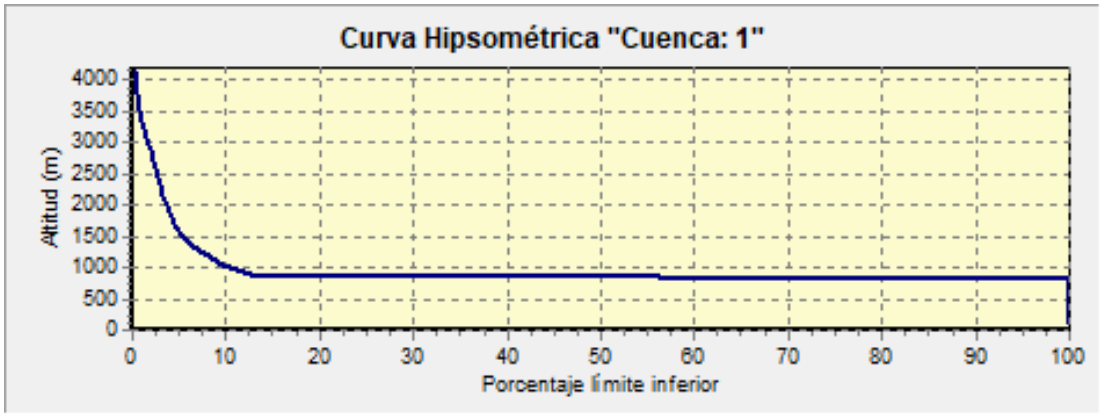


Figura 46. *Curva hipsométrica*

En la jerarquización de la cuenca hidrográfica del río Vinces (ver Figura 47), se puede apreciar que la densidad de drenaje es muy baja (ver Anexo F), lo que indica que es una cuenca pobremente drenada con una respuesta hidrológica muy lenta, con potencial a crecidas bajas y caudal medio muy alto.

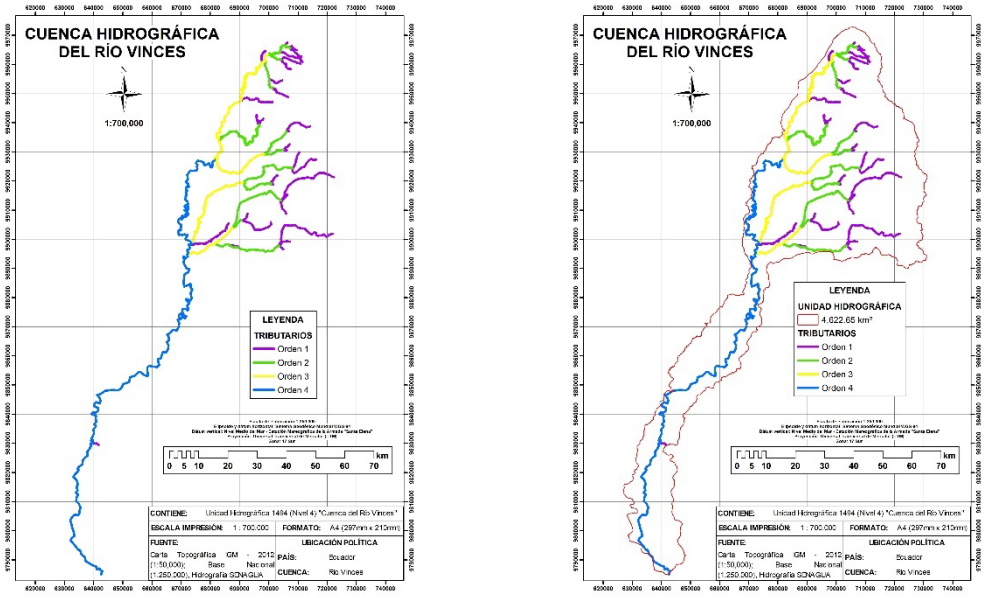


Figura 47. *Tributarios de la cuenca hidrográfica del río Vinces*

4.2 Hidroclimatología de la cuenca del río Vinces

Según los resultados obtenidos del análisis ofimático en HYDROGNOMON, para conocer la DISTRIBUCIÓN TEÓRICA DE PROBABILIDAD que mejor se ajusta a los datos anuales de precipitación máxima en 24 horas de la estación M0006, y en función de la prueba estadística Chi-cuadrado (Anexo L) y Kolmogorov-Smirnov (Anexo M), es una distribución NORMAL. Cabe mencionar que N = 24,

Rango = 98.70 y el Número de clase = 5.23 ≅ 5. Lo cual permite obtener la Curva IDF para distintos periodos de retorno máximos (ver Tabla 26):

Tabla 23. *Precipitaciones diarias máximas probables para M0006*

Periodo de Retorno	Precipitación	Probabilidad de ocurrencia	Corrección de intervalos fijos
T	**P**	**F (P)**	**1.13 P**
2 años	128.80 mm	50.00%	145.55 mm
5 años	153.59 mm	80.00%	173.55 mm
10 años	166.54 mm	90.00%	188.19 mm
25 años	180.35 mm	96.00%	203.80 mm
50 años	189.28 mm	98.00%	213.88 mm
100 años	197.30 mm	99.00%	222.95 mm
500 años	213.55 mm	99.80%	241.31 mm

Tabla 24. *Precipitaciones máximas para M0006*

Tiempo de duración "D"	Coeficiente	Años						
		2	**5**	**10**	**25**	**50**	**100**	**500**
24 horas	100%	145.55	173.55	188.19	203.80	213.88	222.95	241.31
18 horas	91%	132.45	157.93	171.25	185.46	194.63	202.89	219.60
12 horas	80%	116.44	138.84	150.55	163.04	171.11	178.36	193.05
8 horas	68%	98.97	118.02	127.97	138.58	145.44	151.61	164.09
6 horas	61%	88.78	105.87	114.80	124.32	130.47	136.00	147.20
5 horas	57%	82.96	98.92	107.27	116.17	121.91	127.08	137.55
4 horas	52%	75.69	90.25	97.86	105.98	111.22	115.94	125.48
3 horas	46%	66.95	79.83	86.57	93.75	98.39	102.56	111.00
2 horas	39%	56.76	67.69	73.39	79.48	83.41	86.95	94.11
1 horas	30%	43.66	52.07	56.46	61.14	64.16	66.89	72.39

Tabla 25. *Intensidad de la lluvia para M0006*

Tiempo de duración	Intensidad de la lluvia en función del Periodo de Retorno "I" (mm/h)						
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 horas	6.06	7.23	7.84	8.49	8.91	9.29	10.05
18 horas	7.36	8.77	9.51	10.30	10.81	11.27	12.20
12 horas	9.70	11.57	12.55	13.59	14.26	14.86	16.09
8 horas	12.37	14.75	16.00	17.32	18.18	18.95	20.51
6 horas	14.80	17.64	19.13	20.72	21.74	22.67	24.53
5 horas	16.59	19.78	21.45	23.23	24.38	25.42	27.51
4 horas	18.92	22.56	24.46	26.49	27.80	28.98	31.37
3 horas	22.32	26.61	28.86	31.25	32.80	34.19	37.00
2 horas	28.38	33.84	36.70	39.74	41.71	43.48	47.06
1 horas	43.66	52.07	56.46	61.14	64.16	66.89	72.39

Tabla 26. *Curva IDF (Intensidad - Duración - Frecuencia) para M0006*

T	Tiempo de duración de la precipitación "t" (mm/h)											
	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min	55 min	60 min
2 años	220.51	143.84	112.03	93.83	81.77	73.08	66.45	61.20	56.92	53.34	50.29	47.67
5 años	238.84	155.80	121.35	101.63	88.57	79.15	71.98	66.29	61.65	57.77	54.48	51.63
10 años	253.72	165.50	128.90	107.96	94.08	84.08	76.46	70.42	65.49	61.37	57.87	54.85
25 años	274.82	179.27	139.62	116.94	101.91	91.08	82.82	76.28	70.94	66.48	62.68	59.41
50 años	291.94	190.43	148.32	124.22	108.26	96.75	87.98	81.03	75.35	70.62	66.59	63.11
100 años	310.12	202.29	157.56	131.96	115.00	102.78	93.46	86.08	80.05	75.01	70.73	67.04
500 años	356.83	232.76	181.29	151.83	132.32	118.26	107.54	99.04	92.10	86.31	81.39	77.14

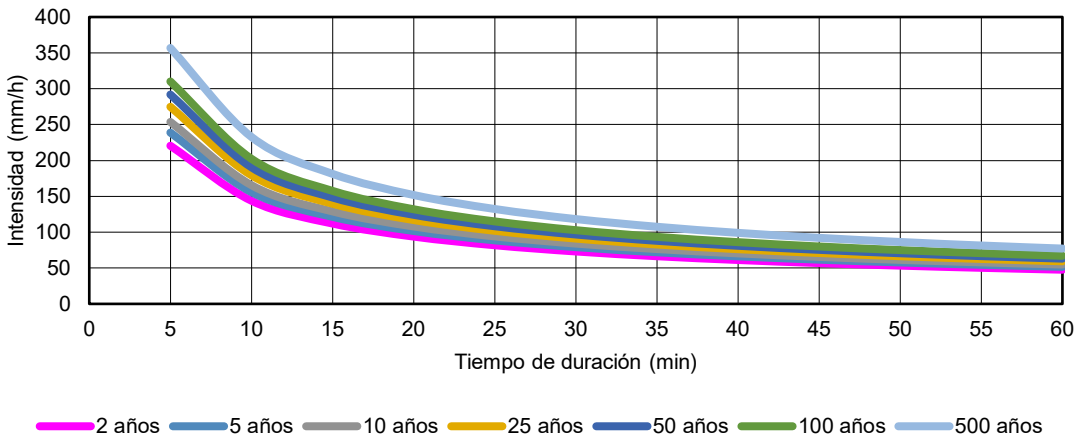


Figura 48. *Curva IDF (Intensidad - Duración - Frecuencia) para M0006*

Según los resultados obtenidos del análisis ofimático en HYDROGNOMON, para conocer la DISTRIBUCIÓN TEÓRICA DE PROBABILIDAD que mejor se ajusta a los datos anuales de precipitación máxima en 24 horas de la estación M0124, y en función de la prueba estadística Chi-cuadrado (Anexo P) y Kolmogorov-Smirnov (Anexo Q), es una distribución LOG PEARSON III. Cabe mencionar que N = 24, Rango = 142.20 y el Número de clase = 5.23 ≅ 5. Lo cual permite obtener la Curva IDF para distintos periodos de retorno máximos (ver Tabla 30):

Tabla 27. *Precipitaciones diarias máximas probables para M0124*

Periodo de Retorno	Precipitación	Probabilidad de ocurrencia	Corrección de intervalo fijo
T	**P**	**F (P)**	**1.13 P**
2 años	114.84 mm	50.00%	129.77 mm
5 años	149.07 mm	80.00%	168.45 mm
10 años	172.63 mm	90.00%	195.07 mm
25 años	203.49 mm	96.00%	229.94 mm
50 años	227.31 mm	98.00%	256.86 mm
100 años	251.88 mm	99.00%	284.62 mm
500 años	312.81 mm	99.80%	353.47 mm

Tabla 28. *Precipitaciones máximas para M0124*

Tiempo de duración "D"	Coeficiente	Años						
		2	**5**	**10**	**25**	**50**	**100**	**500**
24 horas	100%	129.77	168.45	195.07	229.94	256.86	284.62	353.47
18 horas	91%	118.09	153.29	177.51	209.25	233.75	259.01	321.66
12 horas	80%	103.82	134.76	156.05	183.95	205.49	227.70	282.78
8 horas	68%	88.25	114.55	132.65	156.36	174.67	193.54	240.36
6 horas	61%	79.16	102.75	118.99	140.26	156.69	173.62	215.62
5 horas	57%	73.97	96.02	111.19	131.07	146.41	162.23	201.48
4 horas	52%	67.48	87.59	101.44	119.57	133.57	148.00	183.80
3 horas	46%	59.70	77.49	89.73	105.77	118.16	130.93	162.60
2 horas	39%	50.61	65.70	76.08	89.68	100.18	111.00	137.85
1 horas	30%	38.93	50.54	58.52	68.98	77.06	85.39	106.04

Tabla 29. *Intensidad de la lluvia para M0124*

Tiempo de duración	Intensidad de la lluvia en función del Periodo de Retorno "I" (mm/h)						
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
24 horas	5.41	7.02	8.13	9.58	10.70	11.86	14.73
18 horas	6.56	8.52	9.86	11.62	12.99	14.39	17.87
12 horas	8.65	11.23	13.00	15.33	17.12	18.97	23.56
8 horas	11.03	14.32	16.58	19.55	21.83	24.19	30.04
6 horas	13.19	17.13	19.83	23.38	26.11	28.94	35.94
5 horas	14.79	19.20	22.24	26.21	29.28	32.45	40.30
4 horas	16.87	21.90	25.36	29.89	33.39	37.00	45.95
3 horas	19.90	25.83	29.91	35.26	39.39	43.64	54.20
2 horas	25.31	32.85	38.04	44.84	50.09	55.50	68.93
1 horas	38.93	50.54	58.52	68.98	77.06	85.39	106.04

Tabla 30. *Curva IDF (Intensidad - Duración - Frecuencia) para M0124*

T	Tiempo de duración de la precipitación "t" (mm/h)											
	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	50 min	55 min	60 min
2 años	197.37	128.75	100.27	83.98	73.19	65.41	59.48	54.78	50.95	47.74	45.02	42.67
5 años	232.20	151.47	117.97	98.80	86.11	76.95	69.98	64.45	59.94	56.17	52.96	50.20
10 años	262.58	171.28	133.41	111.73	97.37	87.02	79.13	72.88	67.78	63.52	59.89	56.76
25 años	308.93	201.51	156.95	131.45	114.56	102.38	93.10	85.74	79.74	74.73	70.46	66.78
50 años	349.34	227.88	177.48	148.64	129.54	115.77	105.28	96.96	90.17	84.50	79.68	75.52
100 años	395.05	257.69	200.70	168.09	146.49	130.92	119.05	109.65	101.97	95.56	90.10	85.40
500 años	525.57	342.83	267.02	223.63	194.89	174.18	158.39	145.87	135.66	127.13	119.88	113.62

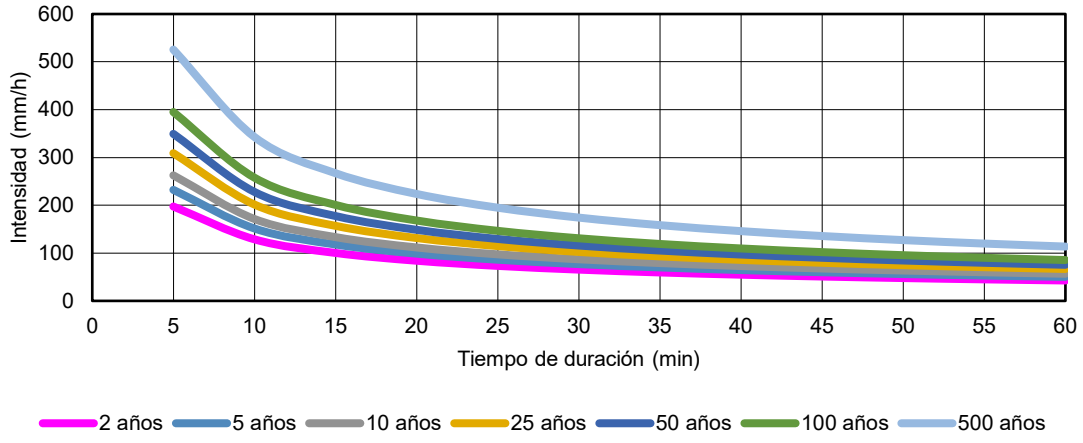


Figura 49. *Curva IDF (Intensidad - Duración - Frecuencia) para M0124*

4.3 Zonas con riesgo a la erosión en el río Vinces

Según el resultado obtenido del análisis geográfico, se determinó que el Factor R (índice de erosividad) de la cuenca del río Vinces oscila entre 664.32 y 2,373.56 MJ.mm/ha/h (ver Figura 50), donde las máximas precipitaciones que son consideradas como fuertes y constantes, se encuentran en la subcuenca del río Quevedo.

También del análisis geográfico se determinó que el Factor K (erodabilidad del suelo) de la cuenca del río Vinces en su mayoría está conformado por suelos andosoles húmicos de categoría 7 (TH7) con 0.022 t/ha - MJ/mm/ha/h, litosoles (I) con 0.019 t/ha - MJ/mm/ha/h y andosoles húmicos de categoría 4 (TH4) 0.021 t/ha - MJ/mm/ha/h, lo que indica una alta probabilidad de erosión hídrica debido a la composición de sus suelos “litosoles” (ver Figura 51). Adicional, se muestra todos los datos obtenidos de las diferentes capas de suelo que conforman la cuenca del río Vinces (ver Tabla 31), observándose siete tipos:

Tabla 31. *Valores del Factor K según la FAO/UNESCO*

Símbolo	Tipos de suelo	Fsand (Arena)	Fclay (Arcilla)	Forg (MO)	Fsilt (Limo)	Factor K
TV	Andosoles Vítricos	0.200002	0.912897	0.982633	0.975942	0.022
TH7	Andosoles Húmicos	0.200633	0.898523	0.974400	0.999765	0.022
TH4	Andosoles Húmicos	0.200000	0.901194	0.974400	0.898638	0.021
GH	Gleysoles Húmicos	0.200218	0.816728	0.974400	0.999787	0.020
I	Litosoles	0.200001	0.756314	0.992542	0.991686	0.019
JE	Fluvisoles Eutricos	0.200000	0.780015	0.988398	0.926641	0.019
VP	Vertisoles Pelicos	0.201064	0.580181	0.997206	0.999991	0.016

Los andosoles viticos (TV) son suelos volcánicos; Los suelos andosoles húmicos (TH) de categoría 7 y 4, estos tipos de suelos tienen una diferencia que los hace único en el manejo agrícola, ya que son ricos en materia orgánica, y se debe a la alta actividad biológica; los Gleysoles húmicos (GH) presenta coloración oscura debido a la presencia de materia orgánica en descomposición, con

humedad estacional; los Litosoles (I) que se caracterizan por la profundidad efectiva de ±10 cm, con mucha presencia de rocas y son muy susceptibles a la erosión por factores ambientales; los Fluvisoles Eutricos (JE) son formados por los sedimentos fluviales y son de textura arenosa; y los vertisoles Pelicos (VP) son formado por sedimentos que contienen arcillas esmécticas.

Asimismo, del análisis geográfico se determinó que el Factor LS (longitud de pendiente y magnitud de pendiente) de la cuenca del río Vinces, la cual oscila entre 0.030 y 82.309 (ver Figura 52), interpretándose que las pendientes son de longitud corta y pronunciadas, la cual intensifica la erosión del suelo por precipitación. Adicional, en la Tabla 30 se muestran todos los porcentajes de pendientes, obtenidos en el área de estudio:

Tabla 32. *Rangos de las pendientes para el Factor LS*

Factor LS	Área de estudio	Categorías
<5	1%	Pendiente débil
5-12	1%	Pendiente suave
12-25	3%	Pendiente moderada
25-40	3%	Pendiente fuerte
40-70	65%	Pendiente muy fuerte
>70	27%	Pendiente abrupta

Igualmente, del análisis geográfico se determinó que el Factor C (cubierta vegetal y manejo del suelo) de la cuenca del río Vinces, en función de la reclasificación existen cuatro categorías (bajo, medio, moderado y alto) donde: la categoría baja “0.00 - 0.015” son bosque nativo, cultivos permanentes, natural (cuerpos de agua) y plantación forestal; la categoría media “0.015 - 0.040” son áreas pobladas e infraestructura; la categoría moderado “0.04 - 0.24” son tierras agrícolas, cultivo anual y pastizal; y la categoría alta “0.24 - 1.00” son cultivos semipermanente, mosaico agropecuario, páramo, vegetación arbustiva, vegetación herbácea y área sin cobertura vegetal (ver Figura 53).

Tabla 33. *Clasificación del suelo para el Factor C*

Factor C	Área de estudio	Porcentaje del área
Bajo	99,055.74 ha	21%
Medio	4,716.94 ha	1%
Moderado	240,563.94 ha	51%
Alto	127,357.38 ha	27%

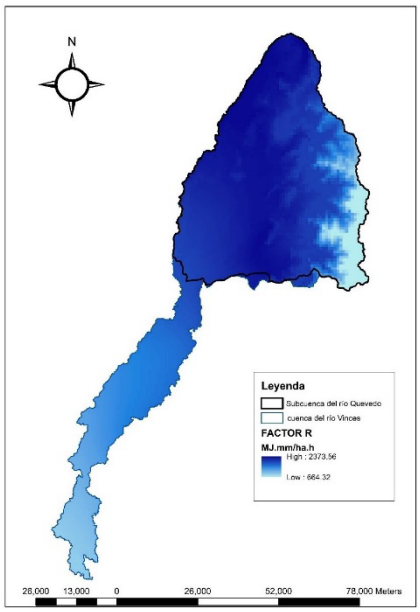


Figura 50. *Factor R*

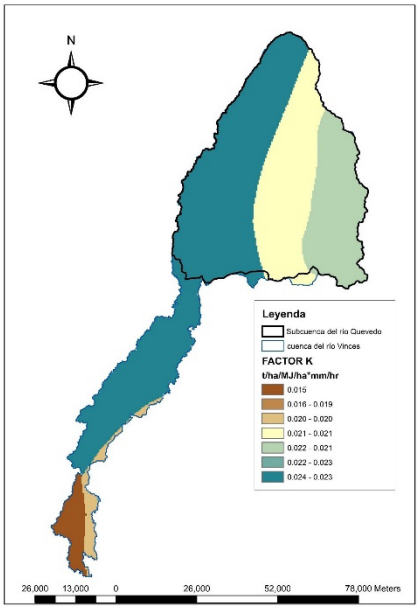


Figura 51. *Factor K*

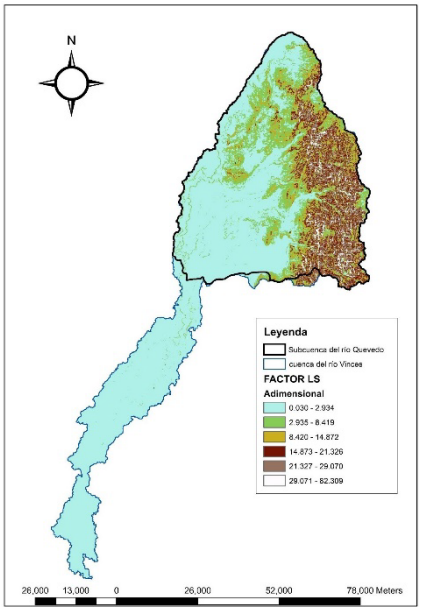


Figura 52. *Factor LS*

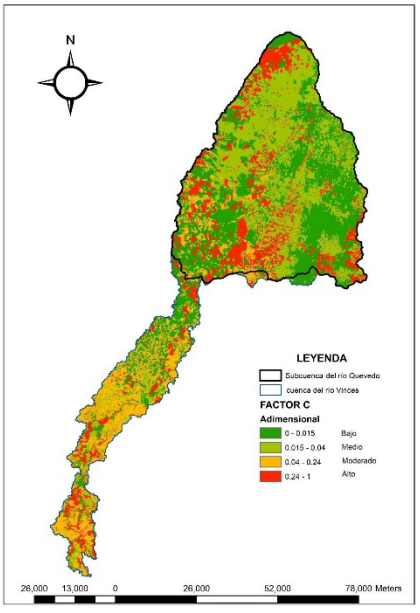


Figura 53. *Factor C*

Y finalmente del análisis geográfico se determinó que el Factor P (prácticas de conservación del suelo) de la cuenca del río Vinces, cuya práctica de conservación de suelo se consideró que el valor idóneo es igual a 1, porque no es posible precisar el conocimiento de las diferentes prácticas de control para la erosión en las diferentes actividades agroproductivas.

Erosión potencial:

Según el resultado obtenido del análisis geográfico final, se comprobó que la erosión potencial de la cuenca del río Vinces según la ecuación universal revisada de pérdida de suelo (RUSLE), mostró que el 34% del área presenta niveles de erosión extremo, que corresponden a 160,375.96 hectáreas de la cuenca; mientras que solo el 9% del área mostró niveles de erosión muy bajo, que corresponde a 42,452.46 hectáreas de la cuenca (ver Tabla 34):

Tabla 34. *Niveles de erosión potencial en la cuenca del río Vinces*

Serie	Nivel de erosión	Pérdida potencial de suelo / rendimiento de sedimentos	Porcentaje del área
1	Muy bajo	<5 t/ha/año	12%
2	Bajo	5-25 t/ha/año	23%
3	Moderado	25-50 t/ha/año	12%
4	Alto	50-100 t/ha/año	10%
5	Muy Alto	100-200 t/ha/año	9%
6	Extremo	>200 t/ha/año	34%
Área Total			100%

La siguiente Figura (54) muestra la erosión potencial en la cuenca del río Vinces, pero a nivel cantonal: con mayor nivel de riesgo a la erosión hídrica potencial son La Maná, Pujilí, Sigchos, Santo Domingo de los Tsachilas y Valencia; y con un menor riesgo de erosión es el cantón Quevedo.

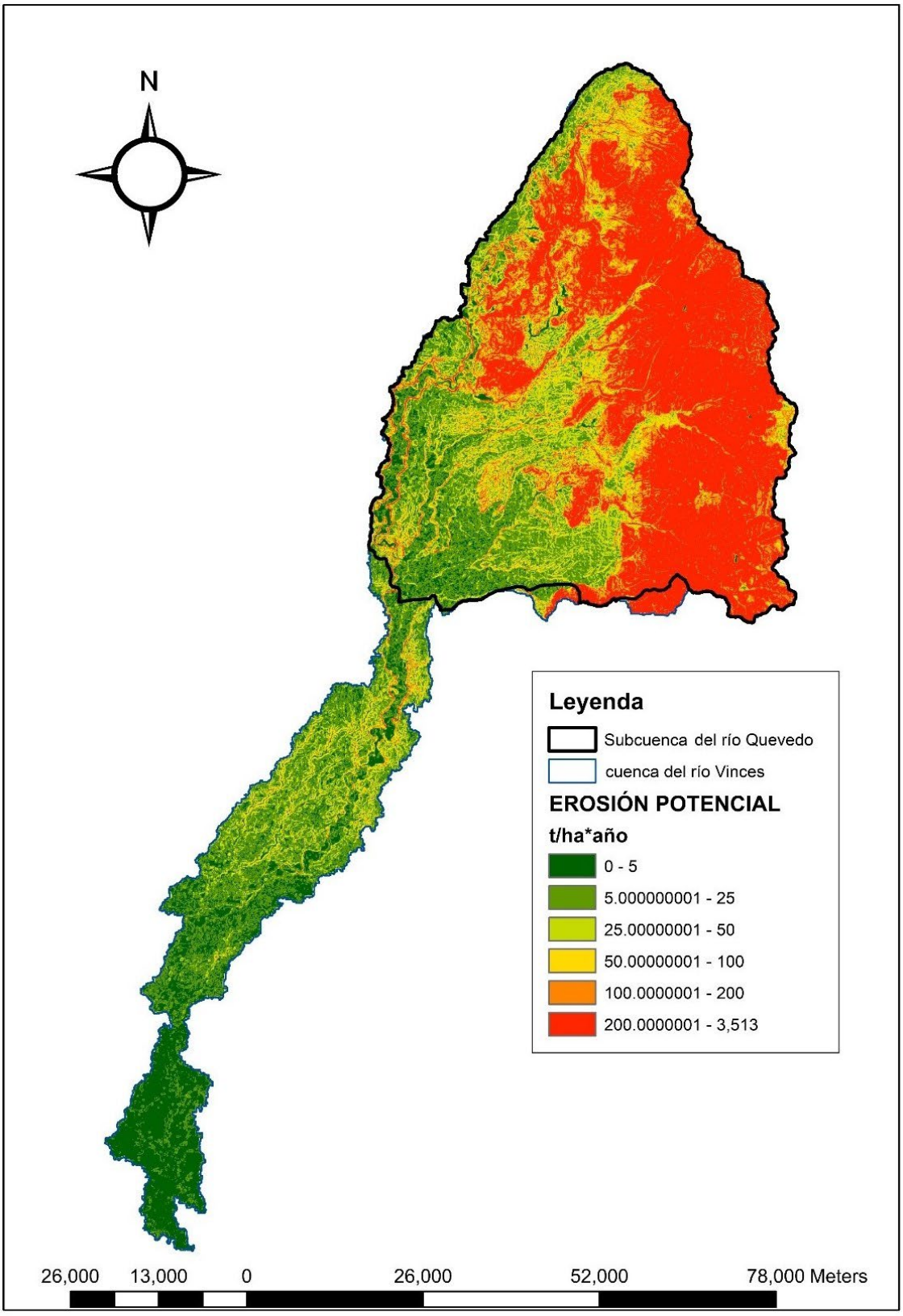


Figura 54. *Erosión hídrica potencial de la cuenca del río Vinces*

Erosión Actual:

Según el resultado obtenido del análisis geográfico final, se comprobó que la erosión actual de la cuenca del río Vinces según la ecuación universal revisada de pérdida de suelo (RUSLE), mostró que el 66% del área presentan un nivel muy bajo de erosión, que corresponden a 311,318.04 hectáreas de la cuenca, mientras que solo el 1% del área presentan un nivel muy alto a extremo, que corresponden a 4,716.94 hectáreas de la cuenca (ver Tabla 35):

Tabla 35. *Niveles de erosión actual en la cuenca del río Vinces*

Serie	Nivel de erosión	Pérdida actual de suelo / rendimiento de sedimentos	Porcentaje del área
1	Muy bajo	<5 t/ha/año	66%
2	Bajo	5-25 t/ha/año	25%
3	Moderado	25-50 t/ha/año	5%
4	Alto	50-100 t/ha/año	2%
5	Muy Alto	100-200 t/ha/año	1%
6	Extremo	>200 t/ha/año	1%
Área Total			100%

La siguiente Figura (55) muestra la erosión actual en la cuenca del río Vinces, pero a nivel cantonal: con alto nivel de erosión se encuentran los cantones de Pujilí y La Maná. Aunque en su mayoría la zona de estudio presenta bajos niveles de erosión, posiblemente a la influencia de la cubierta vegetal (según la estimación del Factor C).

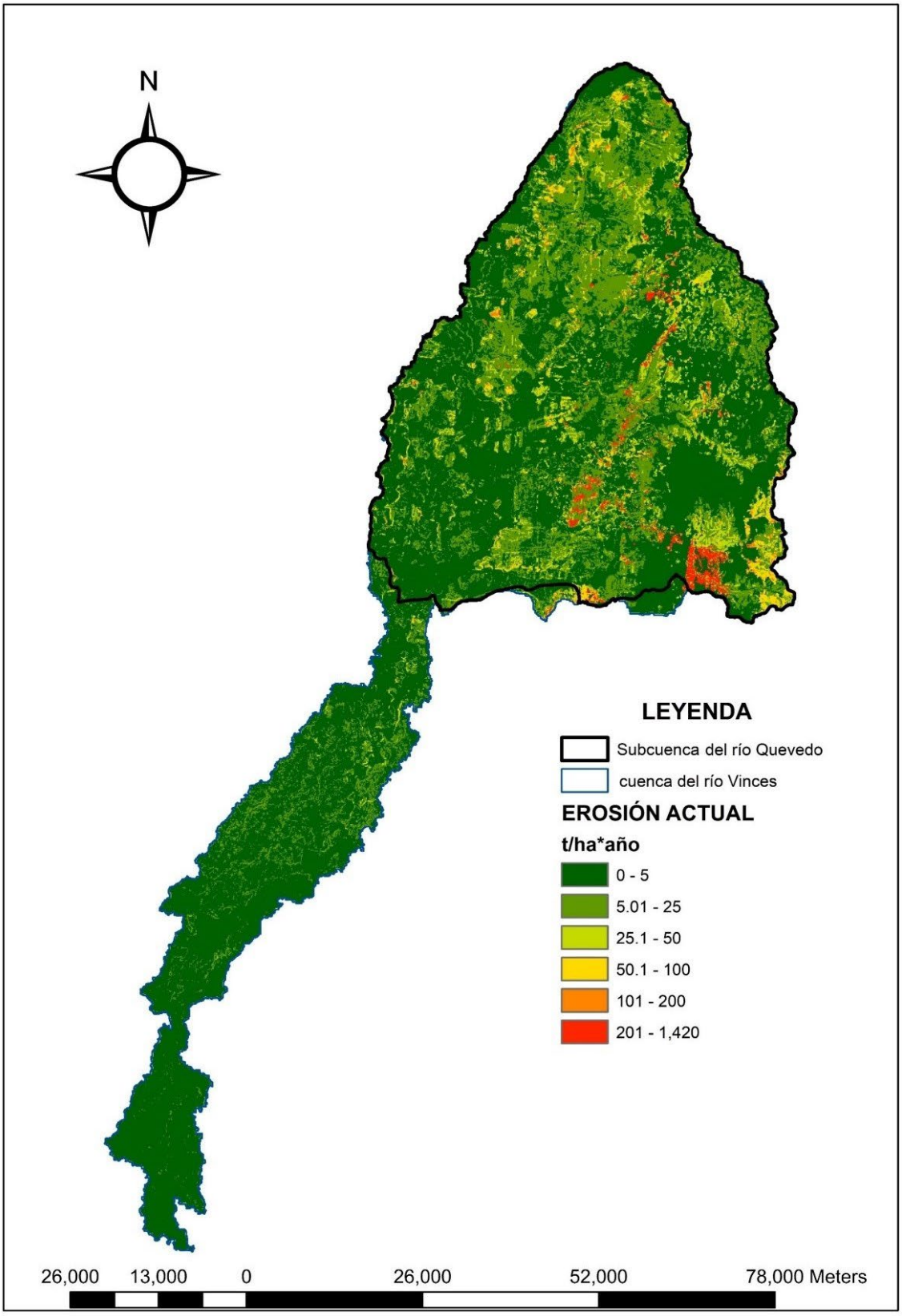


Figura 55. *Erosión hídrica actual de la cuenca del río Vinces*

4.4 Balance hídrico de la cuenca del río Vinces

Según el resultado obtenido para la cuenca del río Vinces, la evapotranspiración potencial por Thornthwaite se estima en 1,307.63 mm/año, obtenido de la media entre 1,392.98 mm/año de la estación M0006 (ver Tabla 36) y 1,222.27 mm/año de la estación M0124 (ver Tabla 37).

Tabla 36. *Evapotranspiración potencial de la estación M0006*

Mes	d (Días)	Tm (°C)	i	ETo' (mm)	N (Horas)	ETo (mm)	ETo (mm/día)
Enero	31	25.45	11.748	118.454	12.144	123.87	4.00
Febrero	28	25.69	11.916	122.152	12.144	115.37	4.12
Marzo	31	26.24	12.305	130.927	12.100	136.42	4.40
Abril	30	26.2	12.276	130.275	12.078	131.12	4.37
Mayo	31	25.72	11.937	122.620	12.056	127.30	4.11
Junio	30	24.48	11.077	104.299	12.035	104.60	3.49
Julio	31	23.86	10.655	95.894	12.035	99.38	3.21
Agosto	31	23.77	10.594	94.715	12.056	98.33	3.17
Setiembre	30	24.52	11.104	104.858	12.078	105.54	3.52
Octubre	31	24.73	11.249	107.828	12.122	112.55	3.63
Noviembre	30	25.1	11.504	113.202	12.144	114.56	3.82
Diciembre	31	25.44	11.741	118.302	12.165	123.93	4.00
Σ			138.108			1,392.98	

Siendo 3.275 su exponente a (ver Anexo S).

Tabla 37. *Evapotranspiración potencial de la estación M0124*

Mes	d (Días)	Tm (°C)	i	ETo' (mm)	N (Horas)	ETo (mm)	ETo (mm/día)
Enero	31	24.13	10.838	103.239	12.138	107.91	3.48
Febrero	28	24.58	11.146	108.974	12.138	102.88	3.67
Marzo	31	25.03	11.456	114.914	12.100	119.73	3.86
Abril	30	25.09	11.497	115.722	12.081	116.50	3.88
Mayo	31	24.56	11.132	108.714	12.062	112.92	3.64
Junio	30	23.42	10.359	94.601	12.043	94.94	3.16
Julio	31	22.92	10.026	88.813	12.043	92.10	2.97
Agosto	31	22.86	9.986	88.134	12.062	91.54	2.95
Setiembre	30	22.99	10.072	89.609	12.081	90.21	3.01
Octubre	31	23.08	10.132	90.639	12.119	94.59	3.05
Noviembre	30	23.32	10.292	93.424	12.138	94.50	3.15
Diciembre	31	23.85	10.648	99.773	12.157	104.45	3.37
Σ			127.584			1,222.27	

Siendo 2.926 su exponente a (ver Anexo U).

Y con los datos de la evapotranspiración potencial, se estima un excedente del balance hídrico según Thornthwaite de 1,322.97 mm/año, obtenido de la media

entre 1,070.89 mm/año de la estación M0006 (ver Tabla 38 y Figura 56) y 1,575.04 mm/año de la estación M0124 (ver Tabla 39 y Figura 57).

Tabla 38. *Balance hídrico de la estación M0006*

M0006	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Total
Precipitación	128.15	377.86	459.11	446.77	435.51	164.00	43.11	30.25	10.28	24.33	22.32	64.78	2,206.47
ETP	123.93	123.87	115.37	136.42	131.12	127.30	104.60	99.38	98.33	105.54	112.55	114.56	1,392.97
P - ETP	4.22	253.99	343.74	310.35	304.39	36.70	-61.49	-69.13	-88.05	-81.21	-90.23	-49.78	813.50
Mes	húmedo	húmedo	húmedo	húmedo	húmedo	húmedo	seco	seco	seco	seco	seco	seco	
Reserva	4.22	182.50	182.50	182.50	182.50	182.50	121.01	51.88	0.00	0.00	0.00	0.00	1,089.61
Variación	4.22	178.28	0.00	0.00	0.00	0.00	-61.49	-69.13	-51.88	0.00	0.00	0.00	0.00
ETR	123.93	123.87	115.37	136.42	131.12	127.30	104.60	99.38	62.16	24.33	22.32	64.78	1,135.58
Exceso	0.00	75.71	343.74	310.35	304.39	36.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1,070.89
Déficit	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-36.17	-81.21	-90.23	-49.78	-257.39

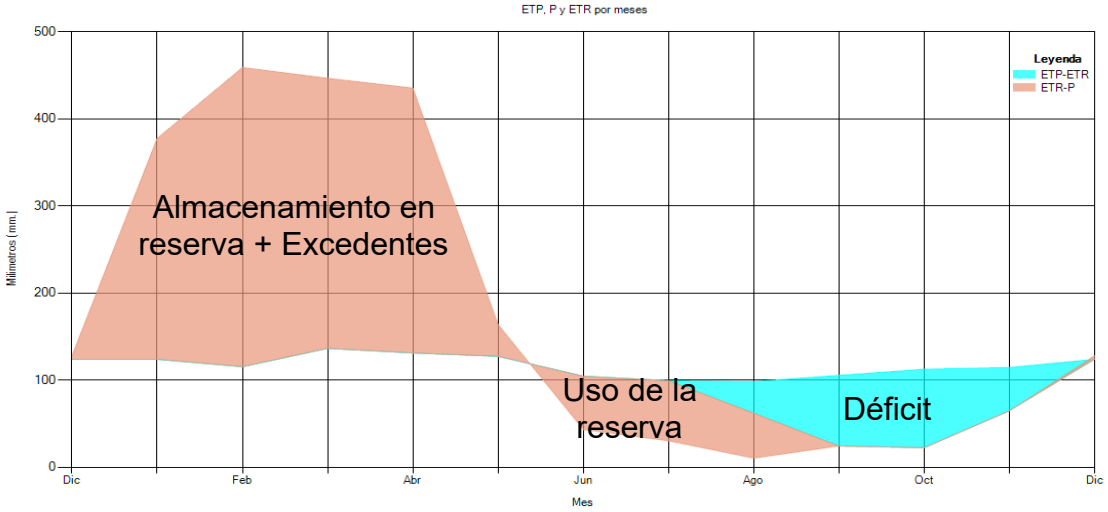


Figura 56. *Balance hídrico de la estación M0006*

El Índice de Aridez (Ia) “18.478”, indica que es muy húmedo; el Índice Humedad (Ih) “76.878” y el Índice de Humedad de Thornthwaite (Im) de “65.792”, como la Clasificación Climática de Thornthwaite “B3”, indican que la zona de estudio es húmeda; y la Subdivisión Climática “s” / “w” indica un moderado excedente de agua en época lluviosa y época seca (ver Anexo T).

Tabla 39. *Balance hídrico de la estación M0124*

M0124	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Total
Precipitación	418.59	513.01	548.51	512.42	240.40	47.56	38.11	27.97	27.73	32.39	41.97	189.00	2,637.65
ETP	107.91	102.88	119.73	116.50	112.92	94.94	92.10	91.54	90.21	94.59	94.50	104.45	1,222.27
P - ETP	310.68	410.13	428.78	395.92	127.48	-47.39	-54.00	-63.57	-62.49	-62.21	-52.53	84.55	1,415.38
Mes	húmedo	húmedo	húmedo	húmedo	húmedo	seco	seco	seco	seco	seco	seco	húmedo	
Reserva	84.55	182.50	182.50	182.50	182.50	182.50	135.12	81.13	17.56	0.00	0.00	0.00	1,230.86
Variación	84.55	97.95	0.00	0.00	0.00	0.00	-47.38	-53.99	-63.57	-17.56	0.00	0.00	0.00
ETR	104.45	107.91	102.88	119.73	116.50	112.92	94.94	92.10	91.54	45.29	32.39	41.97	1,062.62
Exceso	0.00	212.73	410.13	428.78	395.92	127.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1,575.04
Déficit	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-44.92	-62.20	-52.53	-159.65

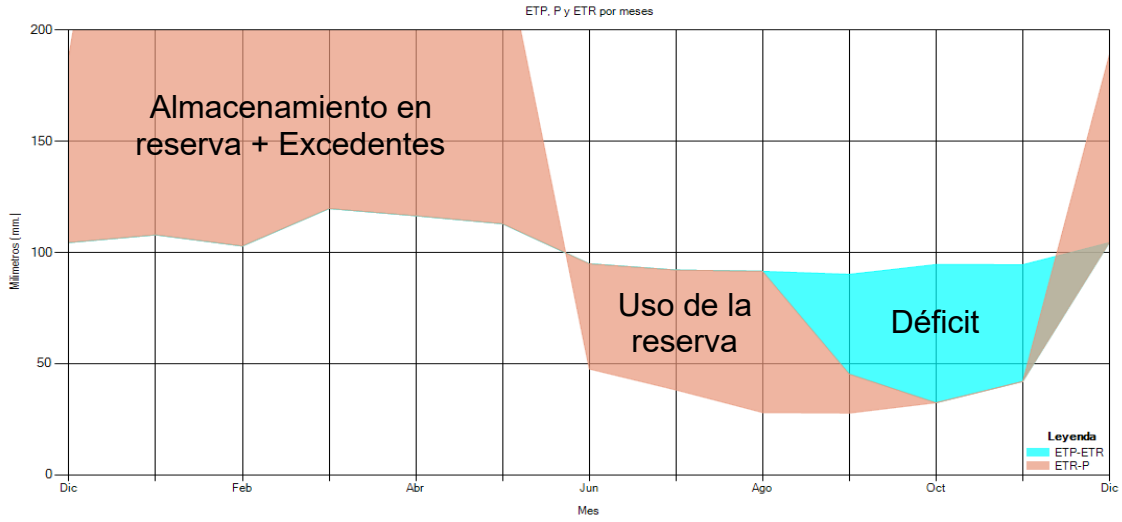


Figura 57. *Balance hídrico de la estación M0124*

El Índice de Aridez (Ia) “13.062”, el Índice Humedad (Ih) “128.862”; el Índice de Humedad de Thornthwaite (Im) “121.025” y la Clasificación Climática de Thornthwaite “A”, indican que la zona de estudio es super húmeda; y la Subdivisión Climática “s” / “w” indica un moderado excedente de agua en época lluviosa y época seca (ver Anexo V).

Interpretación de los gráficos del Balance hídrico: Curva P sobre ETR indica ALMACENAMIENTO en reserva + Excedentes; Curva ETR sobre P indica USO DE LA RESERVA del suelo; Curvas entre ETP y ETR indica DÉFICIT. Cuyos resultados coinciden con la comparación entre P y ETo (Anexo W y Anexo X).

El código B3 en la clasificación climática de Thornthwaite se refiere a una subclase específica del clima. En este caso, B3 indica una deficiencia moderada de agua tanto en época lluviosa y época seca. Esto significa que la región experimenta una cantidad de precipitación insuficiente en ambas estaciones, lo que puede tener un impacto en el suministro de agua disponible para los seres vivos y la agricultura.

Además, la subdivisión climática "s" indica una deficiencia moderada de agua en época seca, lo que implica que la disponibilidad de agua es limitada durante los meses más cálidos del año. La subdivisión "w" indica una deficiencia moderada de agua en época lluviosa, lo que sugiere que también hay una falta moderada de agua durante la temporada.

Estas clasificaciones proporcionan información útil para comprender las condiciones climáticas y los patrones de disponibilidad de agua en una determinada región. Son herramientas importantes para los estudios sobre el clima y la planificación de actividades que dependen de los recursos hídricos, como la agricultura y la gestión del agua.

Con los resultados obtenidos del balance hídrico medio de la cuenca según Thornthwaite [(1,070.89 + 1,575.04) / (2)] que es de 1,322.97 mm/año → 0.0132297 Hm^3/ha/año, y con los datos del área de la cuenca 4,716.94 km^2 → 471,694.00 ha, se puede estimar que la cuenca del río Vinces puede generar unos 6,240.37 Hm^3/año aproximadamente, pudiendo hacer uso consuntivo del 50% del agua “3,120.19 Hm^3/año” (porque se descuenta 10% caudal ecológico y 40% uso no consuntivo). Y considerando un cultivo representativo de la zona, con un requerimiento hídrico de 0.0074 Hm^3/ha/año [(ETc = 3.82 mm x 1.05) → (4.01 x 10) → (40.10 m^3/ha/día x 184 día época seca) = 7,377.60 m^3/ha/año]. A priori se podrían regar 422,927.73 ha/año (3,120.19 / 0.0074) → 4,229.28 Km^2 aproximadamente. Y según las estadísticas del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) actualmente se riegan aproximadamente 1200 hectáreas en el área de influencia directa, lo cual significaría el 0.28%.

5 DISCUSIÓN

De manera general, los parámetros (geomorfología, hidroclimatología, erosión y balance hídrico) encontrados en la cuenca del río Vinces con los diferentes análisis (geomáticos y ofimáticos), suponen que pueden inferir en la correcta gestión del recurso hídrico para fines de riego. A continuación, de manera específica, la discusión de los resultados:

5.1 Geomorfología de la cuenca del río Vinces

Con base en el estudio realizado, concuerdo con Chow et al. (1988) quienes mencionan que la geomorfología estudia el comportamiento de las cuencas pequeñas y grandes. Además, Ruiz (2001) cumplimenta que la morfometría permite analizar la similitud de caudales en ríos de distintas dimensiones. Cabe indicar que Linsley et al. (1977) asevera que morfometría de cuencas es homólogo de morfología de cuencas hidrográficas. A diferencia de Chow et al. (1988) quien hace referencia que geomorfología de una cuenca no es un término del todo adecuado, debido a su ambigüedad, enfoque limitado y visión estática de la cuenca.

En el cálculo de los parámetros morfológicos en la cuenca del río Vinces, se utilizó el ráster de elevación generado por SRTM, observándose que dicha cuenca no ha sufrido perturbaciones irremediables, según los resultados obtenidos del estudio hidrológico; lo cual concuerda con Gaspari et al. (2010) quienes sustentan que estos valores se obtienen mediante información cartográfica y topográfica de la zona en estudio. Y en una publicación posterior Gaspari (2012) reafirma que dicho análisis morfométrico es el estudio de las variables lineales como la superficie, relieve y drenaje; permitiendo interpretar la funcionalidad hidrológica para establecer sus potenciales.

Los resultados obtenidos son consistentes con los de Linsley et al. (1977) quienes sostienen que las bajas densidades de drenaje reflejaban "cuencas mal drenadas con respuestas hidrológicas muy lentas"; también sugiere la presencia de material duro y resistente desde el punto de vista litológico. Además, Ruiz (2001) explica que una cuenca bien drenada generaría poca oportunidad de darle tiempo a la escorrentía superficial de infiltrarse y percolar a nivel

subterráneo, de allí que los acuíferos de estas regiones tendrían bajo rendimiento o en su defecto el volumen de recarga es muy pobre.

Los resultados obtenidos coinciden con lo mencionado por Chow (1964), la cuenca presenta un relieve accidentado, con una forma alargada y erosión moderada; El cauce principal es sinuoso e irregular; Los tiempos de concentración son altos debido a las dimensiones y relieve de la zona.

5.2 Hidroclimatología de la cuenca del río Vinces

Según los resultados del análisis estadístico en Hydrognomon, la distribución teórica de probabilidad que mejor se ajusta a los datos anuales de precipitación máxima en 24 horas de la estación M0006 es la distribución normal (Anexo L y Anexo M). Esto concuerda con lo señalado por Chow et al. (1988), quienes indican que la distribución normal suele representar adecuadamente los datos de precipitaciones máximas anuales.

Pero según los resultados del análisis estadístico en Hydrognomon, la distribución teórica de probabilidad que mejor se ajusta a los datos anuales de precipitación máxima en 24 horas de la estación M0124 es la distribución Log Pearson III (Anexo O y Anexo P). Y de acuerdo con Chow et al. (1988), la distribución Log Pearson III suele representar razonablemente bien el comportamiento de datos hidrológicos extremos como precipitaciones y caudales máximos. Esta distribución se adapta a datos con sesgo positivo.

Otro aspecto interesante que coincide con Linsley et al. (1977) y Chow et al. (1988), reside en los objetivos fundamentales de estos estudios, orientados o dirigidos a inferir posibles picos de crecidas o avenidas en caso de tormentas, cuyas repercusiones de tipo socioeconómico motivan especial atención tanto a la hora de utilizar y ocupar el territorio, como en el momento de definir medidas de tipo estructural para el control de crecidas excepcionales. Estos resultados son coherentes y brindan información valiosa para el diseño hidrológico e hidráulico de obras en la zona.

5.3 Zonas con riesgo a la erosión en el río Vinces

Con los resultados obtenidos y en función de la interpretación, se coincide con Klohm y Stanescu (1970) quienes afirman que la fisiografía de una cuenca hidrográfica permite inferir preliminarmente en el comportamiento hidrológico y sus estimaciones. Confirmándolo Werritty (1997) quien indica que la geomorfología fluvial consiente el estudiar los accidentes geográficos, formas y relieves producidos por acción de los ríos sobre la superficie, u otros procesos de erosión, transporte y sedimentación. Complementándolo Aguirre (2007) quien expone que la morfometría permite conocer las características físicas de una cuenca, es decir, precisar su situación actual a partir de la descripción geométrica de las formas superficiales, y se obtiene mediante estimaciones hidrológicas de superficie, relieve e hidrografía.

Los resultados obtenidos coinciden con Budreski et al. (2007) quienes expone que la cobertura terrestre muestra los elementos físicos que ocupan la superficie de la tierra, como el agua, bosque y/o estructuras urbanas. Y ratificado por Lillesand et al. (2008) quienes sostienen que el uso de la tierra está relacionado a las actividades humanas y/o a las funciones económicas asociadas con una porción específica del suelo.

El análisis obtenido concuerda con lo manifestado por Foody (2002) y Rogan et al. (2002) quienes indican que la obtención de mapas temáticos terrestres es una de las principales y más avanzadas aplicaciones de la teledetección. También, reafirmándolo Seyler et al. (2002) quienes muestra que el uso de imágenes satelitales es la alternativa más útil y eficiente para la elaboración de cartografía de ocupación de la tierra a diferentes escalas.

5.4 Balance hídrico de la cuenca del río Vinces

Del análisis obtenido, se concuerda con Jiménez (1994) quien refrenda que el balance hídrico es la representación teórica de los intercambios de agua entre las plantas, suelo y atmósfera, permitiendo establecer las ganancias y pérdidas hídricas que se registran en un área estudiada. Y aseverando Eischeid et al. (2000) que la evaluación de los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica demanda comprender el ciclo hidrológico en sus múltiples fases.

Profundizándolo Espinoza (2012) quien sostiene que la exactitud del balance hídrico en una cuenca hidrográfica está condicionada por el tamaño de la cuenca. Cuanto más pequeña sea la cuenca, más complicado es su balance, porque es difícil estimar las contribuciones secundarias y la hidrodinámica con cobertura vegetal.

En función del programa usado, se confirma lo declarado por Behrends (2011) quien expresa que los elementos climáticos son concluyentes en la exactitud de los resultados. Asimismo, se certifica lo aducido por Proaño et al. (2006) quienes establecen que las estaciones deben encontrarse dentro de la zona o lo más cercano posible (para evitar resultados erróneos). Y Silva (2015) sostiene que la calibración y validación del modelo es un procedimiento fundamental para reducir la incertidumbre y aumentar la confianza en cuanto a la estimación.

6 CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN

6.1 Conclusiones

Para el diagnóstico de los parámetros geomorfológicos en la cuenca del río Vinces, se utilizó el software IDRISI, cuya metodología utilizada se ajustó a la investigación. Donde el resultado en dicha cuenca estableció que no ha sufrido perturbaciones irreparables. Y con base en los resultados presentados, se cumple con la hipótesis, debido a que se diagnosticó la geomorfología para la cuenca del río Vinces.

Para el análisis los parámetros hidroclimáticos en la cuenca del río Vinces, se utilizó el software HYDROGNOMON, cuya metodología utilizada se ajustó a la investigación. Donde el resultado en dicha cuenca estableció la Curva IDF para distintos periodos de retorno máximos. Y con base en los resultados presentados, se cumple con la hipótesis, debido a que se analizó la hidroclimatología para la cuenca del río Vinces.

Para la identificación las zonas con potencial riesgo a la erosión en la cuenca del río Vinces, se utilizó el software QGIS, cuya metodología utilizada se ajustó a la investigación. Donde el resultado en dicha cuenca estableció la erosión potencial y erosión actual. Y con base en los resultados presentados, se cumple con la hipótesis, debido a que se identificó las zonas con riesgo a la erosión para la cuenca del río Vinces.

Para la estimación del balance hídrico en la cuenca del río Vinces, se utilizó el software PETP e INNERSOFT, cuya metodología utilizada se ajustó a la investigación. Donde el resultado en dicha cuenca estableció el balance hídrico. Y con base en los resultados presentados, se cumple con la hipótesis, debido a que se estimó el balance hídrico para la cuenca del río Vinces.

6.2 Recomendaciones

Para el cálculo de los parámetros hidrogeomorfológicos de las cuencas es aconsejable realizar un contraste y validación de los resultados con otras fórmulas y/o programas, ya sea de manera manual o automática.

Es indispensable el uso de un software hidrológico, por lo cual recomiendo un programa que integre sistemas de información geográfica.

Además, es indispensable la calibración y validación del modelo hidrológicos para minimizar la inseguridad y maximizar la confianza. Otro punto fundamental es cerciorarse que existan estaciones meteorológicas cercanas con datos normales (históricos).

Las estaciones hidrometeorológicas son parte primordial de los proyectos, lamentablemente en Ecuador las estaciones del INAMHI son insuficientes o carecen de mantenimiento. Para lo cual, recomiendo el uso de información global, pero de organismos confiables.

También recomiendo el uso de software para conocer la distribución teórica de probabilidad, que integre varias pruebas estadísticas para escoger la que mejor se ajuste a los datos hidrológicos y/o meteorológicos por estación.

La información generada es indispensable para la propuesta de un plan de gestión integral y sostenible de los recursos hídricos. Pero también es importante articular con organizaciones gubernamentales y no gubernamental el diseño hidrológico y la construcción de obras hidráulicas que permitan la regulación y aprovechamiento adecuado durante estiaje, que normalmente se sitúa en la época seca (aunque pudiera darse en época lluviosa con pocas precipitaciones).

BIBLIOGRAFÍA

Abbaspour, K. C. (2009). SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Version 2. Duebendorf, Suiza. 95p.

Aksoy, H. & Kavvas, L. (2005). A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport model. Catena. Vol. 64, No. 2-3. 247-271.

Aguirre, N. (2007). Manual para el Manejo Sustentable de Cuencas Hidrográficas. Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador. 115p.

Allen, R. G. (1995). Evaluation of procedures for estimating mean monthly solar radiation from air temperature. Reporte preparado para la FAO, Servicio de Desarrollo y Manejo de Recursos Hídricos, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.

Allen, R. G. (1997). Self-Calibrating Method for Estimating Solar Radiation from Air Temperature. J. Hydrologic Engineering, ASCE. 2(2). 56-67p.

Allen, R. G.; Pereira, L. S., Raes D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO - Riego y Drenaje. No. 56. Roma, Italia. ISSN 0254-5293

Alvarenga Gonzalez, Alan N., Cruz Laínez, Hernán M., Portillo González, Héctor I., & Portillo Pereira, Orfa N. (2016). Evaluación del impacto hídrico que se genera en el acuífero subterráneo de la cuenca del rio el jute del municipio de san miguel, por la explotación de pozos de uso industrial y abastecimiento de agua potable. Universidad de El Salvador. 307 p.

Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). Constitución de la República del Ecuador. Quito, Ecuador. 218p.

Baldasano, J. M. (2010). Curso de Modelización Ambiental. Barcelona, España.

Baldock, J. W. (1982). Geología del Ecuador. Boletín del Mapa Geológico de la República del Ecuador. Dirección de Geología y Minas. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos.

Ballarín, D., & Rodríguez, I. (2013). Hidromorfología fluvial. Valladolid, España.

Behera, M., Sena, D. R., Mandal, U., Kashyap P. S., y Dash, S. S. (2020). Integrated GIS-based RUSLE approach for quantification of potential soil erosion under future climate change scenarios. Environ Monit Assess.

Behrends Kraemer, F. (2011). Aplicación del modelo hidrológico SWAT en una microcuenca agrícola de la Pampa ondulada. Ciencia del suelo Vol. 29 No.1 n.1. ISSN 1850-2067. Buenos Aires, Argentina. 75-82p.

Beltrán, G. (2010). Apuntes de cuencas hidrográficas y SIG. Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador. 76p.

Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation (R-USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. Hydrology and Earth System Sciences, 22, 6059-6086. https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018

Bernex, N. (2009). Ordenamiento territorial en la gestión integral del recurso hídrico en la cuenca andino-amazónica. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP); Ministerio del Ambiente de Perú / Dirección General de Ordenamiento Territorial; Secretaría General de la Comunidad Andina - Programa BIOCAN; Deutsche Gesellschaft für Technische

Zusammenarbeit (GTZ) GmbH - Programa Desarrollo Rural Sostenible (PDRS) y Proyecto Sectorial Land Management. Iquitos, Perú. 152p.

Bladé, E., Sánchez Juny, M., Sánchez H. P., Niñerola, D., & Gómez, M. (2009). Modelización numérica en ríos en régimen permanente y variable. Una visión a partir del modelo HEC-RAS. Ed. UPC. Barcelona, España.

Bolstad, P. (2016). GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems. University of Minnesota. College of Food, Agricultural and Natural Resource Sciences. 5th Edition. USA. 784p. ISBN 978-1-50669-587-7

Brahim, B., Meshram, S. G., Abdallah, D., Larbi, B., Drisss, S., Khalid, M., & M. Khedhe, K. (2020). Mapping of soil sensitivity to water erosion by RUSLE model: case of the Inaouene watershed (Northeast Morocco). Arabian Journal of Geosciences, vol. 13, nº 1153.

Breña Puyol, A. F., & Jacobo Villa, M. A. (2013). Principios y fundamentos de la hidrología superficial. Universidad Autónoma Metropolitana. México.

Bruijnzeel, L. A. (1991). Hydrological impacts of tropical forest conversion. Nature and Resources. 27(2). France. 36-45p.

Brunner, G. W. (2014). Combined 1D and 2D Modeling with HEC-RAS. Polonia.

Budreski, K. A., Wynne, R. H., Browder, J. O., & Campbell, J. B. (2007). Peer-Reviewed Articles-Comparison of Segment and Pixel-based Non-parametric Land Cover Classification in the Brazilian Amazon Using Multi-temporal Landsat TM/ETM+ Imagery-Accurate land-cover maps. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 73(7). 813-827.

Bullock, P. (2005). Climate change impacts. In D. Hillel (Ed.), Encyclopedia of soils in the environment (pp. 254–262). Oxford: Elsevier.

Bulygina, N.S., Nearing, M.A., Stone, J.J., & Nichols, M.H. (2007). DWEPP: a dynamic soil erosion model based on WEPP source terms. Earth Surface Processes and Landforms Vol. 32, No. 7. 998-1012.

Burbano, F. (1989). Notas de hidrología para ingeniería forestal. Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador. 125.

Burbano O, N., Becerra P. S., & Pasquel S. E. (2015). Introducción a la hidrogeología del Ecuador. Grupo de Aguas Subterráneas de la Unidad de Estudios e Investigaciones Hidrológicas de la Dirección de Gestión de Hidrología del INAMHI. Quito, Ecuador. 128.

Cabrera, J. (2011). Calibración de modelos hidrológicos. Perú. 7p.

Calderón Bustamante, J. A. (2020). Estimación del riesgo de erosión hídrica en la subcuenca Alamor, Río Catamayo-Chira, Ecuador. Loja.

California Culvert Practice. (1955). Department of Public Works, Division of Highways. 2nd ed. Sacramento, USA.

Calle Vidal, L. F. (2021). Efecto de los cambios de uso de suelo en el aumento de la erosión hídrica a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos en la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas Namballe. Lima, Perú.

Campos, D. F. (1978). Cálculo de las curvas IDF, a partir de registros de lluvia máxima en 24 horas y Relaciones Duración Lluvia Promedio. 1a Ed., Subdirección Regional Noreste de Obras Hidráulicas e Ingeniería Agrícola para el Desarrollo Rural. San Luis de Potosí, México.

Campos, D. F. (1992). Capítulo 2: Geomorfología de la cuenca. Procesos del Ciclo Hidrológico. Editorial Universitaria Potosina. SLP, México. 29.

Campos Aranda, D. F. (1998). Procesos del Ciclo Hidrológico. Editorial Universitaria Potosina. San Luis de Potosí, México. 550.

Carabias, J., Meave, J., Valverde, T., & Cano-Santana, Z. (2009). Ecología y medio ambiente en el siglo XXI. Pearson educación. México. 10.

Casado S., & Montes, C., (1995). Guía de los lagos y humedales de España. J. Reyero (Ed). Madrid, España. 254.

Castro, D. (2012). Clasificación Automática de Unidades de Relieve a partir de Variables Topográficas con fines de Planificación Territorial en la cuenca del Río Napo. Quito, Ecuador.

Castro, M. & Guzmán, O. (1985). Evaluación de la evapotranspiración potencial en Colombia. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras - HIMAT. Santafé de Bogotá, Colombia.

Chacón, Á. & Varas, E. (2001). Simulación hidrológica mediante un sistema de modelación modular. Ingeniería hidráulica de México. Vol. XVI. Número 3. México. 127-132.

Chow, V. T. (1964). Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill Book Company. New York, USA.

Chow, V. T., Maidment D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied hydrology. Mc Graw Hill. New York, USA. 299.

Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetección espacial. Rialp. Madrid, España. 429.

Chuvieco, E. (2002). Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio. Ariel Ciencia. Barcelona, España.

Chuvieco, E. (2010). Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio. Nueva edición. Ariel Ciencia. Barcelona, España.

Clark, C. O. (1945). Storage and the Unit Hydrograph. Transactions of American Society of Civil Engineering (ASCE). Vol 69. 1333-1360.

Collot, J. Y., Michaud, F., Alvarado, A., Marcaillou, B., Sosson, M., Ratzov, G., Migeon, S., Calahorrano, A., & Pazmino, A. (2009). Visión general de la morfología submarina del margen convergente de Ecuador - Sur de Colombia: implicacionese sobre la transferencia de masa y la edad de la subducción de la Cordillera de Carnegie. Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos, January, 47-74 p.

Congalton, R. G. (1988). Using Spatial Autocorrelation Analysis to Explore the Errors in Maps Generated from Remotely Sensed Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 54: 593-600.

Congalton, R. G. & Mead, R. A. (1983). A Quantitative Method to Test for Consistency and Correctness in Photointerpretation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 49: 69-74.

CNRH [Consejo Nacional de Recursos Hídricos]. (2002). Gestión de los recursos hídricos del ecuador. Políticas y estrategias. Quito, Ecuador. 17.

Custodio, E., y Llamas, M. R. (1983): Hidrogeología subterránea. Ed. Omega. Barcelona. 1757.

Danés, C. (2005). Manual para la identificación de las presiones y análisis del impacto en aguas superficiales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

Djoukbala, O., Hasbaia, M., Benselama, O., & Mazour, M. (2018). Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a

Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (N-W of Algeria). Modeling Earth Systems and Environment. Vol. 5, p. 725-743.
Dombeck, M. (2018). United States Forest Service. Bosque Nacional “El Yunque”. El agua y las cuencas hidrográficas. Puerto Rico, USA. 2p.
Doorenbos, J., & Pruitt, W. (1977). Las Necesidades de Agua de los Cultivos. FAO. Riego y Drenaje. 24. Roma, Italia. 194.
Dourojeanni, A., Jouravlev, A., Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. Serie recursos naturales e infraestructura, CEPAL ONU. Santiago de Chile, Chile. 83.
Eastman, J. R., Ravelo, A. C., Santa, J. A., Abril, E. G., Gleiser, R. y Grilli, M. (2012). IDRISI Selva: Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Clark Universiry. Massachusetts, USA. 321.
Eischeid J. K., Pasteris, P. A., Diaz, H. F., Plantico, M. S., & Lott, N. J. (2000). Creating a serially complete, national daily time series of temperature and precipitation for the western United States. Journal of Applied Meteorology. Vol. 39. 1580-1591.
Eisenberg, J. (2020). Quantification of Erosion in Selected Catchment Areas of the Ruzizi River (DRC) Using the (R)USLE Model. Land, vol. 9, nº 4, p. 125.
EOS [Earth Observing System]. (2022). Sistema de Observación de la Tierra. https://eos.com/find-satellite
ERDAS [Earth Resources Data Analysis System]. (1997). In ERDAS - Imagine 8.3 tour guide Atlanta GA.
Espinoza, A. (2012). Balance hídrico río El Ángel. Universidad San Francisco de Quito. 79.
EEA [European Environment Agency]. (1995). CORINE Land Cover. Commission of the European Communities.
FAO [Food and Agriculture Organisation]. (2016). El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2016. Cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria. Roma. 214p. www.fao.org/3/a-i6030s.pdf
Faustino, J. (1996). Gestión ambiental para el manejo de cuencas municipales. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Área de cuencas y sistemas agroforestales. Costa Rica.
Fernandez Garcia S., & Gil Docampo. M. (2012). Topografía y geomática básicas en ingeniería. Bellisco Ediciones. 375.
Fernández-González, A., & Aylward, B. (1999). Participación, pluralismo y policentricidad: Reflexiones desde el manejo de cuencas en Costa Rica. Unasylva, 49(199). San José, Costa Rica. 52-59.
Fierro, D., & Jiménez, L. (2011). Caracterización de la microcuenca del Río Manzano, Cantón Alausí, Provincia de Chimborazo y propuesta de plan de manejo, Utilizando Herramientas SIG. Sangolqui, Ecuador. 237. repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4531/1/T-ESPE-032673.pdf
Flores R., E., & Parra U., A. (1997). Los sistemas de información geográfica en la clasificación - evaluación de tierras. Geoenseñanza, 2(1), 129-141.
Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. Remote Sensing of Environment. 80: 185-201.
Forbes, F., & Hodges, R. (1971). New Approaches to Comprehensive Planning in Canada. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. Vol. 7(5). 1059-1070.

Fournier, F. (1960). Climat et érosion: La relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. Presses Universitaires de France.

Francke, S. (2002). La situación del manejo de cuencas en Chile. Santiago de Chile, Chile.

Franco, R. (2017). Composiciones Landsat en ARCGIS. Guía Básica. Bogotá, Colombia. 45. Consultado el 12 de enero del 2019. Disponible en: http://wp.me/p2IwQU-1bh

Fuller, D. O., Hardiono, M., & Meijaard, E. (2011). Deforestation projections for carbon-rich peat swamp forests of Central Kalimantan, Indonesia. Environmental Management. 48(3). 447. https://doi.org/10.1007/s00267-011-9643-2

Fuster, R. (2013). El estado de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en Chile: Estudios de casos en la cuenca del Río Limarí. Tesis de Doctor en Ciencias Ambientales por la Universitat Autònoma de Barcelona: Departamento de Geografía. Barcelona, España. 130. http://www.tdx.cat/handle/10803/125651

Ganasri, B.P., & Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. Geoscience Frontiers. Vol. 7, nº 6.

García F., M., Alvira M., F., Alonso B., L., & Escobar M., M. (2016). El análisis de la realidad social. métodos y técnicas de investigación. Editores Alianza. Edición 4ª, 1ª Reimpresión. España. ISBN: 978-84-9104-111-5

García-Ruiz, J. M., Beguería, S., Lana-Renault, N., Nadal-Romero, E. & Cerdà, A. (2017). Ongoing and Emerging Questions in Water Erosion Studies. Land Degradation & Development. Vol. 28, nº 1, pp. 5-21.

Garriga A., Lubin P., Merino J., Padilla M., Recio P. & Suárez J. (2010). Introducción al análisis de datos. UNED. Madrid, España.

Gaspari, F., Senisterra, G., Delgado, M., Rodríguez, A., & Besteiro, S. (2010). Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Grupo de Manejo de Cuencas. La Plata, Argentina. 321.

Gaspari, F. J. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del Río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. Séptimo congreso de medio ambiente AUMG. La Plata, Argentina.

GWP [Global Water Partnership]. (2009). Manual para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en Cuencas. 112.

Gómez, D. (1994). Ordenación del Territorio. Una aproximación desde el Medio Físico. Editorial Agrícola Española S.A. Madrid, España.

González Bernaldez. (1992). Los paisajes del agua: Terminología popular de los humedales. J. Reyero (Ed). Madrid, España. 215.

González, N., Gebhard, J., & Hernandez, M. (1997). La teledetección en la investigación geohidrológica. Instituto de Geomorfología y Suelos - Centro de Investigaciones en Suelos y Agua de uso agropecuario. Universidad Nacional de La Plata. Bolsón de Mazán. La Rioja, Argentina.

Gravelius, H. (1914). Flusskunde. Goschen Verlagshan dlug Berlin. En Zavoianu, I. (1985). Morphometry of Drainage Bassins. Developments in water science, 20. Elsevier, Amsterdam. 238p. ISBN 0-444-99587-0

Green, W. H., & Ampt., G. A. (1911). Studies on soil physics. The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Sciences. 4(1). 11-24. https://doi.org/10.1017/S0021859600001441

Guevara, E., & Cartaya, H. (1991). Hidrología: una introducción a la ciencia hidrológica aplicada. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela. 358p.

Gutiérrez Ninahuamán, César. (2016). Programa informático PETP 2.0 para evaluar la evapotranspiración potencial. Ayacucho, Perú.

Hao, H., Wang, J., luGuo, Z. & Hua, L. (2019). Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland Flow. Catena, vol. 173, pp. 494-504.

Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Applied Engineering in Agriculture. 1. 96-99.

Hargreaves, G. L., Hargreaves, G. H. & Riley, J. P. (1985). Agricultural benefits for Senegal River Basin. J. Irrig. and Drain. Engr. 111(2). 113-124.

Hazeu, G. W. (2003). CLC 2000 land cover database of the Netherlands. Monitoring land cover changes between 1986 and 2000. Wageningen (Wageningen University and Research Centre, Alterra), 107.

HEC [Hydrologic Engineering Center]. (2019). U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin. Vol. 56. U.S.A. 275-370.

IEE [Instituto Espacial Ecuatoriano]. (2013). Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional a escala 1:25000. Ecuador.

Iglesias López, A., Ortiz Villalobos, G., Pons-Esparver, R., y César Minga, J. (2021). Aguas Subterráneas: Exploración, Evaluación, Caracterización y Gestión. JCI Ingeniería & Servicios Ambientales S.A.C. Lima, Perú. 762.

IGM [Instituto Geográfico Militar]. (1979a). Hoja geológica 48 “Quevedo”, escala 1:100.000.

IGM [Instituto Geográfico Militar]. (1979b). Hoja geológica 62 “Valencia”, escala 1:100.000.

IGM [Instituto Geográfico Militar]. (1979c). Hoja geológica 67 “El Empalme”, escala 1:100.000.

INAMHI [Instituto Nacional de Meteorología en Hidrología]. (2009). Caracterización hidrogeológica de la zona sur de la cuenca baja del Río Guayas. Quito, Ecuador. 47.

INAMHI [Instituto Nacional de Meteorología en Hidrología]. (2017). Red de estaciones meteorológicas convencionales. Datos climáticos históricos diarios de 5 estaciones “M0006, M0247, M0283, M0374 y M0556”. Ecuador.

INEFAN [Instituto Ecuatoriano Forestal y de Áreas Naturales]. (1995). Política forestal y de áreas naturales y vida silvestre. Quito, Ecuador.

Israelsen, O., & Hansen, V. (1965): Irrigation principles and practices. Jonh Wiley & Sons. Nueva York, U.S.A. 396.

Ivanov, S. V. (1954). Материалы по изобразительному искусству народов Сибири XIX-начала XX в. (сюжетный рисунок и другие виды изображений на плоскости). Germany. 838.

Izzard, C. F. (1946). Hydraulics of Runoff from Developed Surfaces, Proc. Highway Res, Board. Vol. 26. 129-150.

Jaber Al Rammahi, A. H., & Issa Khassaf, S. (2018). Estimation of soil erodibility factor in RUSLE equation for euphrates river watershed using G. Geomate. Vol. 14, nº 46, p. 164-169.

Jensen, J. R. (1996). Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective. Prentice-Hall, Inc. USA. 99.

Jiménez Otárola, F. (1994). Planificación y manejo de los recursos hidrológicos en la agricultura mediante el balance hídrico. Turrialba, Costa Rica. 37.

Kennedy, M. (2013). Introducing Geographic Information Systems with ArcGIS. A Workbook Approach to Learning GIS. University of Kentucky. Third Edition. USA. 674.

Kindsvater, C. E. (Ed.). (1964). Organization and Methodology for River Basin Planning: Review and Interpretation of Experiences in Water Resources Planning. Water Resources Center. Georgia Institute of Technology. Atlanta, Georgia, U.S.A. 105-132.

Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. Civ. Eng. (N.Y.). 10(6). Nueva York, USA. 362.

Klohm, Wulf, & Stanescu, Silvio. (1970). Magnitudes fisiográficas e índices morfométricos relacionados con la hidrología. Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología - SCMI. Santafé de Bogotá, Colombia.

Landis, R. J. & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. Biometrics, Vol. 33, No. 1. 159-174.

Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., & Chipman, J.W. (2008) Remote Sensing and Image Interpretation. 6th Edition, John Wiley & Sons. Hoboken, U.S.A.

Linsley, R., Kohler, M., & Paulus, J. (1977). Hidrología para ingenieros. MCGraw-Hill. Bogotá, Colombia. 398 p.

Llorens, P. (2003). La evaluación y modelización del balance hidrológico a escala de cuenca. Asociación Española de Ecología Terrestre. Alicante, España. 1-4. http://www.redalyc.org/pdf/540/54012111.pdf

Long W. & Srihann S. (2004). Land cover classification of SSC image: unsupervised and supervised classification using ERDAS Imagine. Texas, USA. ISBN: 0-7803-8742-2

López Cadenas, F. (1994). Restauración hidrológico forestal y control de la erosión. TRAGSA - Mundi-Prensa. 902 pp.

López J.J., Delgado, O., & Campo M.A. (2018). Determinación de las curvas IDF en Igueldo - San Sebastián. Comparación de diferentes métodos. Ingeniería del agua, 22(4), 209-223. https://doi.org/10.4995/Ia.2018.9480

López, M. P. (2012). Calibración del modelo para el transporte de contaminantes en los sedimentos en la cuenca de Jequetepeque, Cajamarca, Perú. TFM. Barcelona, España.

Lozano R., J. (1997). Principales enfoques acerca de la dimensión ambiental en los métodos actuales de planificación y desarrollo. Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia. 21-50.

Maderey Rascón, L. E., & Jiménez Román, A. (2005). Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico. Universidad Nacional Autónoma de México - Instituto de Geografía. México.

MAG [Ministerio de Agricultura y Ganadería]. (1983). Programa nacional de regionalización agraria “PRONAREG”. Mapa Morfo - Pedológico de Quevedo, escala 1:200000. Ecuador.

MAGAP [Ministerio de Agricultura Ganadería Acuacultura y Pesca]. (2005). Cartas Geológicas e Hidrogeológica, escala 1:100000. Ecuador.

MAGAP-MAE [Ministerio de Agricultura Ganadería Acuacultura y Pesca - Ministerio del Ambiente del Ecuador]. (2014). Protocolo metodológico para la elaboración del mapa de cobertura y uso de la tierra del Ecuador continental 2013-2014, escala 1:100000. Quito, Ecuador.

Markstrom, S. L., Regan, R. S., Hay, L. E., Viger, R. J., Webb, R. M. T., Payn, R. A., & LaFontaine, J. H. (2015). PRMS-IV, the precipitation-runoff modeling system. version 4: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. B7. 158. https://dx.doi.org/10.3133/tm6B7

Martin P., Restrepo M., Ángel S., Malagón M., & Zamora M. (2002). Agroecología. Palmira, Colombia. 334.

Martonne, E. (1940). Traité de Geographie Physique. Armand Colin. París.

Matt Ball (2009). What are some of the technological frontiers for GIS advancement?.

McCool, D.K., Brown, L.C., Foster, G.R., Mutchler, C.K., & Meyer, L.D. (1987). Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. Trans. ASAE, 30. pp. 1387-1396.

McIvor, I., Youjun, H., Daoping, G., & Eyles, Z. (2014). Agroforestry: Conservation Trees and Erosion Prevention. Encyclopedia of Agriculture and Food Systems.

Medellín, F. (1992). Lineamientos metodológicos básicos en ordenamiento ambiental. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. 14-23.

Mendes, J., Silva, T., Reis dos Santos, J., Naves, L., Santos, R., & Mincato, L. (2018). Water Erosion in Oxisols under Coffee Cultivation. Revista Brasileira de Ciência do Solo.

Miller, V. C. (1953). A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. Office of Naval Research, Geography Branch, Project NR 389-042, Technical Report 3. Columbia University. USA.

Monsalve, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. 2ª Edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. 382.

Monteith, J. L. (1965). Evaporation and the environment. In The state and movement of water in living organisms. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge University Press. London, U.K. 205-234.

MTC [Ministerio de transportes y comunicaciones]. (2008). Manual de hidrología, hidráulica y drenaje. Perú. 31-33.

Mueller, J. E. (1968). An Introduction to the Hydraulic and Topographic Sinuosity Indexes. Annals of the Association of American Geographers. 58:2. 371-385. https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1968.tb00650.x

Muñoz, E., Arumí, J. L., & Rivera, D. (2013). Watersheds are not static: Implications of climate variability and hydrologic dynamics in modeling. Chile. https://doi.org/10.4067/S0717-92002013000100002

Musy, A. (1998). Hydrologie appliquée, Cours polycopié d'hydrologie générale, Lausanne, Suisse.

Musy, A. (2001). e-drologie. Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, Suisse.
Nash J. E., & Sutcliffe J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models 1. A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10: 205-234.
Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2009). Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricutlural Research Service. Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station. Temple, Texas, USA. 494.
Nicks, A. D. (1974). Stochastic generation of the occurrence, pattern and location of maximum amount of daily rainfall. In processing simplificate statistical hydrology. Washington DC, USA. 154-171.
Nieto Cañarte, Carlos A., Guerrero Chuez, Norma M., Díaz Ponce Mariela A., & Burgos Carpio, Byron A. (2022). Descripción Hidrogeomorfológica de la Cuenca Alta del Rio Macul, Ecuador. Centrosur Agraria, E1.
Nocquet, J. M., Mothes, P., & Alvarado, A. (2009). Geodésia, geodinámica y ciclo sísmico en Ecuador. Geología y Geofísica Marina y Terrestre Del Ecuador, Spec. Pub. 83-95 p.
Ollero, A., Ballarín, D., & Mora, D. (2009). Guía metodológica: aplicación del índice hidrogeomorfológico IHG. Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Zaragoza, España. 93.
Ollero, A., Ballarín, D., Díaz Bea, E., Mora, D., Sánchez Fabre, M., Acín, V., Echeverría, M.T., Granado, D., Ibisate, A., Sánchez Gil, L., & Sánchez Gil, N. (2007) Un índice hidrogeomorfológico (IHG) para la evaluación del estado ecológico de sistemas fluviales. Geographicalia, 52. España. 113-141.
Oñate, F. (2009). Modelamiento semi-distribuido, con información escasa, de una cuenca hidrográfica para su planificación territorial. Tesis doctoral. Universidad de Alcalá. Madrid, España.
OMI [Organización Meteorológica Internacional]. (1935). VII Conferencia Meteorológica Internacional - OMI. Varsovia, Polonia.
OMM [Organización Meteorológica Mundial]. (1956). II Congreso - OMM, Ginebra, Suiza.
OMM [Organización Meteorológica Mundial]. (2009). Guía de prácticas hidrológicas. Volumen II: Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas N 168. Sexta edición. 184p.
Orellana, D., & Ballari, D. (2009). Geomática. La geoweb y su evolución: un marco de análisis en tres dimensiones. Revista verdad de la Universidad del Azuay. N 49. 240.
Palacios Ruiz, E. (2016). Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN. Nicaragua, Managua. 40.
Paradis, Michel (1981). De l'arpentage à la géomatique. Le géomètre canadien. 35(3). 262.
Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London, Inglaterra. 193. 120-45.
Peña, C., Carter, D., & Ayala-Fierro, F. (2001). Toxicología ambiental. Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental. 149.
Pérez Navarro, A. (2011). Introducción a los sistemas de información geográfica y geotelemática. Editorial UOC. Barcelona, España. 347.

Pérez, C., & Muñoz, Á. L. (2006). Teledetección: nociones y aplicaciones. Universidad de Salamanca. España. 378p.

Phinzi, Kwanele, & Ngetar, Njoya Silas. (2019). The assessment of water-borne erosion at catchment level using GIS-based RUSLE and remote sensing: A review. International Soil and Water Conservation. Vol. 7, nº 1, pp. 27-46.

Pozo, J., & Elosegi, A. (2009). El marco físico: La cuenca. Conceptos y Técnicas En Ecología Fluvial. Capítulo 3. 39-49.

Priestley C., H. B. & Taylor., R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Review. Vol. 100. 81- 92.

Proaño M., Gavilanes C., Valenzuela P. & Cisneros C. (2006). Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del Río Ambato. Proyecto Regional Cuencas Andinas (CONDESAN-REDCAPA-GTZ). Quito, Ecuador. 42p.

Quezada J., Cerda J., & Jensen A. (2010). Efectos de la tectónica y el clima en la configuración morfológica del relieve costero del Norte de Chile. Andean Geology. 37(1). Chile. 78-109.

Quiñonez Cóndor, J. F. (2019). Estimación de la erosión hídrica potencial en la cuenca media y alta del río Rímac, aplicación del modelo RUSLE. Lima, Perú.

Ramakrishna, B. (1997). Estrategias de Extensión para el Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas: Conceptos y Experiencias. Editorial de IICA. San José, Costa Rica. 338.

Ramírez López, J. L. (2015). Alternativas de manejo sustentable de la subcuenca del Río Pitura, provincia de Imbabura, Ecuador. Universidad Nacional de La Plata - Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Imbabura, Ecuador. 1-163.

Ramos, M. C., & Martínez-Casasnovas, J. A. (2004). Nutrient losses from a vineyard soil in Northeastern Spain caused by an extraordinary rainfall event. CATENA, 55(1). 79-90. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00074-2

Reyes, P., & Michaud, F. (2012). Mapa geológico del margen costero Ecuatoriano.

Ritter A., Muñoz C., R. & Regalado C. (2007). Capacidad de predicción de modelos aplicados a la ZNS: Herramienta informática para la adecuada evaluación de la bondad de ajuste con significación estadística. 260. http://www.zonanosaturada.com/zns11/publications/p259.pdf

Rodríguez Salazar, M., Álvarez Hernández, S. & Bravo Núñez, E. (2001). Coeficientes de Asociación. Editorial Plaza y Valdés S. A. México. 56.

Rogan, J., Franklin, J. & Roberts, D. A. (2002). A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. Remote Sensing o Environment. 80: 143-156.

Rojas Lazo, Oswaldo, & Rojas Rojas, Luis. (2006). Diseño asistido por computador. Industrial Data, vol. 9, núm. 1. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. 7-15 p.

Rosado Macias, O. P. (2021). Estimación de la erosión hídrica mediante la ecuación universal de la pérdida del suelo (USLE) en dos microcuencas agrícolas. Guayaquil, Ecuador.

Ruíz, J. (2001). Hidrología: evolución y visión sistémica, la morfometría de cuencas como aplicación. UNELLEZ. Barinas, Venezuela. 298p.

Sala, M. & Gay R. (1981). Algunos datos morfométricos de la cuenca de Isábena. Notes de Geografía Física. No. 4. Departamento de Geografía, Universitat de Barcelona. Barcelona, España. 41-65.

Salas, J. D., & Obeysekera, J. B. (1992). Conceptual basis of seasonal streamflow time series model, J. Hydraul. Eng. Vol. 8(118). 1186-1194.

Salvacion, A. R. (2020). Delineating soil erosion risk in Marinduque, Philippines using RUSLE. GeoJournal.

Sánchez San Román, F. (2015). Evapotranspiración (HEC-HMS - Manual elemental). Departamento de geología Universidad de Salamanca. España. 23p. http://hidrologia.usal.es/Complementos/Hec-hms-4.pdf

Sánchez San Román, F. (2022). Hidrología Superficial y Subterránea (hidrogramas). Dpto. Geología de la Universidad Salamanca. Kindle Direct Publishing. España. 10p. https://hidrologia.usal.es/temas/Hid_sup_2.pdf

Saha, S., Gayen, A., Pourghasemi, H. R., & Tiefenbacher, J. P. (2019). Identification of soil erosion-susceptible áreas using fuzzy logic and analytical hierarchy process modeling in an agricultural watershed of Burdwan district, India. Environmental Earth Sciences, 78(649) 649p. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8658-5

Schardong, A., & Simonovic, S. (2011). Multi-objective Evolutionary Algorithms for Water Resources Management. (Bol. Tec. N°78), Department of Civil and Environmental Engineering, University of Western Ontario. London, Ontario, Canadá. 167.

Schmidt, S., Tresch S., & Meusburger, K. (2019). Modification of the RUSLE slope length and steepness factor (LS-factor) based on rainfall experiments at steep alpine grasslands. MethodsX, vol. 6.

Schumm S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlans at Perth-Amboy. New-Jersey. Geo. Soc. Am. Bull. 597-646.

SENAGUA [Secretaría Nacional del Agua]. (2014). Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua. Quito, Ecuador. 175.

Sewnet Gelagay, Habtamu & Sewnet Minale, Amare. (2016). Soil loss estimation using GIS and Remote sensing techniques: A case of Koga watershed, Northwestern Ethiopia. International Soil and Water Conservation. vol. 4, nº 2, pp. 126-136.

Seyler, F., Chaplot, V., Muller, F., Cerri, C., Bernoux, M., Ballesters, V., Feller, C., & Cerri, C. (2002). Pasture mapping by classification of Landsat TM images. Analysis of the spectral behaviour of the pasture class in a real medium-scale environment: the case of the Piracicaba Catchment (12400km^2, Brazil). International Journal of Remote Sensing. 23 (23): 4985-5004.

Sharifi, S. & Hosseini, S. (2011). Methodology for identifying the best equations for estimating the time of concentration of watersheds in a particular region. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 137(11). 712-719.

Silva, O. (2015). Evaluación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca media del Río Pao. Instituto de Agronomía, Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. 36(3). Aragua, Venezuela. 134-145.

Smeeton, N. C. (1985). Early History of the Kappa Statistic. Biometrics 41. 795.

Soria, A., & Chebez, J. (2001). Plan General de Manejo del Parque Nacional Chaco: Versión Consensuada Mediante Taller Público. Secretaría de Turismo y Deporte - Presidencia de la Nación República Argentina. Chaco, Argentina. 208.

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin. 63(11). 1117-1142.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. Civil Engineering. 101. 1258-1262.

Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In Chow, V. T. (ed.) Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill. New York, USA. 439-476.

Strahler, A. S., Boschetti, L., Foody, G. B., & Friedl, M. A. (2006). Global Land Cover Validation: Recommendations for evaluations and accuracy assessment of Global Land Cover Maps. EUR 22156 EN Luxembourg, Office for Official Publication of the European Communities. 48.

Témez, J. R. (1978). Manual para el cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras, del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. España.

Témez, J. R. (1991). Extended and improved Rational Method. Proc. XXIV Congress, Madrid, España. Vol. A. 33-40.

Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev. 38. 55-94.

Torres B., E., Mejía S., E., Cortés B., J., Palacios V., E., & Exebio G., A. (2005). Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. Agrociencia, 39 (5). Guanajuato, México. 481-490.

Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., & Mora, H. P. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. Journal of South American Earth Sciences, 15(2). 157-171. https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00018-4

Tricart J. (1965). Principes et méthodes de la Géomorphologie. Ed. Masson. París. 496.

Tucci, C. E. M., (2009). Plan de Manejo Integrado de los Recursos Hídricos en la Cuenca Alta del Río Guayllabamba. Banco Interamericano de Desarrollo Económico (BID) y Fondo para la Protección del Agua (FONAG). 147.

UNESCO [United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization]. (1982). Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe - ROSTLAC. ISBN 92-3-302074-6. Montevideo, Uruguay. 147.

Urciuolo, A., Iturraspe, R., Rosanigo, B., Parson, A., Moyano, E., & Villarreal, M. (2007). Modelado de simulación hidrológica utilizando un enfoque de desarrollo basado en componentes. Patagonia, Argentina. 5p.

URISA [Urban and Regional Information Systems Association]. (2007). GIS Hall of Fame - Roger Tomlinson.

USDA-ARS [United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service]. (2019). SWAT - Soil and Water Assessment Tool. USA. Consultado el 25 de febrero del 2019. Disponible en: https://catalog.data.gov/dataset/swat-soil-and-water-assessment-tool

USDA-NRCS [United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service]. (2014). Claves para la taxonomía de suelos. Décima segunda Edición. USA. 410p.

USDA-SCS [United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service]. (1972) National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Washington DC, USA. 762.

USGS [United States Geological Survey]. (2019). Precipitation Runoff Modeling System (PRMS). https://www.usgs.gov/software/precipitation-runoff-modeling-system-prms

Valencia, C., & Zuluaga, O. (1981). Estudio preliminar del tiempo de concentración en algunas cuencas de Antioquia. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

Valencia, P. (2013). Consideraciones Jurídicas sobre el Ordenamiento Territorial Ambiental. Espacio y Desarrollo. Vol. 21. 139-169.

Van Griensven, A., Francos, A., & Bauwens, W. (2002). Sensitivity analysis and auto-calibration of an integral dynamic model for river water quality, Water Sci. Technol. 45(5). 321-328.

Vélez Upegui, J. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la Cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis, Manizales. Vol. 78, Núm. 165. 58-71.

Verdugo Cárdenas, M. (2017). Análisis morfométrico de las microcuencas a las que pertenece el bosque y vegetación protectora Aguarongo (bvpa), influencia en el comportamiento hidrológico. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador. 120p.

Viessmann, W., Knapp, J. W., Lewis, G. L., & Harbaugh, T. E. (1977). Introduction to hydrology. IEP A. Dundonnelley Publisher. New York, USA. 704.

Villón Béjar, Máximo. (2004). Hidrología. Cartago, Costa Rica. ISBN: 9977-66-159-6.

Villón Béjar, Máximo. (2007). Hidrología Estadística. Lima, Perú. 433p.

Villón Béjar, Máximo. (2016). HEC-HMS Ejemplo. Ed. 3. Lima, Perú. 1-70.

Watson, R. T., Noble, I. R., Bolin, B., Ravindranath, N.H., Verardo, D. J. y Dokken D. J. (2000). IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry. Implications of Different Definitions and Generic Issues. Noruega. http://www.grida.no/climate/ipcc/land_use/index.htm

Werner, Joerg. (1996). Introducción a la hidrogeología. Primera edición. Linares, Nuevo León, México. 101p. ISBN 968-6337-89-X

Werritty, A. (1997). Short-term changes in channel stability. Applied fluvial geomorphology for river engineering and management. In Thorne, C.R., Hey, R.D. and Newson, M.D. (eds.). Wiley. Chichester, England. 47-65.

Wheeler, J. O., & Brunn, S. D. (2002). An urban geographer before his time: C. Warren Thornthwaite's 1930 doctoral dissertation. Progress in Human Geography, 26(4), 463-486.

Winter, T., Avouac, J. P., & Lavenu, A. (1993). Late Quaternary kinematics of the Pallatanga strike-slip fault (Central Ecuador) from topographic measurements of displaced morphological features. Geophysical Journal International, 115(3). 905-920. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993.tb01500.x

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A gudie to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. USDA/Science and Education Administration. Washington, DC. 67p. http://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF

Xiong, M., Sun, R., & Chen, L. (2018). Effects of soil conservation techniques on water erosion control: A global análisis. Science of The Total Environment. Vol. 645, pp. 753-760.

Xu, C. Y., & Singh, V. P. (2004). Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. Water Resources Management. Vol. 18(6). 591-612.

Yacoub, C. & Pérez Foguet, A. (2011). Slope effects on SWAT modeling in a mountainous basin.

Yaguachi C., T. (2013). Diagnóstico ambiental y desarrollo del plan de manejo y conservación de la subcuenca del Río Chillayacu de la cuenca media del Río Jubones en la Provincia de El Oro. Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador. 188. http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/1282

ANEXOS

Anexo A. Número máximo de horas luz "N" para diferentes latitudes

horas	Hemisferio Sur											
Latitud	**Ene**	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Dic**
70°	24.0	17.4	13.0	8.4	2.7	0.0	0.0	6.4	11.2	15.7	21.7	24.0
68°	21.9	16.7	12.9	8.7	4.3	0.0	1.7	7.0	11.3	15.3	19.9	24.0
66°	20.1	16.2	12.8	9.1	5.3	2.0	3.7	7.6	11.3	15.0	18.8	22.1
64°	19.0	15.8	12.8	9.3	6.1	3.7	4.8	8.0	11.4	14.7	18.0	20.3
62°	18.3	15.5	12.7	9.6	6.7	4.8	5.6	8.3	11.4	14.5	17.4	19.2
60°	17.6	15.2	12.6	9.8	7.2	5.6	6.3	8.7	11.5	14.3	16.9	18.4
58°	17.1	14.9	12.6	9.9	7.6	6.2	6.8	8.9	11.5	14.1	16.5	17.8
56°	16.7	14.7	12.5	10.1	8.0	6.7	7.2	9.2	11.6	13.9	16.1	17.3
54°	16.3	14.5	12.5	10.2	8.3	7.2	7.6	9.4	11.6	13.8	15.8	16.9
52°	16.0	14.3	12.5	10.4	8.6	7.5	8.0	9.6	11.6	13.7	15.5	16.5
50°	15.7	14.2	12.4	10.5	8.8	7.9	8.3	9.7	11.7	13.6	15.3	16.1
48°	15.4	14.0	12.4	10.6	9.0	8.2	8.5	9.9	11.7	13.4	15.0	15.8
46°	15.2	13.9	12.4	10.7	9.2	8.5	8.8	10.0	11.7	13.3	14.8	15.5
44°	14.9	13.7	12.4	10.8	9.4	8.7	9.0	10.2	11.7	13.3	14.6	15.3
42°	14.7	13.6	12.3	10.8	9.6	9.0	9.2	10.3	11.7	13.2	14.4	15.0
40°	14.5	13.5	12.3	10.9	9.8	9.2	9.4	10.4	11.8	13.1	14.3	14.8
38°	14.4	13.4	12.3	11.0	9.9	9.4	9.6	10.5	11.8	13.0	14.1	14.6
36°	14.2	13.3	12.3	11.1	10.1	9.6	9.8	10.6	11.8	12.9	13.9	14.4
34°	14.0	13.2	12.2	11.1	10.2	9.7	9.9	10.7	11.8	12.9	13.8	14.3
32°	13.9	13.1	12.2	11.2	10.4	9.9	10.1	10.8	11.8	12.8	13.7	14.1
30°	13.7	13.0	12.2	11.3	10.5	10.1	10.2	10.9	11.8	12.7	13.5	13.9
28°	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8
26°	13.5	12.9	12.2	11.4	10.7	10.4	10.5	11.1	11.9	12.6	13.3	13.6
24°	13.3	12.8	12.2	11.4	10.8	10.5	10.7	11.2	11.9	12.6	13.2	13.5
22°	13.2	12.7	12.1	11.5	10.9	10.7	10.8	11.2	11.9	12.5	13.1	13.3
20°	13.1	12.7	12.1	11.5	11.1	10.8	10.9	11.3	11.9	12.5	13.0	13.2
18°	13.0	12.6	12.1	11.6	11.2	10.9	11.0	11.4	11.9	12.4	12.9	13.1
16°	12.9	12.5	12.1	11.6	11.3	11.1	11.1	11.5	11.9	12.4	12.8	12.9
14°	12.7	12.4	12.1	11.7	11.4	11.2	11.2	11.5	11.9	12.3	12.7	12.8
12°	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7
10°	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6
8°	12.4	12.3	12.1	11.8	11.6	11.5	11.6	11.7	12.0	12.2	12.4	12.5
6°	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3
4°	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2
2°	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1
0°	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0

Fuente: Allen (1995)

Anexo B. Radiación solar extraterrestre “Ra” para diferentes latitudes

MJ/m²/día[1]	Hemisferio Sur											
Latitud	**Ene**	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Dic**
70°	41.4	28.6	15.8	4.9	0.2	0.0	0.0	2.2	10.7	23.5	37.3	45.3
68°	41.0	29.3	16.9	6.0	0.8	0.0	0.0	3.2	11.9	24.4	37.4	44.7
66°	40.9	30.0	18.1	7.2	1.5	0.1	0.5	4.2	13.1	25.4	37.6	44.1
64°	41.0	30.8	19.3	8.4	2.4	0.6	1.2	5.3	14.4	26.3	38.0	43.9
62°	41.2	31.5	20.4	9.6	3.4	1.2	2.0	6.4	15.5	27.2	38.3	43.9
60°	41.5	32.3	21.5	10.8	4.4	2.0	2.9	7.6	16.7	28.1	38.7	43.9
58°	41.7	33.0	22.6	12.0	5.5	2.9	3.9	8.7	17.9	28.9	39.1	44.0
56°	42.0	33.7	23.6	13.2	6.6	3.9	4.9	9.9	19.0	29.8	39.5	44.1
54°	42.2	34.3	24.6	14.4	7.7	4.9	6.0	11.1	20.1	30.6	39.9	44.3
52°	42.5	35.0	25.6	15.6	8.8	6.0	7.1	12.2	21.2	31.4	40.2	44.4
50°	42.7	35.6	26.6	16.7	10.0	7.1	8.2	13.4	22.2	32.1	40.6	44.5
48°	42.9	36.2	27.5	17.9	11.1	8.2	9.3	14.6	23.3	32.8	40.9	44.5
46°	43.0	36.7	28.4	19.0	12.3	9.3	10.4	15.7	24.3	33.5	41.1	44.6
44°	43.2	37.2	29.3	20.1	13.5	10.5	11.6	16.8	25.2	34.1	41.4	44.6
42°	43.3	37.7	30.1	21.2	14.6	11.6	12.8	18.0	26.2	34.7	41.6	44.6
40°	43.4	38.1	30.9	22.3	15.8	12.8	13.9	19.1	27.1	35.3	41.8	44.6
38°	43.4	38.5	31.7	23.3	16.9	13.9	15.1	20.2	28.0	35.8	41.9	44.5
36°	43.4	38.9	32.4	24.3	18.1	15.1	16.2	21.2	28.8	36.3	42.0	44.4
34°	43.4	39.2	33.0	25.3	19.2	16.2	17.4	22.3	29.6	36.7	42.0	44.3
32°	43.3	39.4	33.7	26.3	20.3	17.4	18.5	23.3	30.4	37.1	42.0	44.1
30°	43.1	39.6	34.3	27.2	21.4	18.5	19.6	24.3	31.1	37.5	42.0	43.9
28°	43.0	39.8	34.8	28.1	22.5	19.7	20.7	25.3	31.8	37.8	41.9	43.6
26°	42.8	39.9	35.3	29.0	23.5	20.8	21.8	26.3	32.5	38.0	41.8	43.3
24°	42.5	40.0	35.8	29.8	24.6	21.9	22.9	27.2	33.1	38.3	41.7	43.0
22°	42.2	40.1	36.2	30.6	25.6	23.0	24.0	28.1	33.7	38.4	41.4	42.6
20°	41.9	40.0	36.6	31.3	26.6	24.1	25.0	28.9	34.2	38.6	41.2	42.1
18°	41.5	40.0	37.0	32.1	27.5	25.1	26.0	29.8	34.7	38.7	40.9	41.7
16°	41.1	39.9	37.2	32.8	28.5	26.2	27.0	30.6	35.2	38.7	40.6	41.2
14°	40.6	39.7	37.5	33.4	29.4	27.2	27.9	31.3	35.6	38.7	40.2	40.6
12°	40.1	39.6	37.7	34.0	30.2	28.1	28.9	32.1	36.0	38.6	39.8	40.0
10°	39.5	39.3	37.8	34.6	31.1	29.1	29.8	32.8	36.3	38.5	39.3	39.4
8°	38.9	39.0	37.9	35.1	31.9	30.0	30.7	33.4	36.6	38.4	38.8	38.7
6°	38.3	38.7	38.0	35.6	32.7	30.9	31.5	34.0	36.8	38.2	38.2	38.0
4°	37.6	38.3	38.0	36.0	33.4	31.8	32.3	34.6	37.0	38.0	37.6	37.2
2°	36.9	37.9	38.0	36.4	34.1	32.6	33.1	35.2	37.1	37.7	37.0	36.4
0°	36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6
Convertir los valores a mm/día, se dividen para Lambda (2.45)												

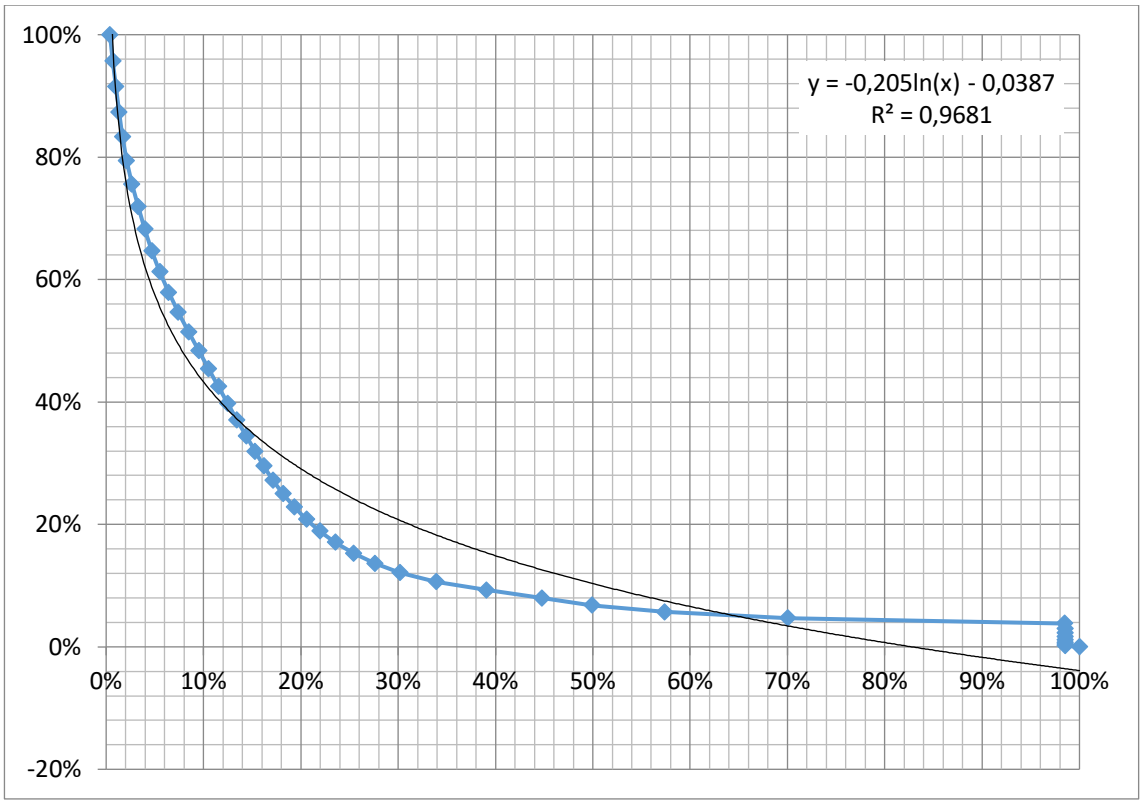
Fuente: Allen (1997)

Anexo C. Curva hipsométrica y Altura media de la cuenca

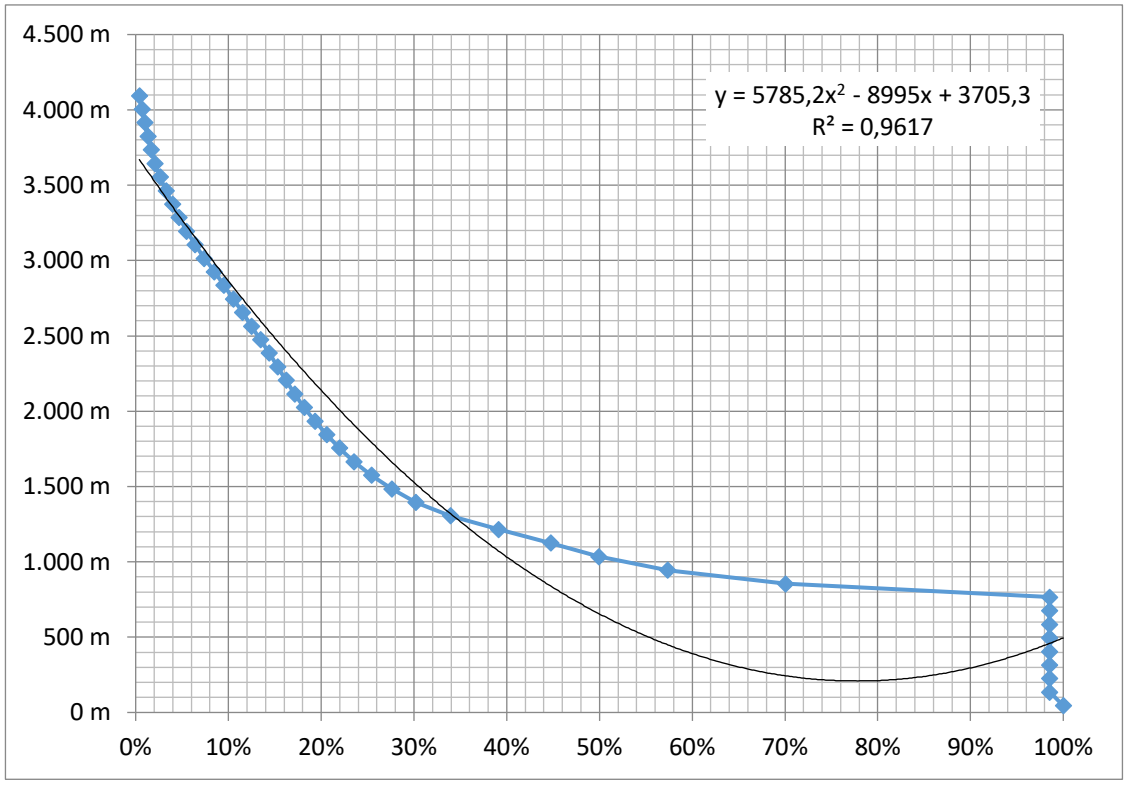
Cota					Área			Altura media
n	Intervalo	Media	Porcentaje	Acumulada	Bruta	Porcentaje	Acumulada	
01	4,050.00 m - 4,140.00 m	4,095.00 msnm	4.30%	100.00%	18.51 km²	0.39%	0.39%	16.07 msnm
02	3,960.00 m - 4,050.00 m	4,005.00 msnm	4.21%	95.70%	14.09 km²	0.30%	0.69%	11.96 msnm
03	3,870.00 m - 3,960.00 m	3,915.00 msnm	4.11%	91.49%	14.12 km²	0.30%	0.99%	11.72 msnm
04	3,780.00 m - 3,870.00 m	3,825.00 msnm	4.02%	87.38%	15.05 km²	0.32%	1.31%	12.20 msnm
05	3,690.00 m - 3,780.00 m	3,735.00 msnm	3.92%	83.36%	17.60 km²	0.37%	1.68%	13.94 msnm
06	3,600.00 m - 3,690.00 m	3,645.00 msnm	3.83%	79.44%	19.37 km²	0.41%	2.09%	14.97 msnm
07	3,510.00 m - 3,600.00 m	3,555.00 msnm	3.73%	75.61%	25.98 km²	0.55%	2.64%	19.58 msnm
08	3,420.00 m - 3,510.00 m	3,465.00 msnm	3.64%	71.88%	30.25 km²	0.64%	3.29%	22.22 msnm
09	3,330.00 m - 3,420.00 m	3,375.00 msnm	3.54%	68.24%	32.72 km²	0.69%	3.98%	23.41 msnm
10	3,240.00 m - 3,330.00 m	3,285.00 msnm	3.45%	64.70%	33.06 km²	0.70%	4.68%	23.02 msnm
11	3,150.00 m - 3,240.00 m	3,195.00 msnm	3.36%	61.25%	38.79 km²	0.82%	5.50%	26.27 msnm
12	3,060.00 m - 3,150.00 m	3,105.00 msnm	3.26%	57.89%	43.08 km²	0.91%	6.42%	28.36 msnm
13	2,970.00 m - 3,060.00 m	3,015.00 msnm	3.17%	54.63%	45.94 km²	0.97%	7.39%	29.36 msnm
14	2,880.00 m - 2,970.00 m	2,925.00 msnm	3.07%	51.47%	51.05 km²	1.08%	8.47%	31.66 msnm
15	2,790.00 m - 2,880.00 m	2,835.00 msnm	2.98%	48.39%	48.78 km²	1.03%	9.51%	29.32 msnm
16	2,700.00 m - 2,790.00 m	2,745.00 msnm	2.88%	45.42%	47.63 km²	1.01%	10.52%	27.72 msnm
17	2,610.00 m - 2,700.00 m	2,655.00 msnm	2.79%	42.53%	48.19 km²	1.02%	11.54%	27.12 msnm
18	2,520.00 m - 2,610.00 m	2,565.00 msnm	2.69%	39.74%	44.98 km²	0.95%	12.49%	24.46 msnm
19	2,430.00 m - 2,520.00 m	2,475.00 msnm	2.60%	37.05%	44.86 km²	0.95%	13.44%	23.54 msnm
20	2,340.00 m - 2,430.00 m	2,385.00 msnm	2.50%	34.45%	44.96 km²	0.95%	14.40%	22.73 msnm
21	2,250.00 m - 2,340.00 m	2,295.00 msnm	2.41%	31.95%	42.61 km²	0.90%	15.30%	20.73 msnm
22	2,160.00 m - 2,250.00 m	2,205.00 msnm	2.32%	29.54%	42.70 km²	0.91%	16.20%	19.96 msnm
23	2,070.00 m - 2,160.00 m	2,115.00 msnm	2.22%	27.22%	43.93 km²	0.93%	17.14%	19.70 msnm
24	1,980.00 m - 2,070.00 m	2,025.00 msnm	2.13%	25.00%	48.95 km²	1.04%	18.17%	21.01 msnm

Cota					Área			Altura media
n	Intervalo	Media	Porcentaje	Acumulada	Bruta	Porcentaje	Acumulada	
25	1,890.00 m - 1,980.00 m	1,935.00 msnm	2.03%	22.87%	54.29 km²	1.15%	19.32%	22.27 msnm
26	1,800.00 m - 1,890.00 m	1,845.00 msnm	1.94%	20.84%	59.53 km²	1.26%	20.59%	23.28 msnm
27	1,710.00 m - 1,800.00 m	1,755.00 msnm	1.84%	18.90%	64.52 km²	1.37%	21.95%	24.01 msnm
28	1,620.00 m - 1,710.00 m	1,665.00 msnm	1.75%	17.06%	74.46 km²	1.58%	23.53%	26.28 msnm
29	1,530.00 m - 1,620.00 m	1,575.00 msnm	1.65%	15.31%	88.36 km²	1.87%	25.41%	29.50 msnm
30	1,440.00 m - 1,530.00 m	1,485.00 msnm	1.56%	13.66%	103.62 km²	2.20%	27.60%	32.62 msnm
31	1,350.00 m - 1,440.00 m	1,395.00 msnm	1.47%	12.10%	123.11 km²	2.61%	30.21%	36.41 msnm
32	1,260.00 m - 1,350.00 m	1,305.00 msnm	1.37%	10.63%	175.54 km²	3.72%	33.93%	48.57 msnm
33	1,170.00 m - 1,260.00 m	1,215.00 msnm	1.28%	9.26%	243.16 km²	5.16%	39.09%	62.63 msnm
34	1,080.00 m - 1,170.00 m	1,125.00 msnm	1.18%	7.99%	267.06 km²	5.66%	44.75%	63.69 msnm
35	990.00 m - 1,080.00 m	1,035.00 msnm	1.09%	6.81%	243.44 km²	5.16%	49.91%	53.42 msnm
36	900.00 m - 990.00 m	945.00 msnm	0.99%	5.72%	351.82 km²	7.46%	57.37%	70.48 msnm
37	810.00 m - 900.00 m	855.00 msnm	0.90%	4.73%	598.42 km²	12.69%	70.06%	108.47 msnm
38	720.00 m - 810.00 m	765.00 msnm	0.80%	3.83%	1,341.60 km²	28.44%	98.50%	217.58 msnm
39	630.00 m - 720.00 m	675.00 msnm	0.71%	3.02%	0.51 km²	0.01%	98.51%	0.07 msnm
40	540.00 m - 630.00 m	585.00 msnm	0.61%	2.32%	0.24 km²	0.01%	98.51%	0.03 msnm
41	450.00 m - 540.00 m	495.00 msnm	0.52%	1.70%	0.15 km²	0.00%	98.52%	0.02 msnm
42	360.00 m - 450.00 m	405.00 msnm	0.43%	1.18%	0.14 km²	0.00%	98.52%	0.01 msnm
43	270.00 m - 360.00 m	315.00 msnm	0.33%	0.76%	0.07 km²	0.00%	98.52%	0.00 msnm
44	180.00 m - 270.00 m	225.00 msnm	0.24%	0.43%	0.08 km²	0.00%	98.52%	0.00 msnm
45	90.00 m - 180.00 m	135.00 msnm	0.14%	0.19%	0.02 km²	0.00%	98.52%	0.00 msnm
46	0.00 m - 90.00 m	45.00 msnm	0.05%	0.05%	69.60 km²	1.48%	100.00%	0.66 msnm
Sumatoria (Σ)		95,220.00 msnm	100.00%	**Σ**	4,716.94 km²	100.00%	**Σ**	1,341.07 msnm

Anexo D. Curva hipsométrica de la cuenca del río Vinces



Anexo E. Altura media de la cuenca del río Vinces



Anexo F. Jerarquización de la cuenca del río Vinces

u	Color	N	L	Lu	Rb	Fu	Rl	Dd
01	Violeta	34.00	221.04 km	6.50 km	3.09	Ct = 0.01	0.79	0.05 km/km²
02	Verde	11.00	175.33 km	15.94 km	2.75	0.00	0.79	0.04 km/km²
03	Amarillo	4.00	138.90 km	34.73 km	4.00	0.00	1.75	0.03 km/km²
04	Azul	1.00	242.48 km	242.48 km		0.00		0.05 km/km²
Sumatoria "Σ"		50.00	777.75 km		Natural	0.01		Muy baja
Promedio "x̄"		12.50	194.44 km	74.91 km	3.28	Gruesa	Dc = 1.11	0.04 km/km²

u = Orden o tributario

N = Número de orden

L = Longitud de los órdenes o tributarios

Lu = Longitud media de los órdenes o tributarios

Rb = Relación de bifurcación (variaciones geoecológicas de la cuenca, cambios en el sustrato rocoso y grupos de suelos)

Fu = Frecuencia de los tributarios (número de cauces por unidad de superficie e índice de la textura del drenaje)

Ct = Coeficiente de Torrencialidad (primer resultado de la Frecuencia de los tributarios "Fu")

Rl = Relación de longitud (el promedio es la Densidad de corriente “Dc”)

Dd = Densidad de drenaje (número de cauces existentes por Km²)

Anexo G. Datos climáticos de la estación M0006

Resumen estadístico multianual															
País:	Ecuador		**Estación:**	Pichilingue			**Código:**	M0006		**Periodo:**		1990 - 2013			
Provincia:	Los Ríos		**Latitud:**	1°	5'	24"	S	-1.090		**Altitud "Z":**		120.00 m.s.n.m.			
Cantón:	Mocache		**Longitud:**	79°	28'	6"	W	-79.468		**Presión "P_{atm}":**		998.96 hPa			
Datos	**Ene**	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Dic**	**x̄**	**Σ**	
HELIOFANIA (Horas)	67.41	74.48	109.69	111.41	80.65	56.64	59.84	66.25	70.47	56.40	52.12	62.15	72.29		
TEMPERATURA ABSOLUTA MAX. (ºC)	33.15	32.74	33.41	33.44	32.91	32.03	31.60	32.34	33.63	33.72	33.90	33.95	33.07		
TEMPERATURA ABSOLUTA MIN. (ºC)	20.75	21.07	21.34	21.23	20.77	19.57	18.57	17.93	18.81	19.27	18.96	19.95	19.85		
TEMPERATURA MEDIA MAX. (ºC)	29.81	30.23	31.10	31.37	30.04	28.52	28.32	28.66	29.70	29.62	30.02	30.12	29.79		
TEMPERATURA MEDIA MIN. (ºC)	22.21	22.49	22.73	22.69	22.49	21.39	20.98	20.18	20.54	20.91	21.13	21.86	21.63		
TEMPERATURA MEDIA MEN. (ºC)	25.45	25.69	26.24	26.20	25.72	24.48	23.86	23.77	24.52	24.73	25.10	25.44	25.10		
HUMEDAD RELATIVA MAX. (%)	98.86	99.00	98.91	98.65	98.83	98.90	98.61	98.41	97.85	97.35	97.17	98.13	98.39		
HUMEDAD RELATIVA MIN. (%)	58.23	60.08	60.18	59.78	61.13	63.55	62.39	60.45	54.81	52.91	49.21	51.17	57.83		
HUMEDAD RELATIVA MED. (%)	84.46	86.00	84.79	85.33	85.58	86.13	84.88	83.25	79.58	78.46	76.54	78.38	82.78		
PUNTO DE ROCIO (ºC)	22.43	22.99	23.30	23.36	22.95	21.95	21.10	20.61	20.57	20.52	20.46	21.33	21.80		
TENSION DE VAPOR (hPa)	27.15	28.07	28.62	28.73	35.53	26.38	25.06	24.30	24.27	24.17	24.09	25.44	26.82		
PRECIPITACION MENSUAL (mm)	377.86	459.11	446.77	435.51	164.00	43.11	30.25	10.28	24.33	22.32	64.78	128.15	183.87	2206.45	
PRECIPITACION MAX. 24 hr (mm)	72.99	90.11	83.47	101.95	44.45	16.80	12.40	4.60	10.05	11.32	17.66	35.86	41.81	501.68	
DIAS CON PRECIPITACION	25.71	24.25	24.74	24.39	18.39	9.67	5.96	4.71	6.29	7.61	8.25	17.67	14.80	177.63	
EVAPORACION MENSUAL (mm)	81.34	79.52	99.87	90.73	80.21	62.49	68.21	74.73	89.52	92.12	96.07	95.02	84.15	1009.82	
EVAPORACION MAX. 24 hr (mm)	5.60	5.56	6.03	5.27	5.00	4.10	4.19	4.45	5.30	5.35	5.76	5.68	5.19	62.27	
NUBOSIDAD (Octas)	6.37	6.37	6.21	6.16	6.35	7.00	6.25	6.25	5.84	7.15	6.75	6.30	7.00		
VELOCIDAD DEL VIENTO MAYOR "OBS" (m/s)	3.98	4.48	4.49	3.76	3.99	3.59	3.91	3.43	4.13	3.88	4.00	4.17	3.98		
DIRECCIÓN DEL VIENTO	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	NE	S		
VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIA (km/h)	2.11	2.04	2.00	1.85	1.66	1.78	1.96	2.08	2.37	2.50	2.55	2.42	2.11		
VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIA (m/s)	0.59	0.57	0.56	0.51	0.46	0.49	0.55	0.58	0.66	0.70	0.71	0.67	0.59		

Anexo H. Datos climáticos de la estación M0124

RESUMEN ESTADÍSTICO MULTIANUAL															
País:	Ecuador			**Estación:**	San Juan			**Código:**	M0124		**Periodo:**		1990 - 2013		
Provincia:	Cotopaxi			**Latitud:**	0°	57'	15"	S	-0.954		**Altitud "Z":**		215.00 m.s.n.m.		
Cantón:	La Maná			**Longitud:**	79°	19'	8"	W	-79.319		**Presión "P_{atm}":**		987.72 hPa		
Datos	**Ene**	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Dic**	**X̄**	**Σ**	
HELIOFANIA (Horas)	38.58	54.75	88.13	73.65	60.75	31.15	53.46	60.98	52.33	42.55	45.92	45.59	53.99		
TEMPERATURA ABSOLUTA MAX. (ºC)	31.10	31.30	31.74	31.98	31.33	29.91	30.31	30.68	31.46	31.01	31.50	30.88	31.10		
TEMPERATURA ABSOLUTA MIN. (ºC)	18.85	18.98	18.23	29.02	18.43	18.95	17.22	16.47	17.69	18.32	17.83	17.72	18.98		
TEMPERATURA MEDIA MAX. (ºC)	28.11	28.71	29.56	29.28	28.40	26.45	26.34	26.70	27.74	27.44	27.68	28.16	27.88		
TEMPERATURA MEDIA MIN. (ºC)	19.74	20.07	20.40	20.77	20.67	19.59	19.38	19.09	19.16	19.31	19.26	19.93	19.78		
TEMPERATURA MEDIA MEN. (ºC)	24.13	24.58	25.03	25.09	24.56	23.42	22.92	22.86	22.99	23.08	23.32	23.85	23.82		
HUMEDAD RELATIVA MAX. (%)	98.89	98.93	98.31	98.64	98.50	98.91	98.69	98.77	98.00	98.27	98.56	97.38	98.49		
HUMEDAD RELATIVA MIN. (%)	68.11	68.20	67.69	67.21	66.33	72.82	72.92	72.92	64.94	70.27	67.28	66.06	68.73		
HUMEDAD RELATIVA MED. (%)	85.30	85.42	84.95	84.74	87.45	86.83	91.18	90.26	85.00	84.89	83.25	84.00	86.11		
PUNTO DE ROCIO (ºC)	22.43	22.85	23.17	23.30	23.07	22.14	21.57	21.46	21.16	21.46	21.27	21.92	22.15		
TENSION DE VAPOR (hPa)	27.21	27.97	28.49	28.71	162.05	26.77	25.85	25.54	25.22	25.35	25.42	26.40	37.91		
PRECIPITACION MENSUAL (mm)	418.59	513.01	548.51	512.42	240.40	47.56	38.11	27.97	27.73	32.39	41.97	189.00	219.80	2637.65	
PRECIPITACION MAX. 24 hr (mm)	84.72	88.83	98.11	102.41	65.47	17.99	14.41	8.13	8.33	17.47	16.97	53.64	48.04	576.46	
DIAS CON PRECIPITACION	23.45	23.45	24.42	22.88	19.11	12.70	10.30	9.32	11.90	13.37	13.70	21.17	17.15	205.76	
EVAPORACION MENSUAL (mm)															
EVAPORACION MAX. 24 hr (mm)															
NUBOSIDAD (Octas)	6.21	6.05	6.11	6.00	6.11	6.33	6.33	6.26	6.44	6.39	6.35	6.35	7.00	74.94	
VELOCIDAD DEL VIENTO MAYOR "OBS" (m/s)	3.05	3.50	3.00	3.05	3.21	2.88	3.11	3.16	3.50	3.17	2.85	3.28	3.15	37.76	
DIRECCIÓN DEL VIENTO	NE	N	NE	E	NE	E	S	S	S	NE	NE	NE	NE		
VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIA (km/h)															
VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIA (m/s)															

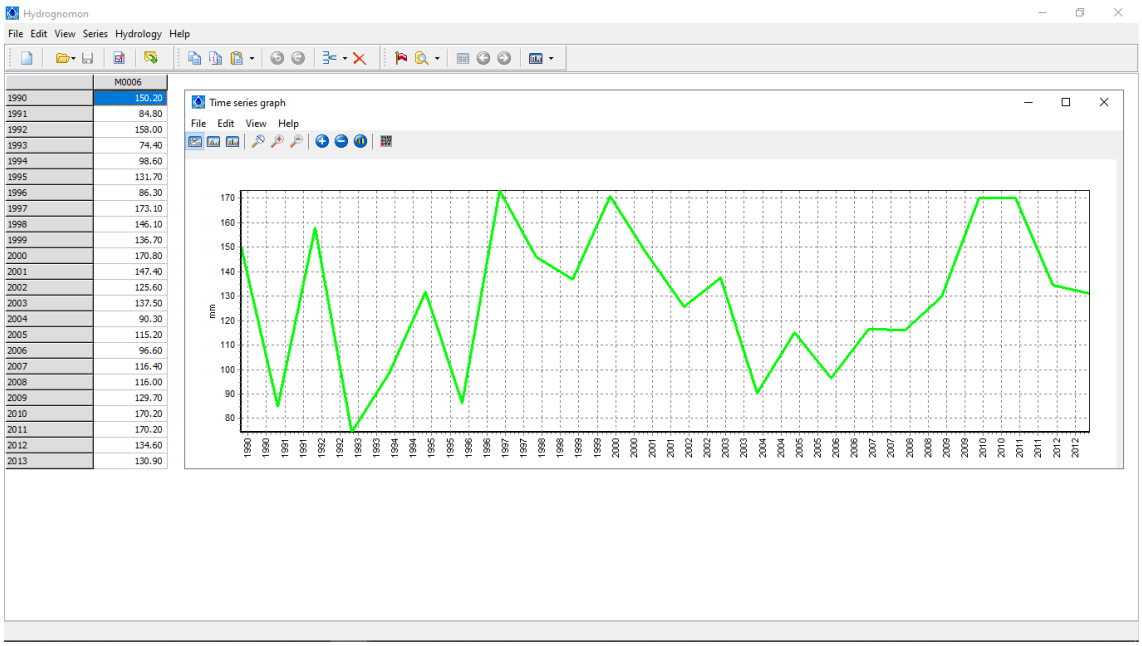
Anexo I. Datos mensuales de Pmax en 24 horas de la estación M0006

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Máximo
1990	54.30	150.20	59.40	80.80	14.20	17.80	3.50		0.60		6.40	23.00	150.20
1991	65.20	84.80	84.40	57.70	16.10	6.00	0.40	0.30	0.40	3.50	22.30	53.10	84.80
1992	87.60	49.40	108.30	158.00	69.70	58.00	10.80	0.40	3.20	2.10	1.00	38.70	158.00
1993	67.00	71.80	56.50	74.40	28.00	28.60	0.80	3.60	2.40	21.20	0.50	46.20	74.40
1994	98.60	57.10	67.80	55.20	18.40	2.90	0.10	0.10	1.10	70.70	7.70	38.40	98.60
1995	128.50	82.10	50.90	131.70	28.70	4.00	7.50	2.00	1.60	3.60	22.00	24.70	131.70
1996	50.10	65.60	76.20	86.30	10.10	2.10	11.70	6.00	0.30	1.80	6.50	19.00	86.30
1997	63.10	158.80	88.80	54.20	76.60	53.70	84.40	22.60	112.60	53.10	173.10	87.80	173.10
1998	108.30	104.40	146.10	95.90	133.40	77.80	64.60	3.00	2.60	4.20	30.20	13.30	146.10
1999	29.80	84.80	102.80	115.00	136.70	1.60	3.10	0.40	82.60	5.50	11.60	22.80	136.70
2000	58.80	51.00	94.30	170.80	49.60	9.20	0.20	1.00	5.50	5.00	5.20	31.40	170.80
2001	147.40	45.50		104.30	38.00	1.10	1.80	0.00	0.70	0.20	3.30	21.00	147.40
2002	50.00	73.50	104.20	125.60	28.60	9.40	1.60	0.40	0.50	7.50	41.50	76.60	125.60
2003	86.20	137.50	37.70	102.20	39.20	11.30	33.50	5.80	0.90	58.60	44.60	82.70	137.50
2004	74.60	70.00	90.30		73.10	8.40	2.90	0.90	8.00	3.30	1.60	7.60	90.30
2005	39.40	48.10	62.20	115.20		0.20		0.40	1.10	0.50	2.00	44.40	115.20
2006	59.40	63.90	96.60	56.10	11.00	6.40	2.70	5.60	8.80	2.40	14.00	10.60	96.60
2007	43.20	116.40	69.10	100.20	35.00	19.00	11.70	0.20	0.30	1.10	7.10	14.90	116.40
2008	63.80	116.00	88.60	79.50	59.00	2.30	5.40	48.90	2.20	5.20	5.00	13.30	116.00
2009	66.30	73.10	129.70	94.00	52.80	8.60	1.40	0.40	0.20	2.70	0.10	31.00	129.70
2010	83.20	114.10	28.90	170.20	6.60	31.10	17.60	0.90	1.40	1.60	3.50	62.00	170.20
2011	83.20	114.10	28.90	170.20	6.60	31.10	17.60	0.90	1.40	1.60	3.50	62.00	170.20
2012	83.20	99.60	134.60	76.40	72.20	5.90	1.70	0.80	0.80	3.20	11.00	21.60	134.60
2013	60.60	130.90	113.60	71.00	18.70	6.60	0.30	1.30	2.10	1.80	0.20	14.60	130.90

Anexo J. Datos mensuales de Pmax en 24 horas de la estación M0124

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Máximo
1990	37.20	74.40			38.60	6.30	16.50	2.00	3.20	4.10	9.10	75.70	75.70
1991	45.90	65.20	65.40	110.40	50.80	22.50	8.80	2.00	3.20	3.50	15.50	58.60	110.40
1992	84.72	88.83	98.11	102.41	65.47	17.99	14.41	8.13	8.33	17.47	16.97	53.64	102.41
1993	75.20												75.20
1994	84.72	88.83	98.11	102.41	65.47	17.99	14.41	8.13	8.33	17.47	16.97	53.64	102.41
1995		52.30	76.50	75.00	70.00	22.70		8.00	2.00	47.30	16.00	126.00	126.00
1996	66.00	107.50	156.20	160.00	8.20	2.30	3.00	15.00	8.80	2.50	63.00	26.00	160.00
1997	79.00	62.00	85.00	61.00			78.00						85.00
1998	106.30	111.80	77.70	97.50	75.20	7.20	6.70	1.60	21.60	16.80	10.90	67.40	111.80
1999	106.30	111.80	77.70	97.50	75.20	7.20	6.70	1.60	21.60	16.80	10.90	67.40	111.80
2000	62.30	39.50	81.70	63.20	92.30	40.00	0.80	5.40	7.00	7.20	4.00	72.00	92.30
2001	165.80	115.60	149.40	115.50	121.20	3.40	10.50	1.50	8.00	4.30	6.50	24.20	165.80
2002	75.70		148.80			35.70	4.00	3.50	3.50	62.50	35.20	66.80	148.80
2003	67.20	92.50	92.00	124.00	53.00	4.50	60.70	5.50	1.20	78.50	34.00	64.20	124.00
2004	180.60	64.00	55.50	150.50	73.40	14.30	5.20	2.80	19.20	29.40	2.30		180.60
2005		98.60	63.80		4.20	1.00	4.00		2.20		10.00	25.40	98.60
2006	94.20	144.60	104.60	118.20	39.00	25.20	2.00	7.40	14.50	3.20	57.40	41.20	144.60
2007	63.80	64.40	91.50	72.50	76.40	15.80	6.50	2.50	4.60	3.80	6.20		91.50
2008	71.30	74.10	73.00	75.50	55.20	27.00	8.20	67.00	4.20	15.80	10.10	14.00	75.50
2009	99.50	66.00		79.90	73.20	11.50	1.50	18.50	6.20	5.60	11.60	84.00	99.50
2010	67.00	187.50	60.00	124.10	65.50	10.80	14.80	3.40	11.50	6.90	19.30	71.90	187.50
2011	91.30	105.40	63.30	118.60	35.50	13.00	35.80	1.20	15.50	8.00	2.60	31.20	118.60
2012	101.50	78.30	124.50	97.60	109.00	77.60	7.50	2.00	1.20	4.40	11.20	11.50	124.50
2013	38.20	61.00	217.40		128.00	11.80	7.00	3.50	7.30	11.40	3.60	38.00	217.40

Anexo K. Software HYDROGNOMON para la estación M0006



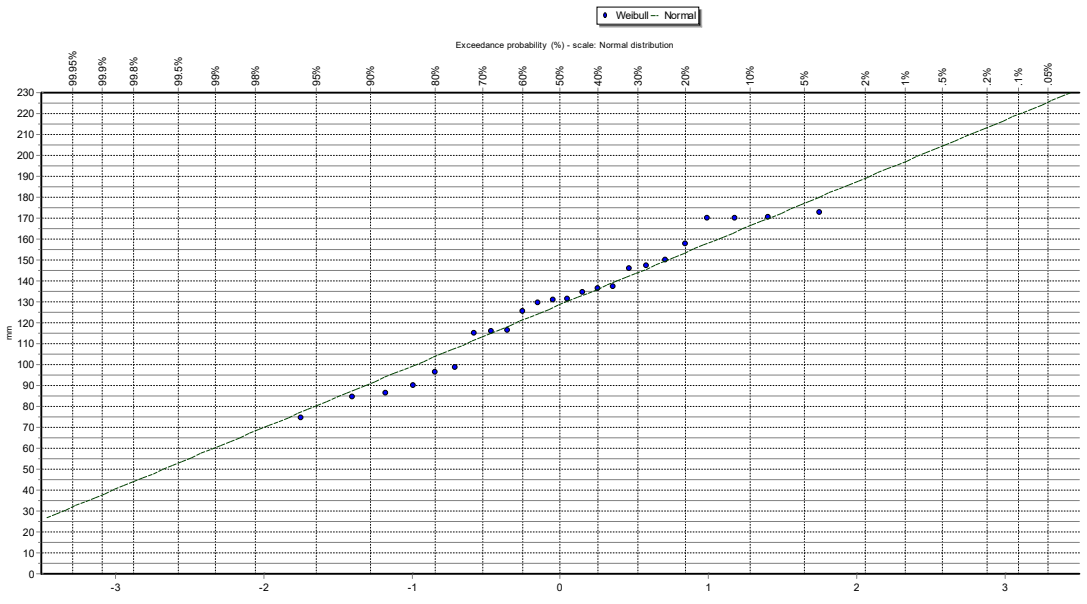
Anexo L. Prueba de Chi-cuadrado para M0006

Test X-Square	a=1%	a=5%	a=10%	Alcanzado	Pearson
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	60.65%	1.00000
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	60.65%	1.00000
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	49.25%	1.41667
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	49.25%	1.41667
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	49.25%	1.41667
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	49.25%	1.41667
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	23.40%	1.41667
Pareto	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	23.40%	1.41667
Pareto (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	23.40%	1.41667
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	32.47%	2.25000
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	26.36%	2.66667
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	26.36%	2.66667
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	26.36%	2.66667
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	26.36%	2.66667
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	26.36%	2.66667
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	10.25%	2.66667
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	10.25%	2.66667
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	10.25%	2.66667
Log Pearson III	ACCEPT	REJECT	REJECT	1.81%	5.58333
EV2-Max	ACCEPT	REJECT	REJECT	4.04%	6.41667
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	REJECT	REJECT	4.04%	6.41667
Exponential	ACCEPT	REJECT	REJECT	2.66%	7.25000
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	REJECT	REJECT	2.16%	7.66667
EV2-Max (L-Momments)	ACCEPT	REJECT	REJECT	2.16%	7.66667
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	REJECT	REJECT	2.16%	7.66667

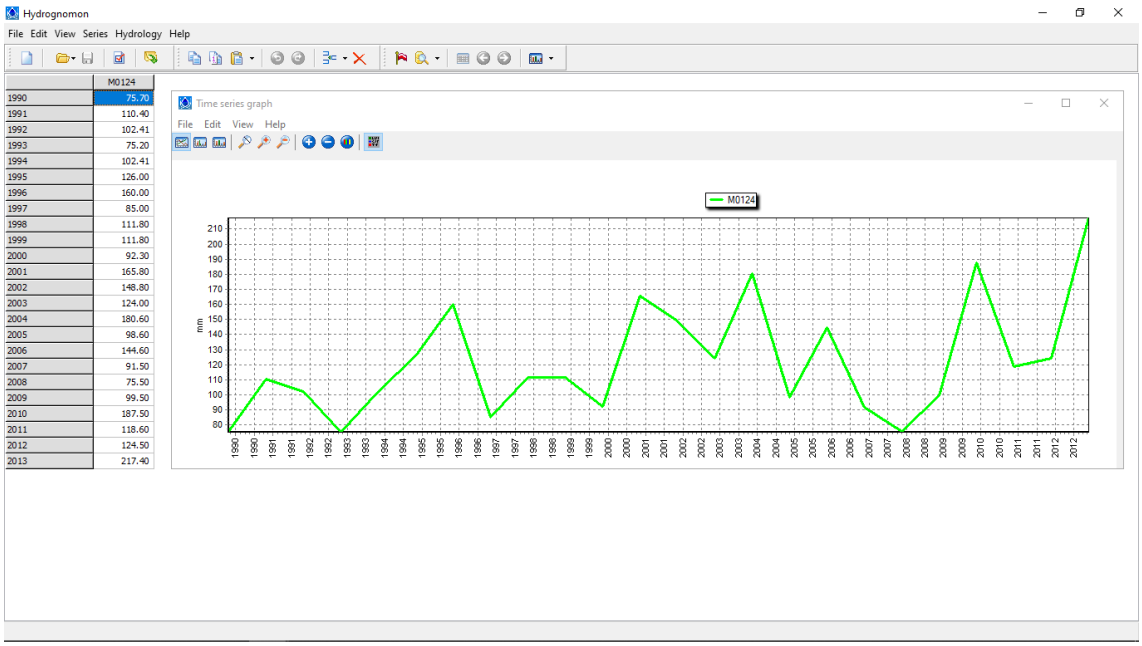
Anexo M. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para M0006

Test Kolmogorov-Smirnov	a=1%	a=5%	a=10%	Alcanzado	DMax
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.22%	0.07759
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.94%	0.07987
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.83%	0.08062
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.70%	0.08151
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.66%	0.08178
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.97%	0.08547
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.55%	0.08727
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.50%	0.08750
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.31%	0.08824
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.02%	0.08934
Pareto (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.97%	0.08950
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94.84%	0.09586
Pareto	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93.48%	0.09911
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	91.89%	0.10245
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	87.69%	0.10988
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	82.88%	0.11708
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	75.54%	0.12679
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	63.21%	0.14188
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	62.49%	0.14275
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	54.96%	0.15201
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	32.85%	0.18314
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	31.69%	0.18509
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	30.93%	0.18638
EV2-Max (L-Momments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	27.83%	0.19194
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	22.99%	0.20161
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	22.28%	0.20314

Anexo N. Distribución base de Weibull con la Normal para M0006



Anexo O. Software HYDROGNOMON para la estación M0124



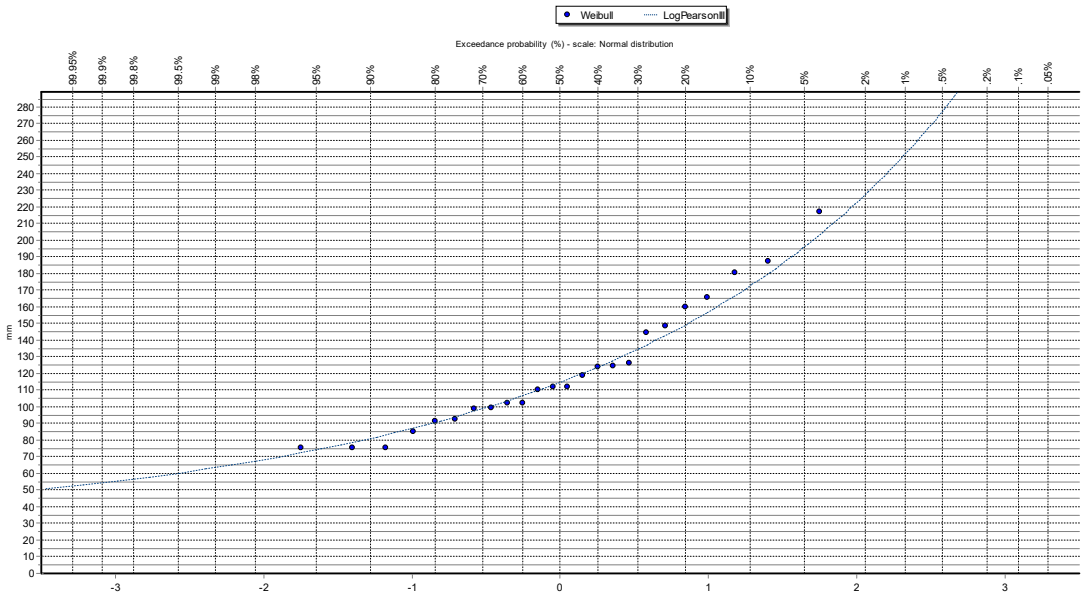
Anexo P. Prueba de Chi-cuadrado para M0124

Test X-Square	a=1%	a=5%	a=10%	Alcanzado	Pearson
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	74.70%	0.58333
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	44.50%	0.58333
Pareto	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	44.50%	0.58333
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	44.50%	0.58333
Pareto (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	44.50%	0.58333
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	60.65%	1.00000
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	60.65%	1.00000
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	31.73%	1.00000
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	49.25%	1.41667
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	49.25%	1.41667
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	49.25%	1.41667
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	23.40%	1.41667
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	23.40%	1.41667
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	23.40%	1.41667
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	32.47%	2.25000
EV2-Max (L-Momments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	32.47%	2.25000
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	32.47%	2.25000
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	21.40%	3.08333
Galton	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	7.91%	3.08333
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	9.30%	4.75000
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	9.30%	4.75000
Normal	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	6.13%	5.58333
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	6.13%	5.58333
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	6.13%	5.58333
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	6.13%	5.58333
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	6.13%	5.58333
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	6.13%	5.58333

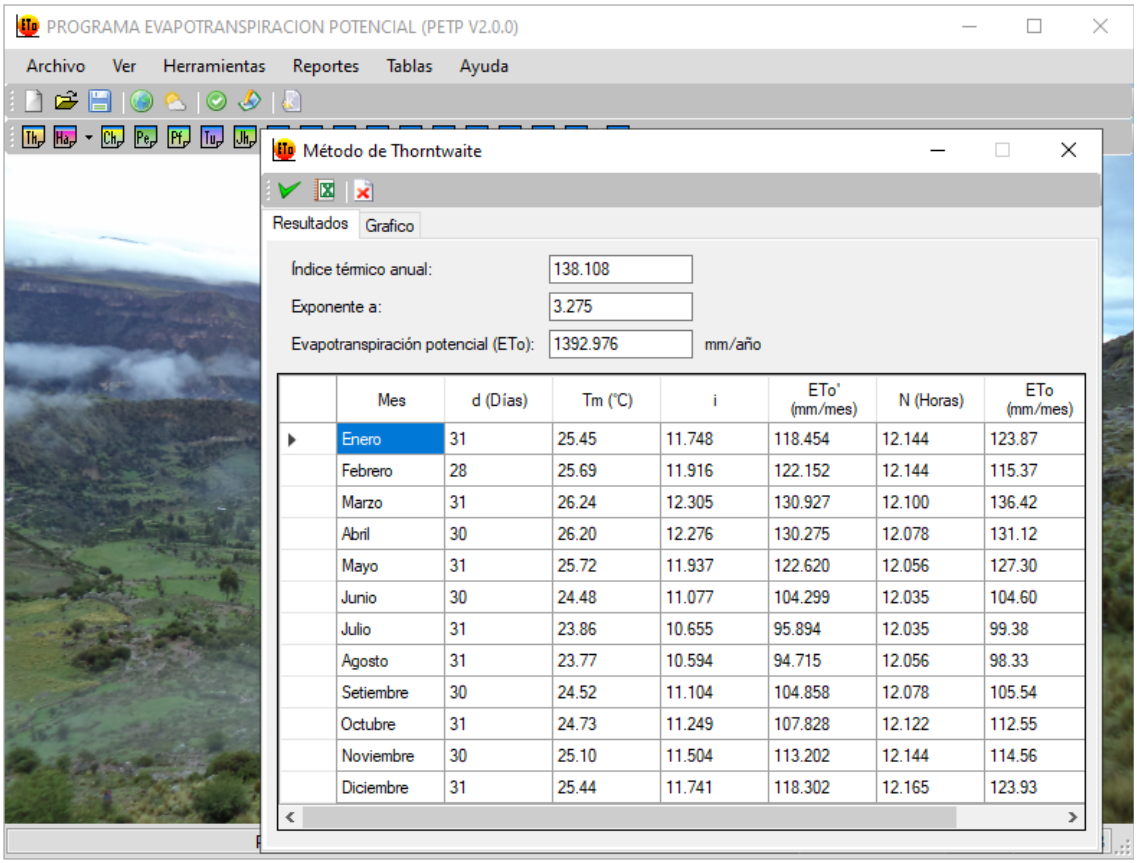
Anexo Q. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para M0124

Test Kolmogorov-Smirnov	a=1%	a=5%	a=10%	Alcanzado	DMax
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.99%	0.05656
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.97%	0.06026
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.94%	0.06361
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.82%	0.06860
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.77%	0.07004
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.73%	0.07072
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.18%	0.07788
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.06%	0.07896
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.97%	0.07963
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.95%	0.07977
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.65%	0.08183
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.56%	0.08238
Pareto (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.99%	0.08538
Pareto	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.17%	0.08879
EV2-Max (L-Momments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.62%	0.09071
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93.76%	0.09848
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	92.43%	0.10135
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	84.74%	0.11439
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	68.98%	0.13488
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	65.80%	0.13874
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	65.61%	0.13897
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	62.51%	0.14273
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	62.32%	0.14296
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	40.33%	0.17155
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	40.29%	0.17160
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	20.62%	0.20690
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	19.93%	0.20852

Anexo R. Distribución base de Weibull con la Normal para M0124

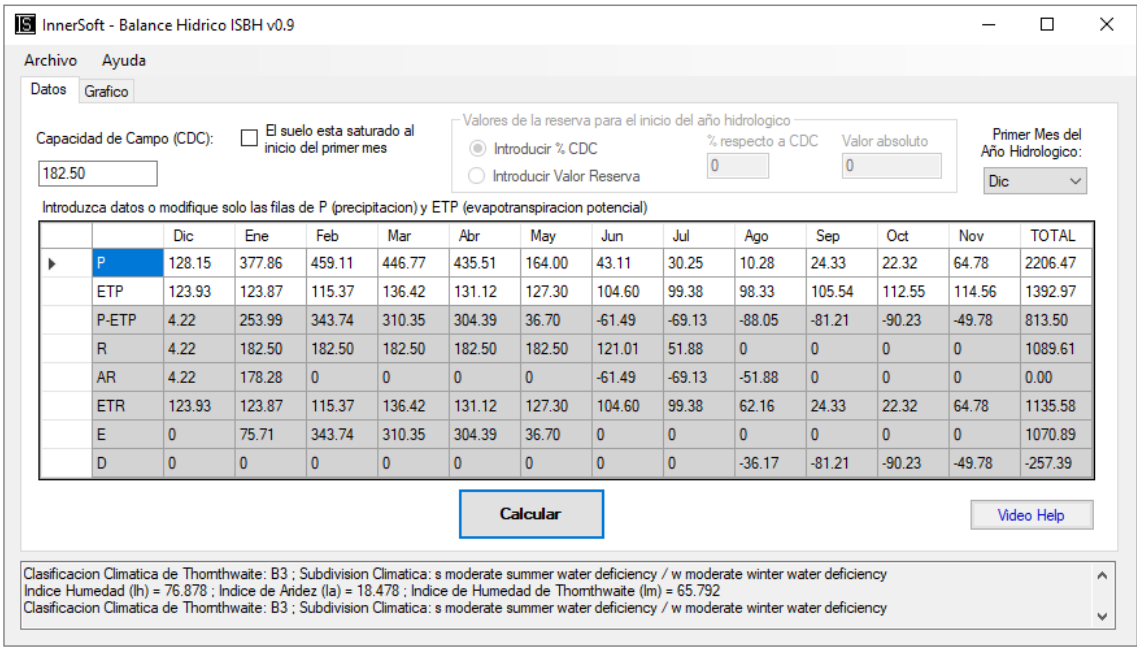


Anexo S. Software PETP para la estación M0006



Mes	d (Días)	Tm (°C)	i	ETo' (mm/mes)	N (Horas)	ETo (mm/mes)
Enero	31	25.45	11.748	118.454	12.144	123.87
Febrero	28	25.69	11.916	122.152	12.144	115.37
Marzo	31	26.24	12.305	130.927	12.100	136.42
Abril	30	26.20	12.276	130.275	12.078	131.12
Mayo	31	25.72	11.937	122.620	12.056	127.30
Junio	30	24.48	11.077	104.299	12.035	104.60
Julio	31	23.86	10.655	95.894	12.035	99.38
Agosto	31	23.77	10.594	94.715	12.056	98.33
Setiembre	30	24.52	11.104	104.858	12.078	105.54
Octubre	31	24.73	11.249	107.828	12.122	112.55
Noviembre	30	25.10	11.504	113.202	12.144	114.56
Diciembre	31	25.44	11.741	118.302	12.165	123.93

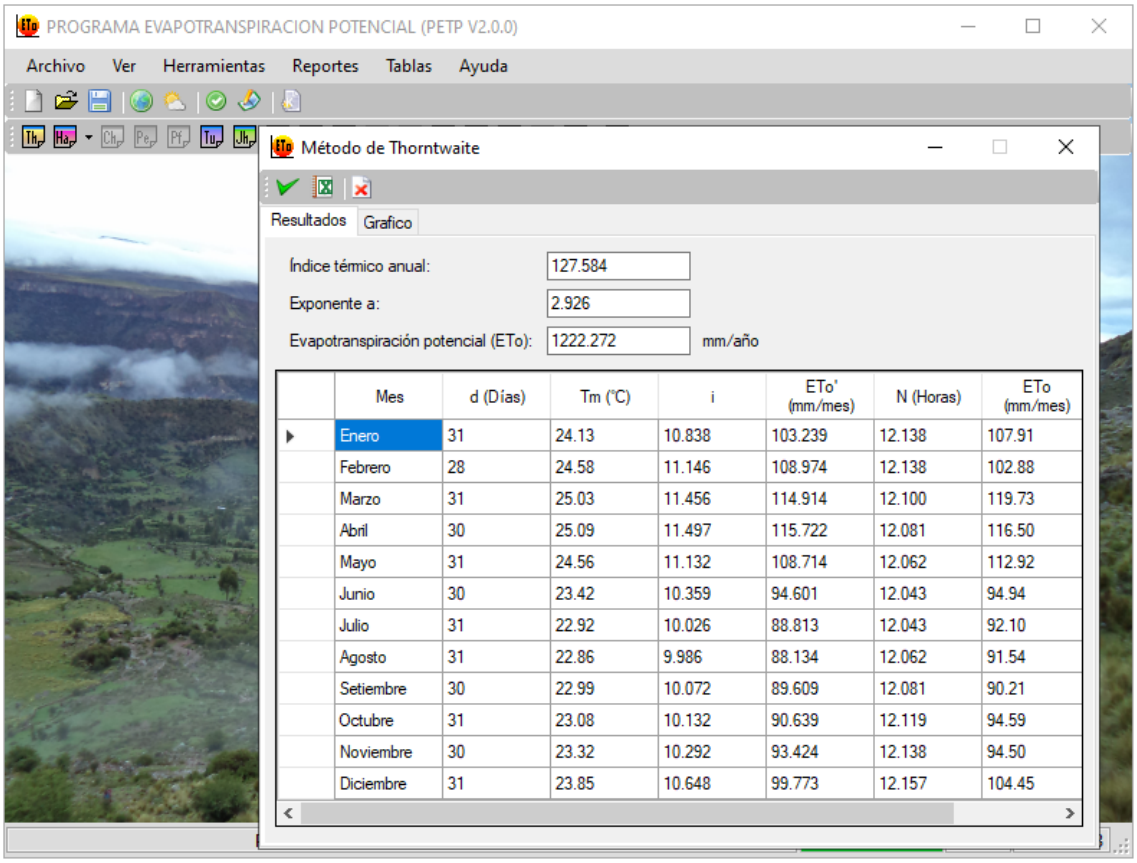
Anexo T. Software Innersoft BH para la estación M0006



	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	TOTAL
P	128.15	377.86	459.11	446.77	435.51	164.00	43.11	30.25	10.28	24.33	22.32	64.78	2206.47
ETP	123.93	123.87	115.37	136.42	131.12	127.30	104.60	99.38	98.33	105.54	112.55	114.56	1392.97
P-ETP	4.22	253.99	343.74	310.35	304.39	36.70	-61.49	-69.13	-88.05	-81.21	-90.23	-49.78	813.50
R	4.22	182.50	182.50	182.50	182.50	182.50	121.01	51.88	0	0	0	0	1089.61
AR	4.22	178.28	0	0	0	0	-61.49	-69.13	-51.88	0	0	0	0.00
ETR	123.93	123.87	115.37	136.42	131.12	127.30	104.60	99.38	62.16	24.33	22.32	64.78	1135.58
E	0	75.71	343.74	310.35	304.39	36.70	0	0	0	0	0	0	1070.89
D	0	0	0	0	0	0	0	0	-36.17	-81.21	-90.23	-49.78	-257.39

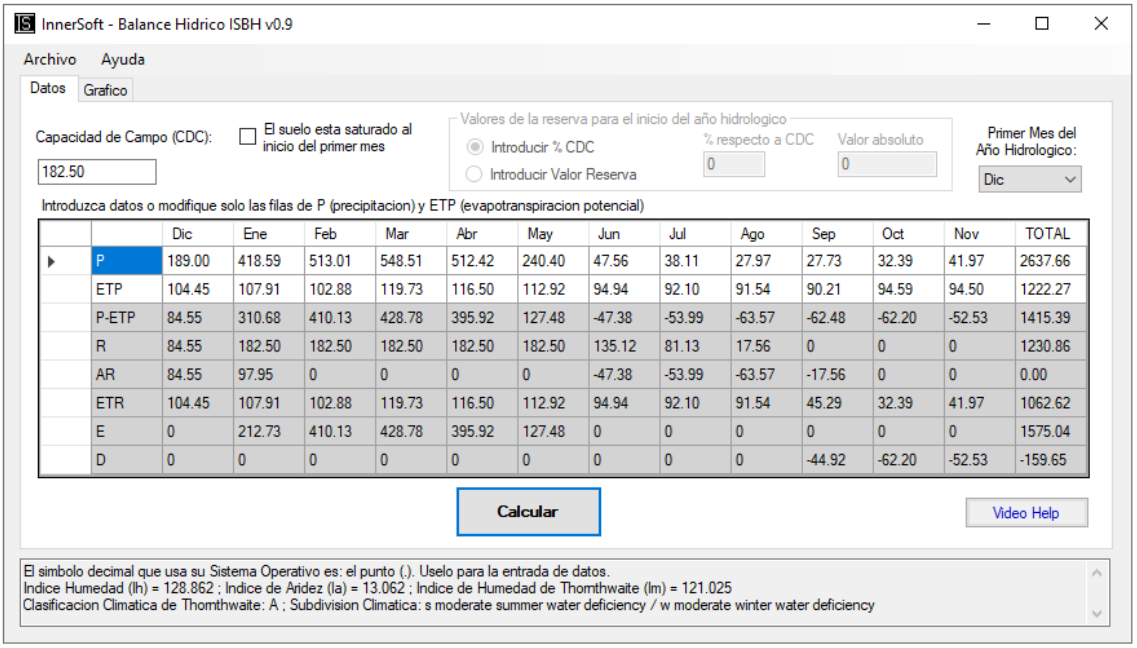
Donde: P “Precipitación”, ETP “Evapotranspiración potencial”, R “Reserva”, AR “Variación de la reserva”, ETR “Evapotranspiración real”, E “Excedente o escorrentía”, D “Déficit hídrico anual”.

Anexo U. Software PETP para la estación M0124



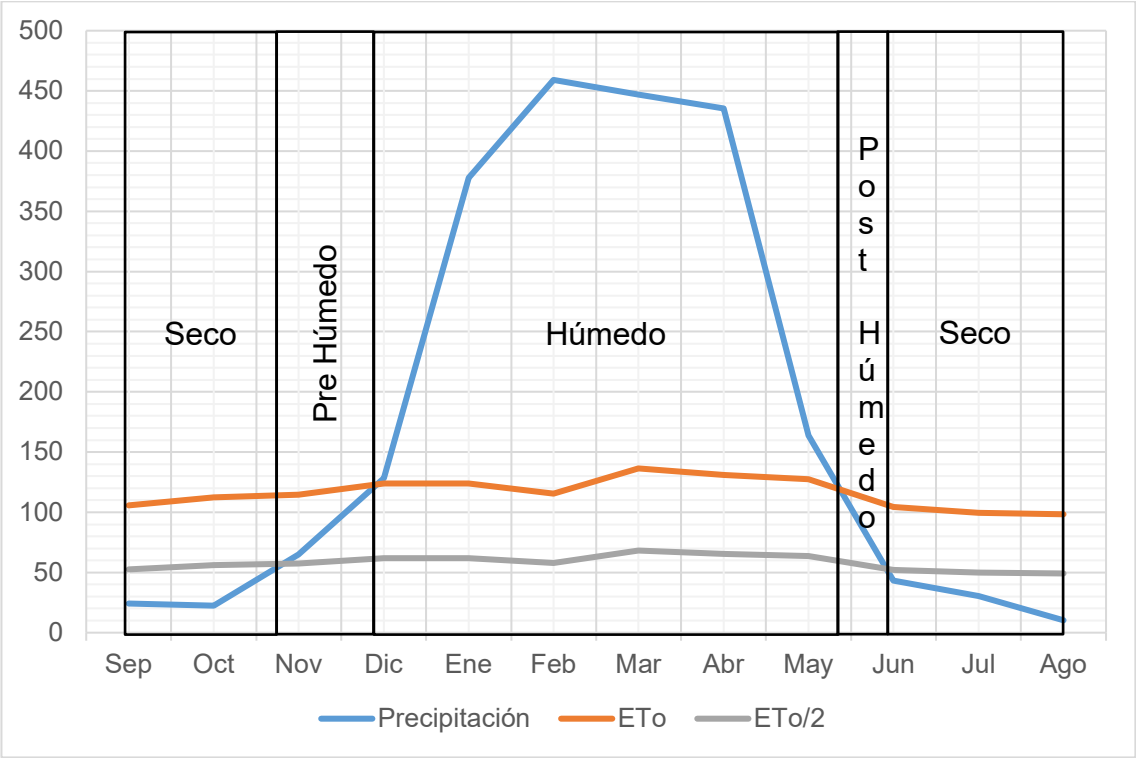
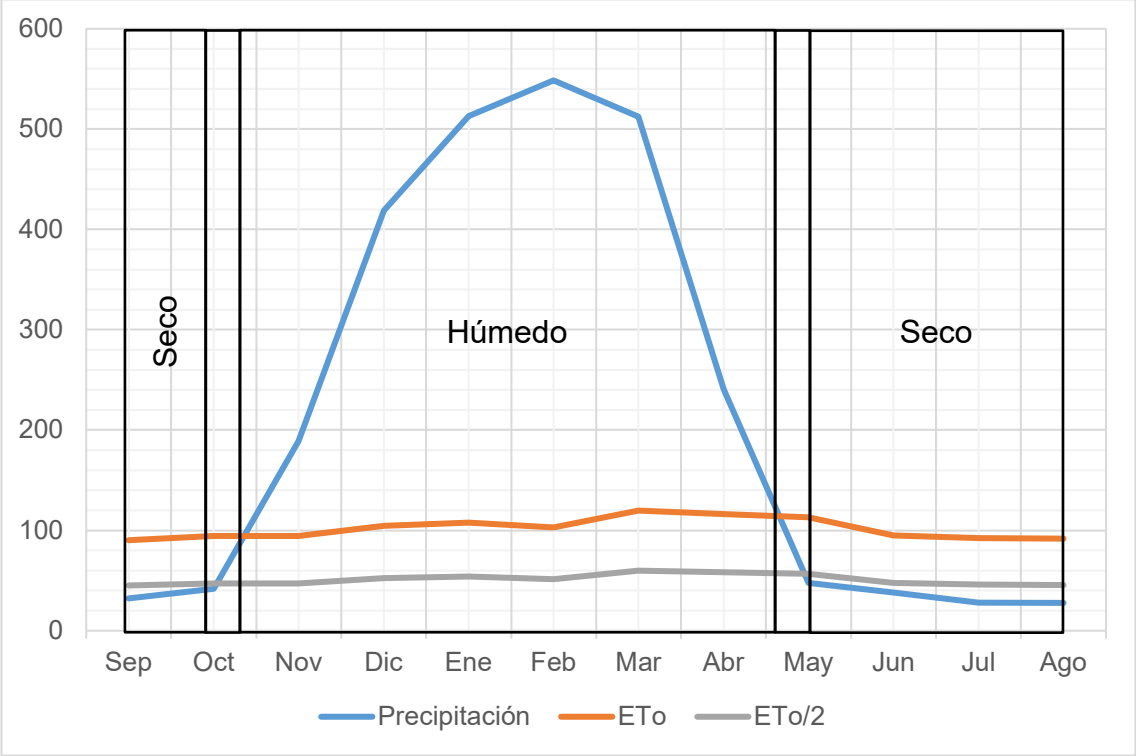
	Mes	d (Días)	Tm (°C)	i	ETo' (mm/mes)	N (Horas)	ETo (mm/mes)
▶	Enero	31	24.13	10.838	103.239	12.138	107.91
	Febrero	28	24.58	11.146	108.974	12.138	102.88
	Marzo	31	25.03	11.456	114.914	12.100	119.73
	Abril	30	25.09	11.497	115.722	12.081	116.50
	Mayo	31	24.56	11.132	108.714	12.062	112.92
	Junio	30	23.42	10.359	94.601	12.043	94.94
	Julio	31	22.92	10.026	88.813	12.043	92.10
	Agosto	31	22.86	9.986	88.134	12.062	91.54
	Setiembre	30	22.99	10.072	89.609	12.081	90.21
	Octubre	31	23.08	10.132	90.639	12.119	94.59
	Noviembre	30	23.32	10.292	93.424	12.138	94.50
	Diciembre	31	23.85	10.648	99.773	12.157	104.45

Anexo V. Software Innersoft BH para la estación M0124



	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	TOTAL
▶ P	189.00	418.59	513.01	548.51	512.42	240.40	47.56	38.11	27.97	27.73	32.39	41.97	2637.66
ETP	104.45	107.91	102.88	119.73	116.50	112.92	94.94	92.10	91.54	90.21	94.59	94.50	1222.27
P-ETP	84.55	310.68	410.13	428.78	395.92	127.48	-47.38	-53.99	-63.57	-62.48	-62.20	-52.53	1415.39
R	84.55	182.50	182.50	182.50	182.50	182.50	135.12	81.13	17.56	0	0	0	1230.86
AR	84.55	97.95	0	0	0	0	-47.38	-53.99	-63.57	-17.56	0	0	0.00
ETR	104.45	107.91	102.88	119.73	116.50	112.92	94.94	92.10	91.54	45.29	32.39	41.97	1062.62
E	0	212.73	410.13	428.78	395.92	127.48	0	0	0	0	0	0	1575.04
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-44.92	-62.20	-52.53	-159.65

Anexo W. Comparación de la P con la ETo en la estación M0006



Anexo X. Comparación de la P con la ETo en la estación M0124