

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



TESIS

**ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA EN LA
CUENCA CHALLANA, PERIODO SETIEMBRE 2014 – AGOSTO 2015**

**PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONA DE:
INGENIERO EN CONSERVACION DE SUELO Y AGUA**

ELABORADO POR:

LLANTO VERDE, JULIAN

ASESOR:

Ing. BUSTAMANTE SCAGLIONI, ERLE O.

Ing. CHAVEZ ASENCIO, RICARDO M.

TINGO MARÍA - PERÚ

2018

DEDICATORIA

A Dios, por darme vida, salud y haberme permitido llegar a este momento tan importante de mi formación profesional lleno de metas y superación

A mis padres Ana María Verde Gonzales y Aldo Julian Llanto Corné por su gran amor inmenso y estar siempre conmigo brindándome su apoyo invaluable durante cada etapa de mi vida.

A mis preciosas hermanas; Llanyna Llanto Verde, Karolina Karol Llanto Verde por su gran amor y apoyo moral e incondicional.

A mis tíos Octavio, Ana, Mabit, Wilmer por sus consejos, comprensión y apoyo.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS) por ser el alma Mater, que me forjo como profesional.

A mis padres (Ana M. V., Aldo J. LL.), a mis hermanos, tíos (as) y demás familiares, por su amor fraternal, apoyo moral y económico.

A todos los profesores de la Facultad de Recursos Naturales Renovables quienes se esforzaron por entregarme sus conocimientos y experiencias para mi formación profesional.

Al Proyecto de investigación aplicada con financiamiento del canon, sobrecanon y regalías mineras “Modelo de sucesiones ecológicas en los bosques fragmentados de la cordillera Carpish, Huánuco – Perú” (Resolución N° 127-2014 – R – UNAS) por el apoyo en la ejecución de la tesis.

Al Blgo. M.Sc. Chuquilín Bustamante, Edilberto, por su orientación y apoyo durante toda la ejecución del trabajo de tesis.

Al Ing. Bustamante Scaglioni Erle O. y Ing. Chávez Asencio Ricardo M. asesores de la presente tesis, por su orientación profesional, durante el trabajo de campo y de gabinete, así también, durante la redacción de la tesis.

Al Dr. Bram Leo Willems y Dr. Raúl Espinoza Villar, por su asesoramiento en la presente investigación. Gracias por su paciencia empeño y confianza.

Al Dr. Juan Manuel Domingo Santos, por brindarme su apoyo en la determinación de la Capacidad de retención de agua en el suelo.

Al Mg. Walter Martín Leyva Molina, por brindarme su apoyo y sugerencias en la redacción de tesis.

Al Mg. Octavio Fashé Raymundo y Lic. Carlos Eche Llenque, por darme su apoyo incondicional durante el desarrollo de la tesis. Gracias por su paciencia y confianza.

A los miembros del jurado calificador de la tesis: Ing. Ruiz Castre Sandro, Ing. Rengifo Trigozo Juan Pablo, Ing. Obregón Peña Roberto, por sus oportunas sugerencias.

Al señor Gelacio Jáuregui por su apoyo en el trabajo de campo durante la ejecución del proyecto.

A mis amigos (as) (Renzo Salas, Duany Dávila, Mariell Alegría, Tatiana Palomino) por su gran apoyo en el desarrollo y ejecución de la tesis.

INDICES

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Cuencas.....	3
2.1.1. Parámetros morfométricos y fisiográficos de una cuenca	4
2.2. Hidrología.....	5
2.2.1. Modelo hidrológico	5
2.3. Ciclo hidrológico.....	6
2.3.1. Escorrentía	7
2.3.2. Infiltración y percolación	8
2.3.3. Evapotranspiración (ET).....	9
2.3.4. Conceptos de evapotranspiración	11
2.4. Uso de la teledetección en la agricultura	14
2.5. Integración NDVI / Restricción Hídrica.....	16
2.6. Geomática para el estudio de procesos hidrológicos.....	17
2.7. Estimación de ET con sensores remotos.....	18
2.7.1. Precipitación.....	18
2.8. Especificaciones del sensor MODIS	19
2.8.1. Criterios para la selección de imágenes.....	21
2.8.2. Transmisión y pre - procesamiento de los datos	22

2.8.3. Niveles de procesamiento	24
2.9. MODIS 16 A2	26
2.9.1. El algoritmo, antecedentes y visión general	26
2.9.2. Lógica Penman-Monteith.....	27
2.9.3. La lógica del algoritmo MOD16A2 / MOD16A3	28
2.9.4. Validación de MOD16.....	29
2.9.5. Descripción del producto MODIS 16A2	31
2.10. Capacidad de retención de agua en el suelo (CRA)	32
2.10.1. El agua en el suelo	33
2.11. Cobertura vegetal.....	34
2.12. Balance hídrico	34
2.12.1. Forma general de la ecuación de balance hídrico	36
2.12.2. Calculo de balance hídrico en cuencas fluviales	37
2.12.3. Balance hídrico medio de una cuenca.....	38
2.12.4. Fórmula sintética	39
III. MATERIALES Y MÉTODOS	40
3.1. Área de estudio.....	40
3.1.1. Ubicación política	40
3.1.2. Ubicación geográfica	41
3.1.3. Clima	41

3.1.4. Zona de vida	42
3.1.5. Vegetación	42
3.1.6. Suelo	42
3.1.7. Fisiografía.....	43
3.1.8. Hidrografía.....	43
3.1.9. Accesibilidad	43
3.2. Materiales	43
3.2.1. Materiales de campo	43
3.2.2. Equipos de campo	44
3.2.3. Insumos	44
3.2.4. Software	45
3.2. Metodología	45
3.3.1. Determinar la textura y materia orgánica en la cuenca	45
3.3.2. Estimación de precipitación, evapotranspiración y escorrentía	47
3.3.3. Determinar el balance hídrico de la cuenca Challana	54
3.3.4. Determinar la capacidad de retención de agua (CRA)	56
IV. RESULTADOS	61
4.1. Características del suelo para la estimación de la CRA.....	61
4.2. Precipitación, evapotranspiración y escorrentía.....	63
4.2.1. Precipitación acumulada mensual.....	63

4.2.2. Evapotranspiración de MODIS 16 A2 y estación Challana.....	66
4.2.3. Escorrentía media mensual.....	68
4.3. Balance hídrico de la cuenca.....	70
4.4. Capacidad de retención de agua (CRA).....	73
V. DISCUSIÓN.....	75
VI. CONCLUSIONES.....	81
VII. RECOMENDACIONES.....	83
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	85
ANEXOS.....	93

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Especificaciones generales del sensor MODIS.....	20
2. Información sobre los conjuntos de datos científicos en MOD16A2.....	31
3. Características del suelo por cada horizonte analizado.....	62
4. Medias de tendencia central de algunas propiedades edafológicas, para los 25 horizontes de la cuenca Challana, de los análisis en laboratorio.....	63
5. Datos de precipitación media mensual de la estación Challana y Estación Carpish.....	64
6. Medidas de tendencia central de los valores de precipitación colectada por las estaciones Challana Carpish.....	65
7. Evapotranspiración real obtenidas de las imágenes MODIS 16 A2 y datos de la estación Challana durante el periodo setiembre del 2014 - agosto del 2015.....	66
8. Prueba de "t de student" para la muestra suponiendo varianzas iguales.....	67
9. Datos estimados de esorrentía de la cuenca Challana durante el periodo septiembre 2014 - agosto del 2015.....	69
10. Datos de estimación para las áreas de captación de la cuenca	

Challana: P (precipitación), ETr (evapotranspiración real), Q (gasto) y el diferencial $I = P - (ETr + Q)$	71
11. Balance hídrico anual de la cuenca Challana.....	72
12. Capacidad de retención de agua de la cuenca Challana en diferentes puntos de muestreo.....	77
13. Principales características físicas de la cuenca Challana.....	102
14. Datos de ETr cada 8 días de MODIS 16 A2 del periodo de septiembre 2014 - agosto 2015.....	103
15. Caudales diarios en lt/s de la quebrada Challana.....	104
16. Calculo de la capacidad de retención de agua (CRA) de la cuenca Challana.....	107
17. Clasificación de pendientes.....	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. El ciclo hidrológico.....	7
2. Evapotranspiración dividida en sus dos componentes y su relación con el área foliar por unidad de superficie del suelo.....	10
3. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o), bajo condiciones estándar (ET _c) y bajo condiciones no estándar (ET _{c aj}).....	12
4. Espectro electromagnético.....	15
5. Ejemplo de la variación de potencial hídrico de hojas de vides monitoreado de acuerdo a zonas con diferente expresión vegetativa.....	17
6. Sistema de escaneo del sensor MODIS.....	19
7. Detalle del efecto borde observado en los límites de los lotes.....	22
8. Ángulo de visión del sensor MODIS.....	23
9. Diagrama de flujo del algoritmo MOD16 ET mejorado. IAF: índice de área foliar; FPAR: Fracción de radiación fotosintéticamente activa. El cálculo de radiación neta y el uso de FPAR.....	29
10. Las mediciones de ET (puntos negros, OBS), las estimaciones ET impulsadas por la torre de flujo midieron datos meteorológicos (líneas rojas) y datos meteorológicos GMAO (líneas azules) durante	

2000 - 2006 en siete sitios de la torre, Donaldson (a) y LBA Tapajos KM67 Madura Bosque (b).....	30
11. Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	41
12. Esquema general de la metodología, muestra el flujo de datos que son requeridos para la estimación del balance hídrico.....	55
13. Proporción de arcilla, arena y limo, para los diferentes estratos en Los diferentes puntos de muestreo (zona en blanco son aquellos suelos que no poseen el tercer horizonte).....	61
14. Variación de la precipitación en el año hidrológico de la cuenca Challana y la estación Carpish para validar los datos.....	65
15. Comportamiento de la evapotranspiración real de los datos MODIS 16 A2 vs la de la Estación Challana.....	68
16. Resultados de la escorrentía media mensual en la cuenca Challana de un año de estudio desde septiembre 2014 - agosto del 2015.....	70
17. Acumuladas mensuales para el área de captación de la cuenca Challana. Precipitación (PP), evapotranspiración real (ETr), Gasto de agua (Q) y la diferencia (PP-(ETr+Q)) de un año de análisis septiembre 2014 - agosto 2015.....	72
18. Zona de estudio y ubicación de las estaciones de medición.....	94

19. Mapa de clasificación de suelos y ubicación de calicatas de la cuenca Challana.....	95
21. Mapa de pendiente de la cuenca Challana.....	96
22. Análisis de suelos de las primeras 5 calicatas.....	97
23. Análisis de suelos de las 4 calicatas muestreado en la tesis.....	98
24. Suelos de la cuenca Challana, CI (Arcilla), CI Lo (Franco Arcilloso), Lo (Franco), SaCI Lo (Franco Arcilloso Arenoso), SaLo (Franco Arenoso).....	99
25. Selección, proyección y cambio de formato de las imágenes MODIS.....	99
26. Entorno Modis Tools para proceso de imágenes MODIS.....	100
27. Multiplicación de la imagen con su factor de escala.....	100
28. Extracción de área de interés de un tamaño de pixel de 3 x 5.....	101
29. Valor del parámetro PERmeabilidad en función de CCC y CIL.....	102
30. Curva hipsométrica de la cuenca Challana.....	108
31. Contenido de Arcilla (0-2 um), Limo (2-50 um) y Arena (50-2000 um) de los 25 horizontes de las 9 calicatas de la cuenca Challana.....	109
32. Vista en campo de la cuenca hidrográfica.....	109
33. Calibración del sensor de nivel de agua ODISEY.....	110

34. Zona de aforo en la cuenca: A (Quebrada challana), B (Instalación y nivelación del equipo), C (Equipo instalado).....	110
35. Caudal en época lluviosa (A y B).....	111
36. Suelo de una cobertura de bosque, A: Excavación de la calicata, B: Calicata culminada, C: Visualización de los horizontes, D: Muestras listas para laboratorio.....	111
37. Muestreando suelos de una cobertura boscosa de cabecera de cuenca.....	112
38. Tomas de muestras: A (Medida de los horizontes), B (Toma de muestra de cada horizonte), C (Pesado natural), D (Etiquetado).....	112
39. Perfil de suelos de algunos puntos de muestreos, A: suelo para pasto, B: suelo para purmas, C: suelo para bosques aproximadamente de 30 años, D: suelo para bosque de 20 años aproximadamente.....	113
40. Estación meteorológica automática Challana.....	113

RESUMEN

La presente investigación se realizó con la finalidad de evaluar la capacidad de retención de agua CRA presente en los suelos de la cuenca Challana durante el periodo setiembre 2014 agosto 2015, circunscrito en una zona de vida montano bajo tropical de la localidad de Caracol, distrito Chinchao, provincia Huánuco. Para ello, se realizó un balance del sistema hidrológico entre las entradas (precipitación) y salidas (evapotranspiración y escorrentía) considerando a la infiltración y el almacenamiento la captura del agua por el suelo que pone a disposición de la cobertura vegetal y la quebrada. Igualmente, se aplicó el modelo de retención física desarrollado por Gandullo (1985) y modificado por Santos et al, (2006), a 9 calicatas distribuidas en toda la cuenca con diferente cobertura, materia orgánica, textura y pendiente. Los valores de CRA estimados son similares empleando ambos métodos con 121.19 mm y 125.521 mm de aporte de agua del suelo a la cuenca. Esta cantidad de agua retenida representa el 5.34% de la precipitación a diferencia de lo propuesto por Leslie Holdridge para un bosque húmedo (Otaya et al, 2008) de 7.5 % (165.59 mm) La diferencia de porcentajes, observada y propuesta, evidencia que la capacidad de la cuenca ha disminuido como consecuencia del cambio de uso del suelo.

Palabra clave: precipitación, escorrentía, evapotranspiración, infiltración, balance hídrico, capacidad de retención de agua (CRA).

I. INTRODUCCIÓN

La capacidad de retención de agua en el suelo proporciona informaciones valiosas sobre la estructura y funcionamiento de la cuenca en el manejo de agua, ligadas estrechamente al crecimiento de la vegetación, escurrimiento y evapotranspiración real, donde el suelo tiene la función de absorber, retener y suministrar agua (ROSALES, 2012).

Los usos de suelos asociados con actividades antrópicas tales como agricultura, pastoreo, manejo forestal y minería, e incluso el propio cambio climático afectan negativamente varios aspectos importantes para el buen funcionamiento de la regulación hídrica (BUYTAERT *et al.* 2006). Generando pérdida de la biodiversidad, erosión de suelos y aumento de gases que incrementan el efecto invernadero produciendo incendios, inundaciones, huracanes y sequías (FAO, 2007).

Es así, de la precipitación como variable biofísica importante, la evapotranspiración se incorpora para el estudio comparativo del movimiento del agua en una cuenca, es esencial para estimar el gasto y definir las relaciones físicas con la retención de humedad del suelo que hace su aporte en temporada de tensión hídrica (SANCHEZ, 2008) y conocer cuánta agua puede contener y

reservar el suelo como es posible suministrar a las plantas y pasa a recargar el escurrimiento a determinada condición climática (SANTOS *et al.* 2006).

La cuenca Challana, ubicada en la localidad de Caracol, distrito de Chinchao, región Huánuco con una extensión de más de 90 hectáreas a 1772.66 msnm, presenta las propiedades inherentes de suelos de un bosque pluvial – montano bajo tropical con cambios en su uso, como las condiciones meteorológicas e hidrológicas inherentes para explicar el contenido de agua en las reservas que regulan el escurrimiento. En ese sentido, esta investigación plantea el siguiente problema: ¿Cuál es el rol de la retención de agua del suelo de bosque pluvial – montano bajo tropical en la regulación hídrica de la cuenca, periodo setiembre 2014 – agosto 2015? y supone a su vez establecer que: Existe un aporte significativo de agua retenida por el suelo al escurrimiento superficial de la cuenca Challana.

1.1. Objetivo general

- Estimar la capacidad de retención de agua en el suelo de la cuenca Challana.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar la distribución de la textura del suelo en la cuenca
- Estimar la precipitación, evapotranspiración y escorrentía.
- Determinar el balance hídrico
- Evaluar la capacidad de retención de agua

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Cuencas

De acuerdo con ARREOLA (s/f), las cuencas son unidades del territorio en donde funciona la combinación de un subsistema hídrico que produce agua, simultáneamente con los subsistemas ecológico, económico, social y político. En ellas se producen bienes y servicios ambientales que son demandados por las poblaciones localizadas en tu territorio". Un rápido resumen de las funciones, valores y beneficios de las cuencas pone de manifiesto que éstas son un elemento clave para hacer frente a la crisis ambiental. A diferencia de lo que ocurre en otros temas de la relación sociedad-ambiente, los principales beneficios de las cuencas son fruto de las funciones inherentes a los ecosistemas. En términos generales, los aportes de las cuencas son los siguientes:

- **Abastecimiento de agua dulce**

Las cuencas son un elemento fundamental para la obtención de agua potable a largo plazo. Debido a los procesos naturales que se producen cuando el agua pasa a través de ellas, la vegetación y los suelos presentes en la cuenca pueden favorecer la captación de agua, abasteciendo los cauces incluso en secas; (RENDÓN, 2003).

- Regulación de la cantidad de agua

Muchos ríos siguen siendo una fuente segura de agua durante todo el año debido a que en ocasiones el caudal alimenta zonas de pantanos y ciénagas. Esto propicia que el agua en la temporada de lluvias fluya más lentamente, lo cual amplía, en las épocas más secas, el período en el que puede disponerse de agua (RENDÓN, 2003).

- Regulación climática

La preservación de los sistemas hidrológicos naturales como los humedales, pantanos y bosques dentro de la cuenca tiene efectos microclimáticos y macroclimáticos evidentes (RENDÓN, 2003).

- La evapotranspiración mantiene los niveles locales de humedad y la biodiversidad local

En áreas con vegetación arbórea, gran parte del agua de las lluvias regresa a la atmósfera por evaporación o transpiración volviendo a precipitar en la zona circundante. Zonas en donde la evapotranspiración real es más alta, tienden a albergar mayor biodiversidad (RENDÓN, 2003).

2.1.1. Parámetros morfométricos y fisiográficos de una cuenca

JUELA (2011), Las características morfométricas y fisiográficas de una cuenca, son elementos que tiene gran importancia en el comportamiento hidrológico de esta unidad de territorio, pues estas características tienen un impacto directo en el drenaje, ya que condicionan tanto el volumen de

escurrimiento como la velocidad de respuesta. Así pues, el estudio sistemático de los parámetros físicos de las cuencas es de gran utilidad práctica, pues con base en ellos se puede lograr una transferencia de información de registros hidrológicos, siempre que exista cierta semejanza geomorfológica y climática de las zonas en cuestión.

2.2. Hidrología

Ciencia que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie de la tierra, sus propiedades físicas y químicas y su relación con el medio ambiente incluyendo a los seres vivos (JUELA, 2011). El mismo autor menciona que la hidrología, proporciona métodos para resolver los problemas prácticos que se presentan en el diseño, la planificación y la operación de estructuras hidráulicas, por esta razón antes de realizar cualquier tipo de obra hidráulica se debe realizar un estudio hidrológico.

2.2.1. Modelo hidrológico

La importancia de los modelos radica, entre otros aspectos, en la simulación y predicción de los fenómenos físicos a corto, mediano y largo plazo. Asimismo, a través de los modelos podemos obtener relaciones causa-efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales. Las capacidades de simulación varían en términos de tiempo y espacio - algunos modelos observan los pasos o escalas de tiempo, mientras que otros pueden usar medidas de corto tiempo y simular un período de tiempo relativamente corto - como en el caso de

una inundación repentina. Un modelo hidrológico es pues una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática. En un modelo hidrológico, el sistema físico real que generalmente representamos es la cuenca hidrográfica y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera un modelo matemático nos ayudará a tomar decisiones en materia de hidrología, por lo que es necesario tener conocimiento de entradas (inputs) al sistema y salidas (outputs) a partir del sistema, para verificar si el modelo es representativo del prototipo. La salida de los modelos hidrológicos varía - dependiendo de las metas y objetivos del modelo. Algunos modelos se utilizan para predecir los totales mensuales de escorrentía, mientras que otros están diseñados para ver a las tormentas individuales. El resultado más común es el hidrograma o hidrograma de escurrimiento (ANDRADE, 2011).

2.3. Ciclo hidrológico

Son cambios que experimenta el agua en su naturaleza, tanto en su estado sólido, líquido y gaseoso, como en su forma de agua superficial, agua subterránea, etc. cómo se observa en la Figura 01. El ciclo hidrológico es completamente irregular y es precisamente contra estas irregularidades que lucha el hombre. Como todo ciclo hidrológico no tiene ni principio ni fin, y su descripción puede comenzar en cualquier punto (JUELA, 2011).

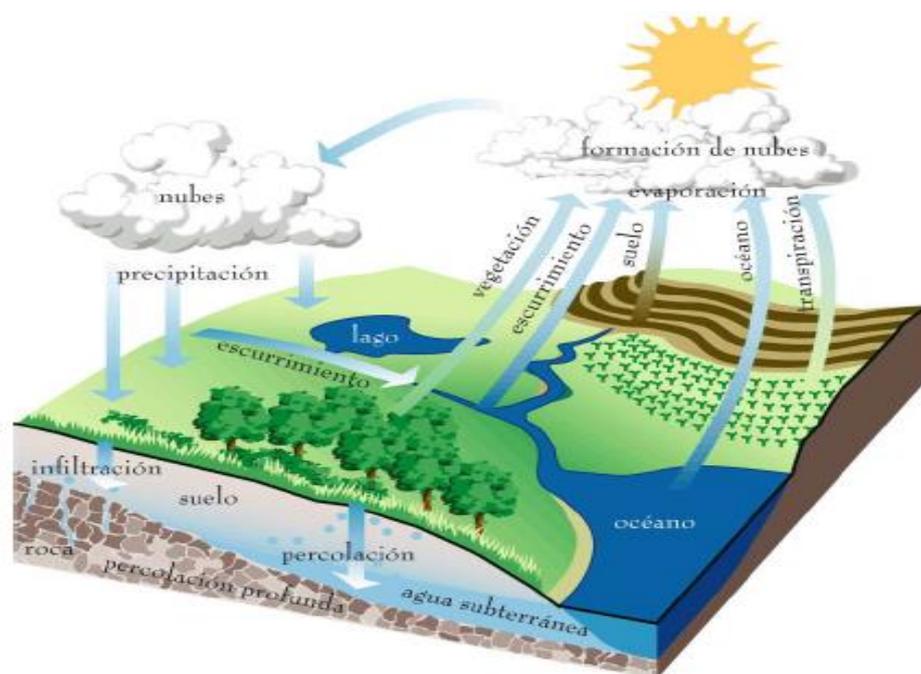


Figura 1. El ciclo hidrológico. Fuente: Northern Arizona University – CENS Engineering

Programs, 2005 [http:// www.cet.nau.edu/Projects/SWRA/research.html](http://www.cet.nau.edu/Projects/SWRA/research.html) - 4KB

2.3.1. Escorrentía

Cantidad de agua de una precipitación, que drena o escurre sobre la superficie del suelo. Cuando ocurren lluvias más intensas o frecuentes, el agua llega hasta la superficie, produciéndose, por un lado, la infiltración y, por otro lado, la saturación del suelo y la escorrentía. Parte importante de la escorrentía generada por un evento lluvioso es realmente de flujo subsuperficial o hipodérmico, es decir, es el agua que no circula en régimen de lámina libre, sino que inicialmente se infiltra, escapa de la evapotranspiración y en vez de constituir infiltración eficaz circula horizontalmente por la parte superior de la zona no saturada hasta volver a la superficie (MONSALVE, 2002)

2.3.2. Infiltración y percolación

Infiltración es la entrada de agua en el suelo. La capacidad de infiltración es la velocidad máxima a la cual puede penetrar agua a la superficie del suelo. La infiltración está sujeta al estado del horizonte superficial del suelo, cuyas condiciones determinan si las precipitaciones se convierten o no en escorrentía. (MONSALVE, 2002).

Se denomina percolación al movimiento y agua a través del suelo hacia niveles inferiores, la capacidad de percolación es la capacidad máxima a la cual el agua se puede mover a través del suelo. Los factores que afectan a las capacidades de infiltración y percolación pueden ser el tamaño y número de los poros no capilares, el contenido de materia orgánica en el suelo, el tipo de suelo (textura y estructura), el contenido de humedad y ensanchamiento, los bosques favorecen a la infiltración, la capacidad de infiltración y percolación. (MONSALVE, 2002).

2.3.2.1. Determinación del binomio infiltración/escorrentía

BLANCO *et al.* (1998), otro aspecto de atención de los investigadores, ha sido el papel que representaban los tipos de cubiertas vegetales en la dinámica hídrica de una cuenca. Resultaba evidente que un terreno correctamente vegetado poseía tasas mayores de infiltración y menores de escorrentía superficial. LOPEZ y MINTEGUI (1986), menciona que Autores como Molchanov en Tellerman, Brasov en Kamennaya y Agapova en Derkul, demostraron que la relación entre el coeficiente de escorrentía y el porcentaje de

área forestal de una cuenca se asemeja a una hipérbola descendente. Según estos autores, la escorrentía superficial en terrenos forestales podría representar el 1 % de la precipitación total anual, mientras que, en terrenos agrícolas análogos, podría ser del orden del 30 % de la precipitación, y en terrenos no cultivados, del orden del 50 %. Estas cifras dan una idea de la importancia que tiene mantener una proporción suficiente de terreno arbolado en las cuencas con recursos hidráulicos limitados

2.3.3. Evapotranspiración (ET)

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. En la Figura 2 se presenta la evapotranspiración dividida en sus dos componentes (evaporación y transpiración) en relación con el área foliar por unidad de superficie de suelo debajo de él. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración (ALLEN et al, 2006).

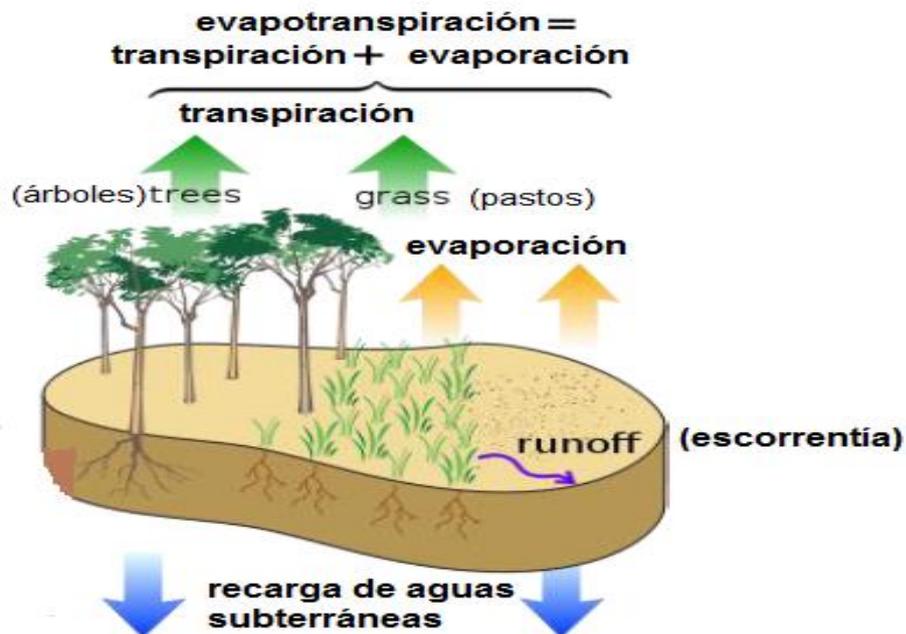


Figura 2. Evapotranspiración dividida en sus dos componentes y su relación con el área foliar por unidad de superficie del suelo. Fuente: USGS EROS/NCS CSC.

2.3.3.1. Evaporación

Es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vegetación). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada. El cambio de estado de líquido a vapor se debe a la radiación solar que brinda la energía necesaria para permitir a las moléculas del agua cambiar de estado y a los procesos de difusión molecular y turbulencia. Además de la radiación solar, las variables meteorológicas que intervienen en la evaporación, particularmente de las superficies libres de agua, son la temperatura del aire, la velocidad de viento y la tensión de vapor o humedad relativa del ambiente. (ALLEN *et al.*, 2006).

2.3.3.2. Transpiración

La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. También es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo, diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. (ALLEN *et al.*, 2006).

(ABTEW y MELESSE, 2013) menciona que los factores que influyen en la transpiración pueden ser ambientales o fisiológicos. Los factores ambientales de importancia son la temperatura, la radiación solar, el viento, la humedad del aire y la disponibilidad de agua en el suelo, mientras que los factores fisiológicos dependen de las características de las especies vegetales y las más importantes son la densidad, extensión, carácter de la cubierta vegetal, estructura de las hojas, profundidad de las raíces y enfermedades de las plantas.

2.3.4. Conceptos de evapotranspiración

El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración de cultivos de referencias (ET_o), evapotranspiración de cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}). ET_o es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. ET_c se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas

presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas (ALLEN *et al*, 2006).

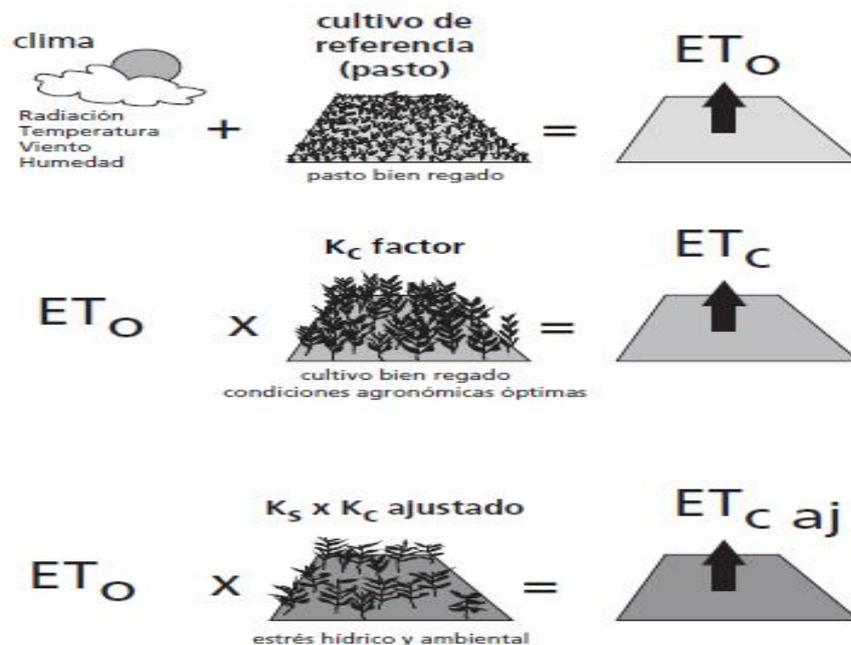


Figura 3. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), bajo condiciones estándar (ET_c) y bajo condiciones no estándar ($ET_{c\ aj}$). Fuente: ALLEN *et al*, 2006

2.3.4.1. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0)

Es la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia que ocurre sin restricciones de agua, el cultivo de referencia se conoce como un cultivo hipotético de pasto con características específicas. (ALLEN *et al.*, 2006).

Le evapotranspiración de una superficie de referencia se define como “la tasa de evapotranspiración de una superficie extensa de gramíneas

verde de 8 a 15 cm de altura, uniforme, de crecimiento activo, que cubre totalmente el suelo y sin escasez de agua” (DOORENBOS *et al.*, 1986).

El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmosfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie. Los únicos factores que afectan la ETo son los parámetros climáticos, por lo tanto, es un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. En la misma no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo. Desde este punto de vista, el método FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método de determinación de ETo con parámetros climáticos (ALLEN *et al.*, 2006).

2.3.4.2. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc)

Se refiere a la ETc que ocurre en la situación real en que se encuentra el cultivo en el campo. Desde el punto de vista de la programación de riego, la ETc es primordial en lo que se refiere a la frecuencia de la aplicación, como la cantidad de agua a aplicar (GUROVICH, 1985). La ETc se calcula indirectamente usando las evapotranspiraciones de referencia (ETo), que es corregida por un coeficiente de cultivo específico para cada especie agrícola. También se puede medir directamente usando los métodos micrometeorológicos y del balance hídrico (lisímetros de pesada) (ORTEGA *et al.*, 2002).

2.3.4.3. Evapotranspiración de cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj) se refiere a la evapotranspiración de cultivo que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferente de las condiciones estándar. Bajo condiciones de campo, la evapotranspiración real de cultivo puede desviarse de ETc debido a condiciones no optimas como son las presencias de plagas y enfermedades, salinas del suelo, baja fertilidad del suelo y limitaciones o exceso de agua. Esto puede resultar en un reducido crecimiento de las plantas, menor densidad de plantas y así reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de ETc (ALLEN *et al*, 2006).

2.4. Uso de la teledetección en la agricultura

La teledetección, a través del uso de imágenes aéreas multiespectrales, ha tenido en los últimos años un desarrollo progresivo en el rubro frutícola de USA, Australia, Nueva Zelandia y algunos países europeos, probando que esta tecnología tiene grandes posibilidades para la cartografía de la variabilidad espacial de parámetros relacionados con la productividad (ACEVEDO *et al.*, 2009). El diccionario de términos normalizados de ciencias y técnica define a la teledetección como “El conjunto de conocimientos y técnicas utilizadas para determinar características físicas y biológicas de los objetos mediante medidas efectuadas a distancia, sin contacto material con estos”. Por otro lado, (LILLESAND Y KIEFER, 1997) la define como un set que integra el

conocimiento y las técnicas que permiten obtener cualquier información de un objeto, una escena, o fenómeno, a través del análisis de mediciones remotas con sensores. En agricultura, las imágenes obtenidas a través de la teledetección, utilizan la interpretación entre la radiación electromagnética (Figura 4) y la superficie de las plantas en los aspectos visibles e infrarrojo. De ese modo, a través del desarrollo de técnicas de imágenes numéricas se provee de una información cuantitativa de la luz reflejada por las superficies en estudio (Myers et al., 1983; Bonn & Rochon, 1992; Campbell, 1996) mencionado por (ACEBEDO *et al*, 2009).

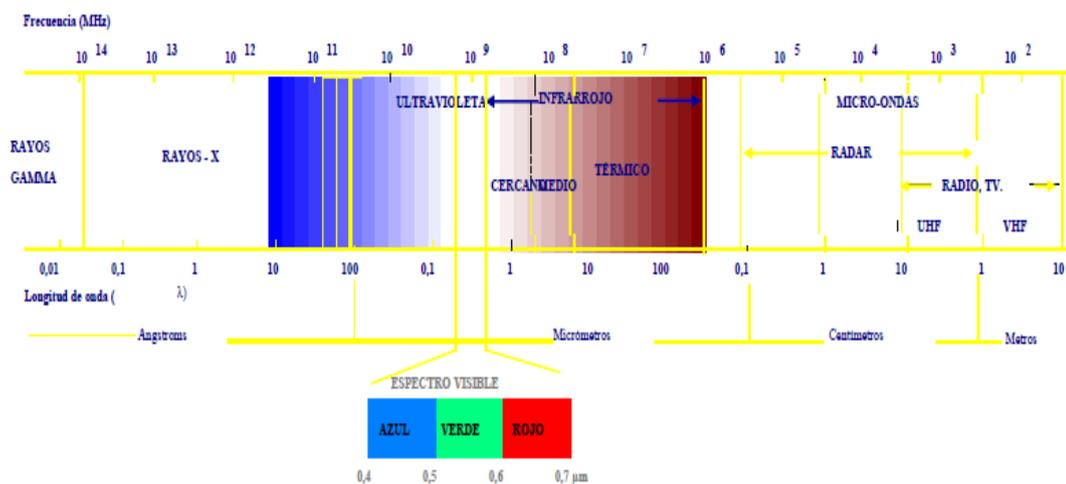


Figura 4. Espectro electromagnético. Fuente: ACEVEDO *et al*, 2009

En pocos años de aplicación, estas técnicas de monitoreo han progresado desde el campo de la investigación básica a un estatus más operacional. Es así como en Europa, el programa MARS (Monitoreo Agrícola por Sensores Remotos), patrocinado por la Unión Europea, ha realizado grandes avances en la planificación y desarrollo agrícola, contribuyendo a la generación de estadísticas agropecuarias y forestales (ACEVEDO *et al*, 2009).

Probablemente, la agricultura ha generado una mayor demanda en el desarrollo de la tecnología de sensores remotos multiespectrales que cualquier otra área de la ciencia. Esto se debe principalmente a la variedad de problemas, tales como: deficiencias nutricionales e hídricas, plagas y enfermedades, malezas, variabilidades espaciales de los suelos, variación de los ciclos de crecimiento, clima y geografía, y a la complejidad del manejo de esta variabilidad (ACEVEDO *et al.*, 2009)

2.5. Integración NDVI / Restricción Hídrica

Estudios de la utilización de imágenes multiespectrales, para la segmentación de la variabilidad espacial del potencial hídrico de la planta, han sido determinado en viñas, demostrando que el uso de los NDVI en la segmentación de los viñeros fue altamente útil en la identificación de zonas con diferentes niveles de restricción hídrica, tal como muestra la figura 5 (JOHNSON, 2001). Asimismo, OPAZO *et al.*, (2008) mostraron que el NDVI calculado con una imagen aérea multiespectral puede ser utilizado como una herramienta para definir zonas con distintos niveles de estatus hídrico de plantas. De este modo se utilizó el NDVI como información base para proponer una cartografía de zonas con distintos niveles de restricción hídrica (determinación de zonas con riesgo a presentar estrés hídrico). Esta metodología fue probada exitosamente en siete diferentes cultivares de uvas viníferas tintas y blancas en región de Languedoc-Roussillon, Francia (ACEVEDO *et al.*, 2009).

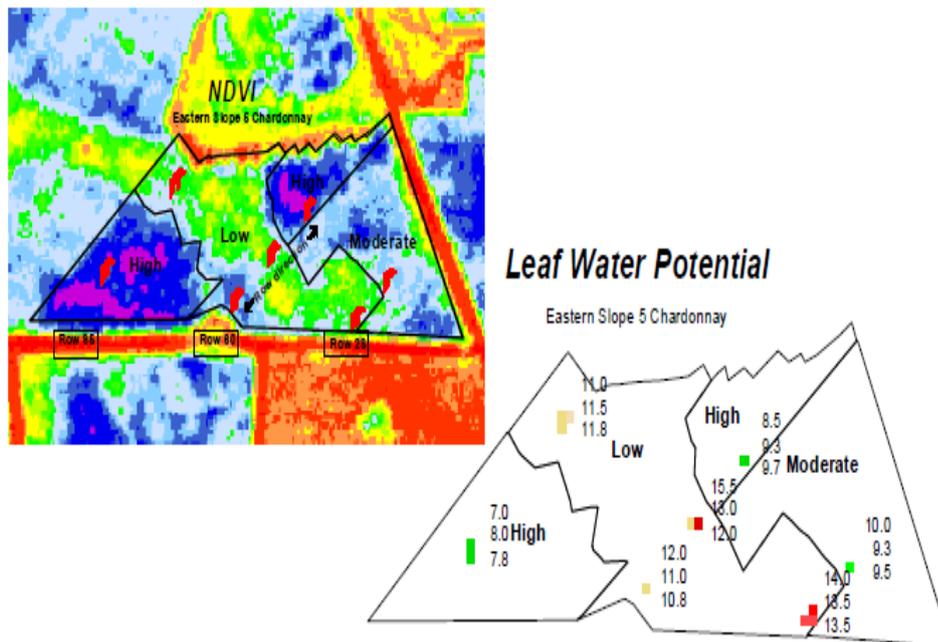


Figura 5. Ejemplo de la variación de potencial hídrico de hojas de vides monitoreado de acuerdo a zonas con diferente expresión vegetativa.

Fuente: ACEVEDO *et al*, 2009

2.6. Geomática para el estudio de procesos hidrológicos

El uso de la geomática permitirá utilizar diferentes técnicas y herramientas como las que proporciona el análisis espacial, la percepción remota y el modelaje espacial en el manejo, administración, modelaje y representación de la información espacial referentes a las variables y procesos hidrológicos que se ven involucrados en la estimación de balance hidrológico. El conocimiento de la estructura y funcionamiento de lagos, cuenca superficial y subterránea, es fundamental para conseguir un uso racional de los recursos de agua en el espacio y el tiempo, así como para mejorar el control y redistribución de los mismos. Con las herramientas que proporciona la geomática es posible generar este conocimiento y aplicarlo en beneficio de la sociedad (ORTIZ, 2011).

2.7. Estimación de ET con sensores remotos

En los últimos años la teledetección ha tenido avances significativos en el monitoreo de variables que afectan la producción agrícola en el mundo entero. La ET es sin duda una de las variables más importantes que influyen en el rendimiento de los cultivos, por esto la necesidad de tener estimaciones precisas de parámetros a nivel regional eliminando de esta forma las limitaciones espaciales que se tiene como método tradicional basados en ecuaciones semiempíricas que utilizan datos medios en estaciones meteorológicas. (MURILLAS y LONDOÑO, 2014).

2.7.1. Precipitación

La formación de la precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmosfera de tal manera que se enfría y parte de su humedad se condensa para que posteriormente se precipite sobre la superficie terrestre (VÁSQUEZ, 2000).

La intensidad de la precipitación varía de un lugar a otro, aunque no se encuentra a mucha distancia. Existen zonas en las que un solo día cae más lluvia que en otros a lo largo de todo el año. Las causas que influyen en la distribución de la precipitación en el planeta son: la proximidad al mar, incremento de la humedad del aire y las corrientes ascendentes de aire, como las que obligan a realizar las cordilleras, sobre las cuales las precipitaciones son más numerosas e intensas en la ladera enfrentada a los vientos más frecuentes, o barloventos (VÁSQUEZ, 2000).

2.8. Especificaciones del sensor MODIS

El sensor MODIS se encuentra a bordo de los satélites Terra o EOS-AM (lanzado en diciembre de 1999) y Aqua o EOS-PM (lanzado en mayo de 2002). La órbita de ambas plataformas es helio-sincrónica y cuasi-polar con una inclinación de 98.2° y 98° y una altitud media de 708 y 705 km respectivamente (NASA, 2008). Terra está programada para pasar de norte a sur cruzando el ecuador a las 10:30 de la mañana en su órbita descendente, mientras que Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador a las 1:30 de la tarde, un esquema del cubrimiento MODIS se presenta en la figura 6.



Figura 6. Sistema de escaneo del sensor MODIS. Fuente: Imagen tomada de [http://sos.noaa.gov/images/atmosphere/aqua_swath . jpg](http://sos.noaa.gov/images/atmosphere/aqua_swath.jpg).

El instrumento MODIS cuenta con una alta sensibilidad radiométrica (12 bit) en 36 bandas espectrales, en un rango de longitud de onda que va de

los 0.4 μm a los 14.4 μm (Ver Cuadro 1). Las primeras 19 bandas están posicionadas en la región del espectro electromagnético situado entre 0.405 nm y 2.155 nm. Las bandas de la 1 a la 7 son útiles para las aplicaciones terrestres; las bandas 8 a la 16 para las observaciones oceánicas y las bandas 17 a 19 para las mediciones atmosféricas. Las bandas 20 a la 36, cubren la porción del infrarrojo térmico del espectro de (3,660-14,385 nm) (NASA, 2008).

Cuadro 1. Especificaciones generales del sensor MODIS

Sensor MODIS	
Orbita	Altitud:708 km (Terra) y 705 km (Aqua), pasando en el ecuador a 10:30 a.m. nodo descendente (Terra) y a las 1:30 p.m.; nodo ascendente (Aqua), helio sincrónica, casi polar, circular.
Tasa de escaneo	20.3 rpm, ortogonal a la órbita
Dimensiones de la franja escaneada	2.330 km (ortogonal) por 10 km (a lo largo de la órbita, al nadir)
Telescopio	17.78 cm diámetro con planos de desvío intermediarios
Tamaño	1.0 x 1.6 x 1.0 m
Peso	228.7 kg
Codificación	12 bits
Resolución espacial	250 m (bandas 1-2) 500 m (bandas 3-7) 1000 m (bandas 8-36)
Vida útil	6 años

Fuente: Pagina de la Nasa <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>.

2.8.1. Criterios para la selección de imágenes

El primer paso para garantizar una delimitación óptima de las zonas de manejo es seleccionar la imagen adecuada para procesar, ya que la calidad del producto final depende de esta, que es el insumo básico. Los puntos más importantes a considerar son la resolución espacial de la imagen, en relación al tamaño y forma del lote, y la fecha de la misma, (KEMERER, 2011).

En una imagen satelital los pixeles que limita los lotes presentan valores de ND que resultan de la mezcla de la referencia de las coberturas presentes en los lotes adyacentes, lo que normalmente se conoce como efecto borde (Figura 7.) estos pixeles no deben ser tenidos en cuenta en la clasificación, ya que sus valores son muy diferentes respecto a los pixeles puros y generan grupos o zonas de manejo adicionales que carecen de interés. Según el tamaño y la forma del lote en estudio, se debe seleccionar una imagen con una resolución espacial que permita contar con un número adecuado de píxeles a clasificar cuando se hayan descartado los píxeles de borde. La selección de la fecha óptima de la imagen a procesar está relacionada al cultivo en consideración y a la disponibilidad de imágenes libres de nubes. La resolución temporal del satélite debe permitir obtener alguna imagen libre de nubes durante el período de interés (KEMERER, 2011).

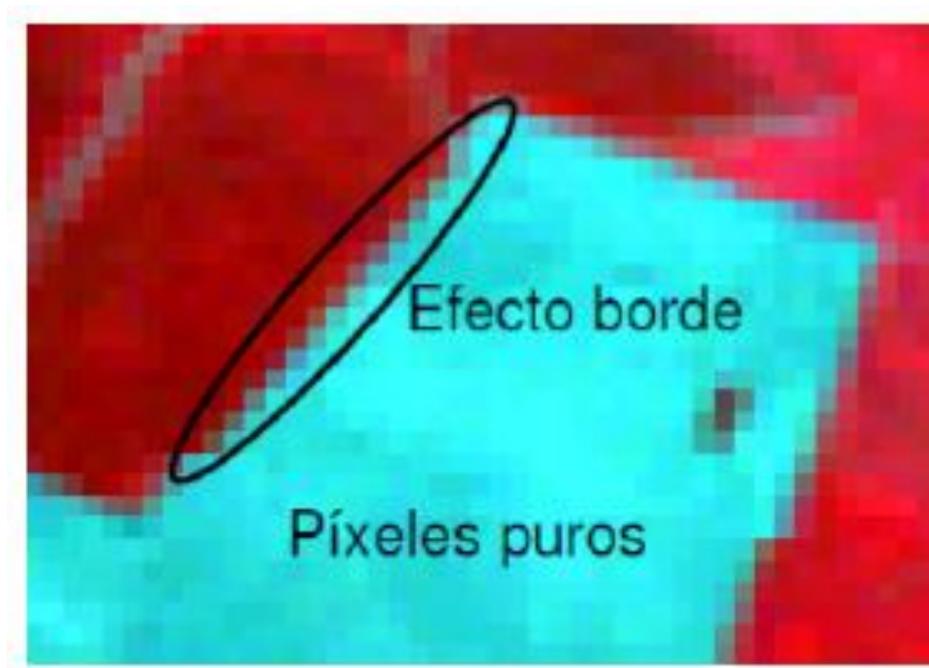


Figura 7. Detalle del efecto borde observado en los límites de los lotes. Fuente: KEMERER (2011).

2.8.2. Transmisión y pre - procesamiento de los datos

A bordo de Terra y Aqua, los datos MODIS se transfieren a las estaciones en tierra en White Sands, Nuevo México, a través del seguimiento y retransmisión de datos desde el sistema de satélites (Tracking and Data Relay Satellite System -TDRSS). Una de las características que distinguen a MODIS de cualquier otro instrumento es que no solo se puede tener acceso a los datos después de su captura y almacenamiento para la posterior descarga, además, tiene la capacidad de poder transmitir de manera directa los datos crudos que colecta a una base en tierra (*Direct Broadcast*). El instrumento de MODIS Terra fue uno de los primeros satélites en operar con una transmisión directa de datos, de manera constante y con disponibilidad de que cualquiera con el equipo y

software adecuados pueda obtener estos datos gratuitamente ver Figura 8. Los datos son enviados al sistema de datos y operaciones del *EOS Data and Operations System (EDOS)* al centro espacial de vuelo Goddard. (XIONG, 2008).

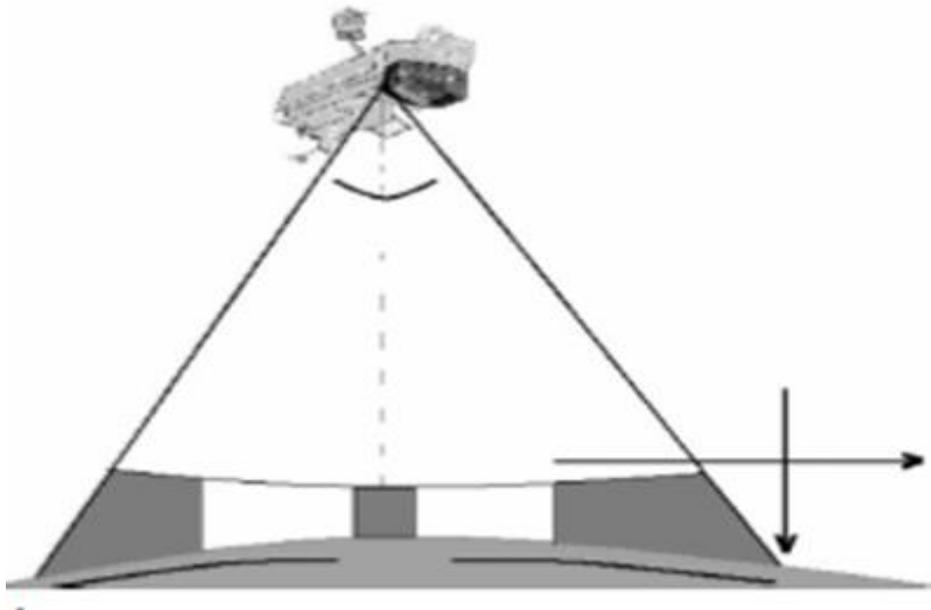


Figura 8. Ángulo de visión del sensor MODIS. Fuente: XIONG (2008).

Los distintos datos derivados de las observaciones de MODIS pueden obtenerse desde diferentes fuentes, MODIS nivel 1 y productos de atmósfera están disponibles en el portal de Nivel 1 y Sistema de Distribución de Archivos de la Atmósfera (LAADS por sus siglas en inglés) <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>. Los productos para aplicaciones terrestres a través del centro de datos EROS de Estados Unidos en el portal <http://daac.gsfc.nasa.gov>, los productos de cobertura de nieve y hielo se obtienen a través del portal del Centro de Vuelos Espaciales Goddard (GSFC por sus siglas en inglés) <http://www.nasa.gov/centers/goddard/home/index.html> (XIONG, 2008).

2.8.3. Niveles de procesamiento

Según RUNNING *et al.*, (1994), los productos MODIS son divididos en cinco niveles (0 a 4) en función del grado de procesamiento realizado:

- Nivel 0: Son los datos brutos sin ningún tratamiento, sólo los artefactos de comunicación han sido eliminados, como por ejemplo los paquetes de sincronización y los encabezados de comunicación entre el satélite y la estación de recepción.
- Nivel L1: Son los datos de geolocalización (identificados como MOD03) que contiene coordenadas geodésicas, información sobre la elevación del terreno, máscara de tierra/agua, ángulo de elevación, cenit y azimut del satélite y del sol.
- Nivel 1A: Son los productos utilizados para la geolocalización, la calibración y el procesamiento. Contienen los niveles de radiancia (MOD01) de las 36 bandas, junto con datos auxiliares del sensor y del satélite como coeficientes de calibración radiométrica y corrección geométrica, parámetros de georreferenciación (efemérides de la plataforma).
- Nivel 1B: Son los productos que contienen las radiancias calibradas y con geolocalización (MOD02) para las 36 bandas generadas por el nivel 1A. Es por lo tanto una imagen radiométricamente corregida y calibrada a unidades físicas. Datos adicionales incluyen estimaciones de calidad, del error y datos de calibración.

- Nivel L2G: Son los productos que contienen variables geofísicas proyectadas en una malla uniforme. Los datos adquiridos durante un periodo fijo de tiempo (12 o 24 horas) son agrupados en una cuadrícula de 1,200 x 1,200 km, llamado tile, en la proyección sinusoidal de igual área.
- Nivel L2: Son los productos que contienen variables geofísicas. Estos productos se generan a partir del producto nivel L1B aplicando correcciones atmosféricas y algoritmos bio-ópticos. Algunos de estos productos se presentan en el capítulo a continuación. Estos productos generados pueden ser almacenados en gránulos, que corresponden a 5 minutos de datos colectados por MODIS, de tal forma que cada gránulo es de aproximadamente 2,340 x 2,330 km.
- Nivel 3: Son productos de valor agregado derivados de variables geofísicas mapeadas. En algunos casos, se realiza un remuestreo a una menor resolución espacial que las bandas originales y se elaboran compuestos de intervalos de tiempo establecidos (1, 8, 16 y 30 días). Algunos productos de nivel 3 que se describen en el capítulo siguiente son; reflectancia (MOD09), índices de vegetación (MOD13), temperatura y emisividad de la superficie terrestre (MOD11) y puntos de calor e incendios (MOD14).
- Nivel 4: Son los productos generados por la incorporación de los datos MODIS en modelos para así estimar variables geofísicas (NASA, 2008). Estos productos se generan usando productos nivel

L2 y datos auxiliares. Algunos ejemplos de estos productos que se presentan en el capítulo siguiente son el índice de área foliar / fracción de radiación activa fotosintética (MOD15), las coberturas del suelo (MOD12) y la producción primaria (MOD17).

2.9. MODIS 16 A2

Los productos de datos terrestres MODIS de nivel 4, MOD 16, conjunto de datos de Evapotranspiración (ET) mundial de 8 días (MOD 16 A 2) y anual (MOD 16 A 3) a una resolución espacial de 0.5 km sobre el área global de 109.03 millones de km² este sensor MODIS a bordo de las plataformas Aqua y Terra. El algoritmo MOD 16 se basa en la lógica de la ecuación Penman-Monteith que utiliza datos de reanálisis meteorológicos diarios y dinámicas de propiedad de vegetación detectadas remotamente de 8 días de MODIS como entradas. Una visión general amplia y detalles suficientes para permitir el uso exitoso de los datos en investigación y aplicaciones. (RUNNING *et al.*, 2017). Esa nota, MODIS a bordo de satélite TERRA o Aqua. Es decir, "MOD" en este documento también se puede tratar como "MYD" derivado de MODIS en Aqua.

2.9.1. El algoritmo, antecedentes y visión general

El cálculo de ET generalmente se basa en la conservación de energía o masa, o ambos. La computación ET es una combinación de dos cuestiones principales complicadas: (1) estimar la conductancia estomática para derivar la transpiración de las superficies de las plantas; y (2) estimar la

evaporación desde la superficie del suelo. El algoritmo MOD16 ET se ejecuta a diario y, temporalmente, la ET diaria es la suma de ET desde el día y la noche. Verticalmente, ET es la suma de los flujos de vapor de agua de la evaporación del suelo, la evaporación del dosel húmedo y la transpiración de la planta en la superficie del dosel seco. Desde hace mucho tiempo, se reconoce que la teledetección es el medio más factible para proporcionar información ET regional distribuida espacialmente en superficies terrestres. Los datos detectados remotamente, especialmente los de satélites en órbita polar, proporcionan información temporal y espacialmente continua sobre superficies vegetadas útiles para la medición regional y el monitoreo de variables biofísicas de superficie que afectan ET, incluyendo albedo, tipo de bioma e índice de área foliar (LAI) (Los *et al.*, 2000) mencionado por (RUNNING *et al.*, 2017).

2.9.2. Lógica Penman-Monteith

RUNNING *et al.*, (2017) desarrollar un algoritmo robusto para estimar la evapotranspiración global es un desafío significativo. Los modelos tradicionales de equilibrio de energía de ET requieren la caracterización explícita de numerosos parámetros físicos, muchos de los cuales son difíciles de determinar globalmente. Para estos modelos, los datos de teledetección térmica (por ejemplo, temperatura de la superficie terrestre, LST) son las entradas más importantes. Sin embargo, usando el MODIS LST compuesto de 8 días (el LST promedio de todos los datos sin nubes en la ventana de composición) y los datos meteorológicos diarios registrados en la torre de flujo, CLEUGH *et al.* (2007) demuestran que los resultados de los modelos térmicos no son confiables en dos

sitios australianos (Virginia Park, una sábana tropical húmeda / seca ubicada en el norte de Queensland y Tumberumba, un bosque latifoliado templado fresco en el sureste de Nueva Gales del Sur). Usando una combinación de teledetección y datos meteorológicos globales, hemos adaptado el algoritmo, que se basa en el método Penman-Monteith y calcula tanto la conductancia del dosel como la ET (CLEUGH *et al.*, 2007):

$$\lambda E = \frac{sA' + \rho C_p \frac{(e_{sat} - e)}{r_a}}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} = \frac{sA' + \rho C_p \frac{VPD}{r_a}}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (1)$$

Donde $s = d(e_{sat})/dT$, la pendiente de la curva que relaciona la presión de vapor de agua saturada (e_{sat}) con la temperatura; A' es energía disponible dividida entre calor sensible y flujos de calor latentes en la superficie terrestre. $VPD = e_{sat} - e$ es el déficit de presión de vapor de aire. Todas las entradas se han definido previamente, excepto por la resistencia de superficie r_s , que es una resistencia efectiva que representa la evaporación de la superficie del suelo y la transpiración desde el dosel de la planta.

2.9.3. La lógica del algoritmo MOD16A2 / MOD16A3

El algoritmo MOD16 ET se basa en la ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1965) como en la ecuación 1. La Figura 9 muestra el diagrama de flujo del algoritmo MOD16 ET mejorado para calcular la ET diaria MOD16 (RUNNING *et al.*, 2017).

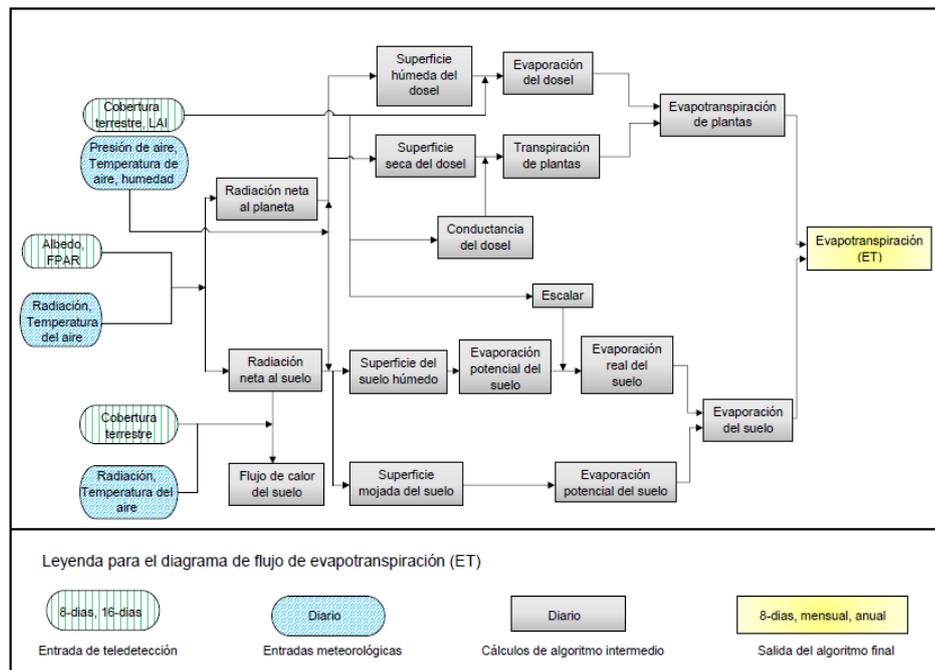


Figura 9. Diagrama de flujo del algoritmo MOD16 ET mejorado. IAF: índice de área foliar; FPAR: Fracción de radiación fotosintéticamente activa. El cálculo de radiación neta y el uso de FPAR. Fuente: RUNNING *et al.* (2017).

2.9.4. Validación de MOD16

Para validar el algoritmo MOD16, se ha utilizado el flujo de calor latente observado en 46 torres de flujo mediante la covarianza *eddy* basadas en campo, 232 cuencas hidrográficas globales, y resultados globales los últimos 11 años (2000 a 2010). Cortamos los datos MODIS de entrada para los 3 x 3 píxeles de 1 km² que rodean cada torre. Manejamos el algoritmo MOD16 ET con los datos meteorológicos observados en la torre y los datos meteorológicos mundiales de GMAO. Se obtuvo estimaciones promedio de ET sobre píxeles de 1 km² (3 x 3) donde el tipo de cobertura vegetación sobre el cual se encuentra la torre es la misma que el tipo de cobertura registrado por MODIS. Luego, se

comparó las estimaciones de ET con los valores de ET observados por la torre. Para cada uno de los siete tipos de bioma entre las 46 torres de flujo excepto CSH (arbusto cerrado) y OSH (arbustos abiertos), ya que solo hay una torre con menos de 365 mediciones para cada uno de ellos, elegimos una torre para mostrar el rendimiento del algoritmo MOD16 ET (Figura 10) (RUNNING *et al.*, 2017).

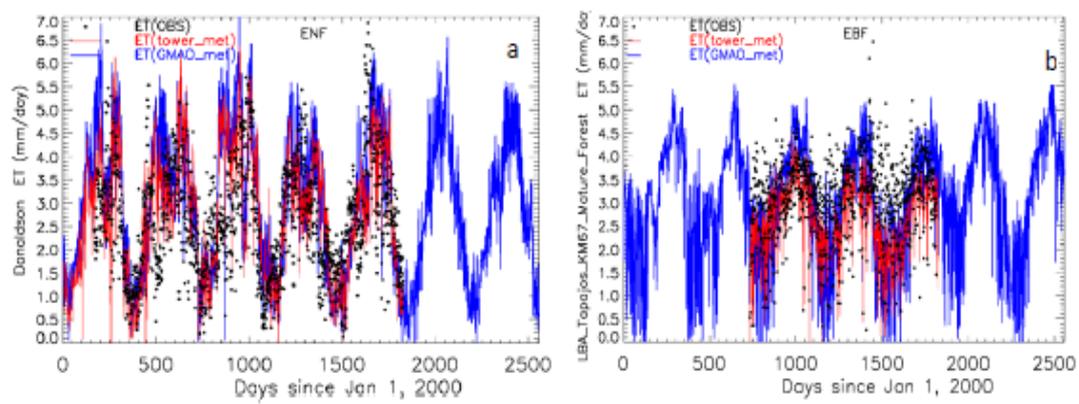


Figura 10. Las mediciones de ET (puntos negros, OBS), datos meteorológicos (líneas rojas) y datos meteorológicos GMAO (líneas azules) durante 2000 - 2006 en siete sitios de la torre, Donaldson (a) y LBA Tapajos KM67 Madura Bosque (b). Fuente: RUNNING *et al.*, (2017).

Los sesgos diarios de la ET promedio entre las observaciones de ET y las estimaciones de ET en las 46 torres son de $-0,11 \text{ kg} / \text{m}^2 / \text{día}$ impulsados por los datos meteorológicos de la torre y de $-0,02 \text{ kg} / \text{m}^2 / \text{día}$ impulsados por los datos meteorológicos de GMAO. Los errores medios absolutos medios (MAE) son $0,33 \text{ kg} / \text{m}^2 / \text{día}$ (meteorología específica de la torre) y $0,31 \text{ kg} / \text{m}^2 / \text{día}$ (meteorología GMAO). Los valores de MAE son 24.6% y 24.1% de las mediciones de ET, dentro del rango del 10 - 30% de la precisión de las

observaciones ET (Courault *et al.*, 2005, Jiang *et al.*, 2004, Kalma *et al.*, 2008) mencionados por (RUNNING *et al.*, 2017).

2.9.5. Descripción del producto MODIS 16A2

En el Cuadro 2 se lista los conjuntos de datos científicos en el MOD16A2 de 8 días. ET_500m y potencial ET (PET), PET_500m, son la suma de 8 días de pérdida total de agua por ET ($0.1 \text{ kg} / \text{m}^2 / 8 \text{ días}$), mientras que los flujos de calor latentes asociados y su potencial, LE_500m y PLE_500m, son la energía total promedio sobre un área unitaria por día unidad durante el período compuesto de 8 días ($10000 \text{ J} / \text{m}^2 / \text{día}$). Se debe tener en cuenta que el ultimo valor de cada año (MOD16A2.A20 ?? 361. *. Hdf) no corresponde a un periodo de 8 días sino a 5 o 6, dependiendo si se trata de un año normal o bisiesto. (RUNNING *et al.*, 2017). Como se enumera en el Cuadro 2, para datos válidos (Valid_data con el rango válido) de MOD16A2, el valor real (Real_value) de cada conjunto de datos (ET, LE, PET o PLE) en las unidades correspondientes ($\text{kg} / \text{m}^2 / 8\text{d}$ o $\text{J} / \text{m}^2 / \text{d}$) se puede calcular usando la siguiente ecuación 2:

$$\text{Valor_real} = \text{Datos_validos} * \text{Factor_escala} \quad (2)$$

Cuadro 2. Información sobre los conjuntos de datos científicos en MOD16A2

Conjunto de datos	Información	Unidades	Tipo de dato	Rango valido	Factor escala
ET_500m	8-day total ET	kg/m2/8d	int16	-32767~32760	0.1
LE_500m	8-day media LE	j/m2/d	int16	-32767~32760	10000
PET_500m	8-day total PET	kg/m2/8d	int16	-32767~32760	0.1
PLE_500m	8-day media PLE	j/m2/d	int16	-32767~32760	10000
ET_QC_500m	Control calidad	ninguna	int16	0~254	ninguna

Fuente: RUNNING *et al.*, (2017)

Todos los datos producto de MOD16A2, a excepción del control de calidad del campo de datos (QC), ET_QC_500 m, tienen un valor válido que va de -32767 a 32760 y se guardan en un entero corto de 2 bytes con signo (int16). Aunque los atributos de datos solo muestran un relleno de valores (*Fill Value*): 32767 en el archivo principal del archivo MOD16A2, de hecho, hay 7 valores de relleno enumerados a continuación para los píxeles sin vegetación, que no calculamos ET (RUNNING *et al.*, 2017).

- 32767 = _ Valor de relleno; 32766 = Cobertura de tierra asignada como sal perenne o cuerpos de agua; 32765 = Cobertura de la tierra asignada como estéril, escaso vegetal (roca, tundra, desierto); 32764 = cobertura de suelo asignado como nieve perenne, hielo; 32763 = Cobertura de tierra asignada como humedales “permanentes” / marismas inundadas; 32762 = Cobertura de suelo asignada como urbana / edificada; 32761 = Cobertura de suelo asignada como “sin clasificar” o (no se puede determinar).

2.10. Capacidad de retención de agua en el suelo (CRA)

La obtención del parámetro CRA fue realizada mediante un modelo con bases físicas que estima la cantidad de agua que contendrá un suelo a su capacidad de campo en condiciones naturales, esto es, teniendo en cuenta las condiciones de drenaje, que influyen sobre el retardo en la evacuación del agua gravitacional que ocupa los macroporos del suelo (Gandullo, 1985) citado por SANTOS *et al.*, 2006). Este parámetro fue revisado por SANTOS *et al.* (2006),

que derivaron dos parámetros, “capacidad de retención de agua modificada” (CRAM) y “capacidad de retención de agua disponible” (CRAD).

Entre las diversas fórmulas existentes para la estimación de la capacidad hídrica de un suelo el parámetro CRA plantea un modelo que no se limita a estudiar el agua retenida por una muestra alterada de tierra fina, sino que tiene en cuenta la posible retención de agua por la existencia de horizontes profundos menos permeables. Estas cualidades tienden un puente hacia otros modelos experimentales centrados en la acción del agua en superficie, como son los modelos de erosión o de escorrentía, para los que se considera que puede llegar a ser un interesante complemento. Esta modificación evita la asignación directa de capacidad cero a suelos sobre pendientes superiores al 100% y es coherente con la presencia de vegetación bien desarrollada en suelos sobre pendientes muy fuertes (SANTOS *et al.*, 2006).

2.10.1. El agua en el suelo

La función de absorber, retener y suministrar agua es una de las misiones ecológicas fundamentales que desempeña el suelo. En el ámbito forestal mediterráneo, en el que una parte importante de la precipitación se registra en el descanso vegetativo, la cantidad de agua que la reserva del suelo es capaz de suministrar a la vegetación limita la existencia y productividad de las especies forestales, a igualdad de condiciones climáticas (González Rebollar, 1999; Montero de Burgos y González Rebollar, 1983; Gandullo *et al.*, 1998) citado por (SANTOS *et al.*, 2006).

Por otro lado, considerando el cumplimiento de las condiciones de gestión sostenible de suelos forestales en general (SANTOS *et al.*, 2006) menciona que Powers *et al.*, (1998) plantea que analizar la variabilidad de la estimación de la degradación edáfica resultan ser más útil en la mayoría de los casos, dicha variabilidad ha sido relacionada con la disponibilidad de agua, por encima incluso de las relativas a la disponibilidad de nutrientes. En consecuencia, el agua en el suelo es un factor ecológico de gran importancia por lo cual resulta ser fundamental la determinar de los volúmenes que el suelo puede contener, así como su contribución para la cobertura vegetal (SANTOS *et al.*, 2006).

Un estimador de la capacidad hídrica del es la capacidad de retención de agua, CRA, propuesto por Gandullo (1985) (SANTOS *et al.*, 2006).

2.11. Cobertura vegetal

La cobertura vegetal puede ser definida como la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomásas con diferentes características fisonómicas y ambientales que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales. También se incluyen las coberturas vegetales inducidas que son el resultado de la acción humana como serían las áreas de cultivos (GEOINSTITUTOS, 2010).

2.12. Balance hídrico

Es el estudio de la estructura y funcionamiento de la cuenca superficial y subterránea, cuerpos de agua y ríos; es fundamental para la gestión

de agua en el espacio y el tiempo. A partir del balance hídrico es posible hacer una evaluación cuantitativa de los recursos del agua y sus modificaciones por influencia del hombre (UNESCO, 2006).

UNESCO (2006), menciona que los balances hídricos adquieren auge a raíz de establecerse el concepto de "evapotranspiración potencial" para un terreno. Thornthwaite, 1955 este climatólogo norteamericano halló una fórmula para su cálculo mensual, basada en experiencias realizadas con lisímetros. El cálculo pormenorizado, mes a mes, de las entradas de agua al sistema (lluvias), pérdidas por evaporación y transpiración de la vegetación, agua retenida en el perfil edáfico y agua percolada a drenaje profundo, permitía establecer balances hídricos para un lugar determinado y a lo largo de un año hidrológico (Thornthwaite y Mather, 1957). Posteriormente, otros autores (Penman, 1948, 1963; Blaney Criddle, 1950; Blaney, 1955; Turc, 1961; Van Bavel, 1966; etc.) establecieron también métodos paramétricos de cálculo de la "evapotranspiración potencial", que han sido manejados (lo son, en la actualidad) con mayor o menor éxito y que, a su vez, han sido utilizados en los balances hídricos con ligeras variantes (Cerezuela, 1977; Montero de Burgos y González Rebollar, 1974).

Desde el punto de vista agrícola, el balance ayuda a conocer las zonas con mayores deficiencias de recurso agua, permitiendo de esta manera planificar, desarrollar y aplicar métodos de riego que optimicen al máximo el agua; así como la construcción de reservorios de regulación. Es por ello que la elaboración, desarrollo y culminación del estudio hidrológico, contribuye a una

mejor planificación de programas de desarrollo que busquen atender de una manera eficiente y óptima la distribución del recurso agua, en apoyo a la sostenibilidad socio – económica; a nivel local, regional y nacional (UNESCO, 2006).

2.12.1. Forma general de la ecuación de balance hídrico

La aplicación del balance hídrico se basa en el principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de la continuidad. Este establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier periodo de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación de volumen de agua almacenada. En general, la técnica del balance hídrico implica mediciones de ambos aspectos, almacenamientos y flujos de agua; sin embargo, algunas mediciones se eliminan en función del volumen y período de tiempo utilizados para cálculo del balance (UNESCO, 1971).

La ecuación del balance hídrico, para cualquier zona o cuenca o cualquier cuerpo de agua, indica los valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada en la zona o masa de agua. En general, las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación (P), en forma de lluvia o nieve, realmente recibida en la superficie del suelo, y las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la cuenca o cuerpo de agua (Q_{si} y Q_{ul}). Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación desde la superficie de la masa del agua (E) y la salida de corrientes del agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada (Q_{so} y

Q_{uO}). Cuando las entradas superan a las salidas el volumen de agua almacenada (ΔS) aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye. Todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación, y la ecuación del balance deberá incluir, por tanto, un término residual o de diferencia (U). Por lo tanto, el balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo, en su forma más general, vendrá representado por la siguiente ecuación (3) (UNESCO, 1981).

$$P + Q_{sl} + Q_{ul} - E - Q_{sO} - Q_{uO} - \Delta s - U = 0 \quad (3)$$

2.12.2. Cálculo de balance hídrico en cuencas fluviales

El cálculo del balance hídrico en cuencas fluviales es siempre el principal objetivo. A partir del balance en cuencas de ríos de primer orden se calculan los balances hídricos generales y se evalúan los recursos de agua para diferentes países, regiones y continentes (UNESCO, 1981).

Para calcular el balance hídrico de una cuenca compuesta por un río de gran extensión (cientos de miles de km^2) con diferentes características fisiográficas, la cuenca debe dividirse en un número adecuado de zonas (subcuencas), para cada una de las cuales se realiza el cálculo del balance hídrico. (UNESCO, 1981)

El balance hídrico total de la cuenca se calcula a partir de los valores medios ponderados de los principales componentes del balance hídrico de las subcuencas. Si se calcula el balance hídrico en una cuenca de un río de poca extensión (no más de 1000 – 1200 km^2), caracterizado por un régimen

equilibrado (praderas, bosques, tierras de regadío o drenadas, pantanos, glaciales, etc.), los componentes del balance hídrico específicos de áreas independientes se realizan cuando dichas áreas cubren más del 20 – 30% de área total de la cuenca. Para cuencas alto andinas es necesario considerar la influencia de la precipitación sobre los componentes del balance hídrico en la cabecera cuenca (UNESCO, 1981).

2.12.3. Balance hídrico medio de una cuenca

El cálculo de balance hídrico “medio” para cuencas fluviales en un ciclo anual completo (año hidrológico), proporciona información inicial sobre los recursos de agua de la cuenca. La ecuación 4 del balance hídrico de una cuenca cerrada de un río, para un periodo de tiempo largos como un año hidrológico, se puede expresar así (UNESCO, 1981).

$$P - Q - E = 0 \quad (4)$$

En algunas cuencas con intercambios notables de agua subterráneas con las cuencas adyacentes. El intercambio de agua subterránea se puede evaluar por medio de observaciones especiales como la capilaridad, interflujo, flujo sobre el terreno, precipitación, descarga de acuíferos artesianos, recarga desde otras cuencas, intercambio con el interflujo superficial (UNESCO, 1981).

La precipitación media anual (P) y el caudal (Q) se obtiene a partir de mediciones en campo; por tanto, cuando no existe un significativo intercambio

de aguas subterráneas con las cuencas adyacentes o con el mar, el valor de la evaporación media anual en la cuenca es válido si se obtiene utilizando la ecuación 3 (UNESCO, 1981).

$$E = P - Q \quad (5)$$

Los cálculos del balance hídrico medio indican que el valor de los elementos indeterminados del balance y los errores de medición pueden ser importantes. No obstante, al aumentar el periodo del balance hídrico algunos elementos indeterminados del mismo pueden pasar a estaciones siguientes y resultar así componentes medibles en la ecuación del balance hídrico (UNESCO, 1981).

2.12.4. Fórmula sintética

La expresión sintética del balance hídrico es (ROSALES, 2012):

$$\text{Estado}_{T+1} = \text{Estado}_T + \sum_{i=1}^N \text{Entradas}_i - \sum_{j=1}^M \text{Salidas}_j \quad (6)$$

Donde:

Estado_{T+1} = Nueva estimación del balance hídrico

Estado_T = Balance hídrico de la cuenca antes de iniciar el
(almacenamiento en el suelo)

Entradas_i = son todas las entradas de agua a la cuenca (precipitación, aporte de agua almacenamiento en el subsuelo)

Salidas_j = son todas las salidas de agua de la cuenca (evapotranspiración, escurrimiento).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El área de estudio posee dos unidades de vegetación: área con influencia antrópica y bosque montano. Existe vegetación con diferentes estadios sucesionales y suelos con diferentes niveles de degradación, y también áreas de influencia de carreteras dentro de la zona de estudio. El bosque montano está circundado por el área de influencia antrópica y es la unidad que presenta menor extensión que se distribuye en parches, con árboles emergentes de 20 a 25 m de altura. El incremento de las áreas deforestadas en el bosque montano se relaciona directamente con la instalación de cultivos de granadilla, aguaymanto y rocoto, y pastizales para el pastoreo de ganado. La cuenca está caracterizada por una sola quebrada a la que denominamos “Challana” que los pobladores usan para distintos tipos de actividades. Ver mapa de área de estudio en anexo 1.

3.1.1. Ubicación política

La cuenca Challana se encuentra en la localidad de Caracol, del distrito de Chinchao, departamento Huánuco, posee una extensión de 90.439 ha, y forma parte de la cuenca del río Chinchao como unidad hidrográfica (Figura 11).

3.1.2. Ubicación geográfica

El área de estudio se encuentra ubicado en la Latitud Sur: $09^{\circ} 46' 15''$ y Longitud Oeste: $76^{\circ} 05' 17''$ siendo en coordenadas UTM 382687 Este y 8934539 Norte, a una Altitud 2110 msnm (Figura 11).

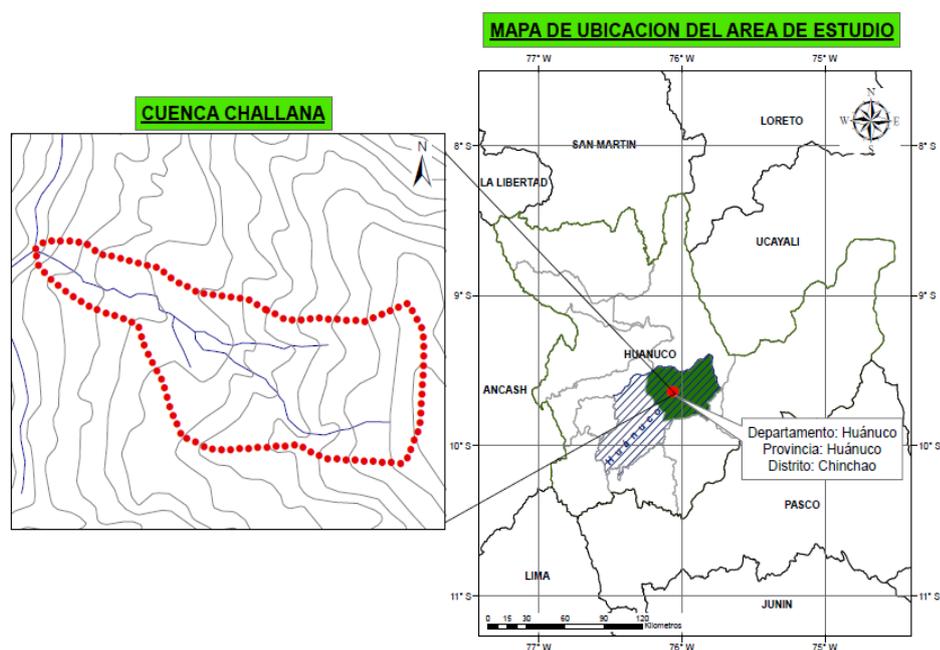


Figura 11. Mapa de ubicación del área de estudio

3.1.3. Clima

La cuenca Challana tiene un clima húmedo en donde la precipitación es mayor que la evapotranspiración, teniendo una relación de 0.429.

WALS Perú (2010), la precipitación, humedad y temperatura promedio anual son 2348.0 mm, 88.7 % y 14.4°C , respectivamente de acuerdo a los registros de la estación meteorológica de Carpish ($9^{\circ} 40' 1'' \text{ S}$, $76^{\circ} 5' 1'' \text{ O}$).

3.1.4. Zona de vida

De acuerdo a la clasificación ecológica de las zonas de vida Holdridge (ONERN, 1976), el área de estudio se caracteriza como bosque pluvial – Montano bajo Tropical (bp – MBT) localizándose entre los 1600 a 1900 m.s.n.m llegando a altitudes máximas de 2300 – 2600 m.s.n.m.

3.1.5. Vegetación

La cobertura vegetal, capacidad de uso mayor de los suelos y la zona de vida en el área de estudio; es descrito por INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales), como cultivos agropecuarios y purmas con vegetación secundaria, sin embargo, su aptitud es protección forestal, de calidad agrologica baja, limitadas por el suelo y la erosión. Asimismo, actualmente, el uso de tierras predominante es para la agricultura y pastoreo, esta última en mayor proporción sobre la cuenca con espacios aislados de bosques en zonas agrestes donde se ha logrado su conservación.

3.1.6. Suelo

La cuenca Challana presenta suelos: Francos, arcillosos, Franco arcilloso arenoso, franco arenoso y franco arcilloso, promediados de cada horizonte y distribuidos en toda el área de estudio, representándolos espacialmente en el área de estudio (Ver Anexo 3).

3.1.7. Fisiografía

Se presentan colinas, terrazas y montañas, conformando así las principales unidades fisiográficas de la zona de estudio (Ver mapa en Anexo 1).

3.1.8. Hidrografía

La cuenca Challana tiene una red hidrográfica dendrítica y sus tributarios son de recorrido corto con pendientes fuertes y la microcuenca de mayor extensión es la de Chinchao.

3.1.9. Accesibilidad

La vía de acceso a la zona de estudio desde la ciudad de Tingo María, se realiza vía terrestre por la carretera central con un recorrido aproximadamente de 50 minutos a la ciudad de Huánuco, mediante un vehículo de transporte público o privado.

3.2. Materiales

Para el desarrollo de la investigación, se requirió de los distintos insumos, equipos y materiales, acorde con el enfoque metodológico las cuales se presentan a continuación:

3.2.1. Materiales de campo

- Wincha de 3 m y 25 m
- Libreta de campo

- Bolsas de plásticos
- Etiquetas
- Mapa de ubicación
- Balanza gramera
- Pala, pico y machete

3.2.2. Equipos de campo

- 01 sensor de nivel de agua, marca Odisey.
- 01 estaciones meteorológicos portátil, marca WS – 3000.
- 01 GPS navegador MAP 62 S.
- 01 cámara fotográfica
- 01 computadora portátil TOSHIBA i7

3.2.3. Insumos

- Imágenes de satélite MODIS 16 A2 una resolución de 0.5 km
- Modelo digital de elevación Alospolsar 12.5 m
- Carta Nacional escala 1:25000
- Mapas de uso de suelo, fisiográfico y de pendiente, a escala 1:7500.
- Registro de parámetros meteorológicos; precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y otro, proveniente de la estación fija y móvil.

3.2.4. Software

- ArcMap 10.5
- ModisTool.
- Global mapper 18.
- Odyssey Data Logging versión 2.0.0.2
- WeatherLink
- Microsoft Excel
- Microsoft Word

3.2. Metodología

3.3.1. Determinar la textura y materia orgánica en la cuenca

3.3.1.1. Clasificación de la vegetación y pendiente

La clasificación de la cobertura vegetal consiste en identificar los tipos de cobertura según la predominancia y/o cambios de uso potencial por las distintas actividades antrópicas observados en las imágenes satelitales y validadas en campo, permitiéndonos delimitar con polígonos las coberturas de uso de suelo en toda la cuenca, haciendo uso del software ArcMap 10.5 y también se realizó la clasificación de la pendiente en función a la modelo digital de elevación (MDE) proporcionado por el sensor ALOS PALSAR; se procedió a generar el mapa haciendo uso de la herramienta “*slope*” presente en el ArcToolBox, donde utilizamos en MDE como entrada (Input raster) y salida (output raster) simplemente le damos el nombre a guardar, finalmente en

medición de salida (output measurement) seleccionamos “*percent_rise*” para obtener nuestra capa raster en porcentajes (%), una vez obtenido estas capas se realizó la reclasificación en los rangos de porcentajes definidas en el Cuadro 17 (Ver Anexo 7), luego la conversión a vector y finalmente generación del mapa (Ver mapas en Anexo 1).

3.3.1.2. Distribución del suelo

Los puntos de muestreo se realizaron de acuerdo a la coberturas y pendientes que se presentan en toda la zona de estudio, distribuyéndose desde la parte alta hasta la baja, tratando de cubrir toda la cuenca para generalizar los resultados, resultando un total de 9 calicatas, el análisis se realizó en función de la profundidad de cada horizonte para determinar el tipo de suelo y su hidrología.

3.3.1.3. Apertura de calicata

Con herramientas manuales (pico, pala) se excavó aproximadamente a 1.50 m de profundidad con un ancho y largo de 1 m, la profundidad puede ser variable debido a la presencia de rocas en el subsuelo. Y seguidamente se realizó una medición de la profundidad de los horizontes de cada perfil del suelo y se recolectaron muestras para que sean analizadas en laboratorio de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

3.3.1.4. Porcentaje de tierra fina

Se realizó el secado de suelo a temperatura ambiente para obtener la tierra fina secada al aire (%TF) siendo ésta, el peso del material que atraviesa

un tamiz de 2 mm de paso de malla en relación al peso total de la muestra de tierra natural (TN) que incluye finos y gruesos (SANTOS *et al.*, 2006). En consecuencia, la tierra fina está integrada por arcilla, el limo y la arena. Por lo tanto:

$$\%TF = [(\text{Peso de TF}) / (\text{Peso de TN})] * 100 \quad (7)$$

3.3.1.5. Propiedades físicas del suelo y materia orgánica

Se realizó por especialistas del laboratorio de suelos perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva donde se determinaron la textura y materia orgánica del suelo, y, también se tomaron datos de textura y materia orgánica de la tesis de PALOMINO (2015), el resultado se observa en el Anexo 2.

3.3.2. Estimación de precipitación, evapotranspiración y escorrentía

3.3.2.1. Análisis de la precipitación

En este estudio se utilizó una estación automática marca Davis modelo *Vantage Pro2 Plus* (denominada Challana) representativo para toda la cuenca con una influencia de 2 km a la redonda, cubriendo las 90 ha que posee la cuenca hidrográfica, se registró la lluvia a lo largo de un año, de septiembre 2014 hasta agosto del 2015, se hicieron mediciones de la precipitación en milímetros de forma continua cada 15 minutos durante todo el año siendo descargadas mensualmente la información con el software *WeatherLink* 5.8.0 en

una PC portátil para su respectivo proceso, a partir de estos datos en el proyecto se estimó la precipitación acumulada mensual. Realizamos una comparación de estadística básica de estos datos, con la estación más cercana, Carpish de SENAMHI.

3.3.2.2. Generación de evapotranspiración

Para la estimar la evapotranspiración real (ET_r) se utilizaron los datos que proporciona el sensor MODIS 16 A2 donde nos brinda información de la ET real cada 8 días con resolución de 500 metros, siendo desarrollado en la NASA por (RUNNING, MU, ZHAO, Y MORENO, 2017). Con el programa MODIS Reproject Tools, proyectamos las imágenes a UTM y cambiamos de HDF a formato TIF por ser más amigable para cualquier software, facilitando obtener los datos de ET_r con el ArcMap 10.5 como se muestra en el Anexo 6. El algoritmo utilizado para generación de la ET_r se basa en la lógica de la ecuación de Penman-Monteith, que incluye entradas de datos de reanálisis meteorológicos diarios junto con productos de datos de teledetección MODIS (dinámica de propiedad de la vegetación, albedo y la cobertura del suelo), la Figura 9 muestra la lógica detrás del algoritmo MOD16 ET mejorado para calcular el algoritmo ET diario MOD16 (Ver Anexo 5). Para acceder a los datos y descarga de imágenes ingresa a (https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod16_a2_v006).

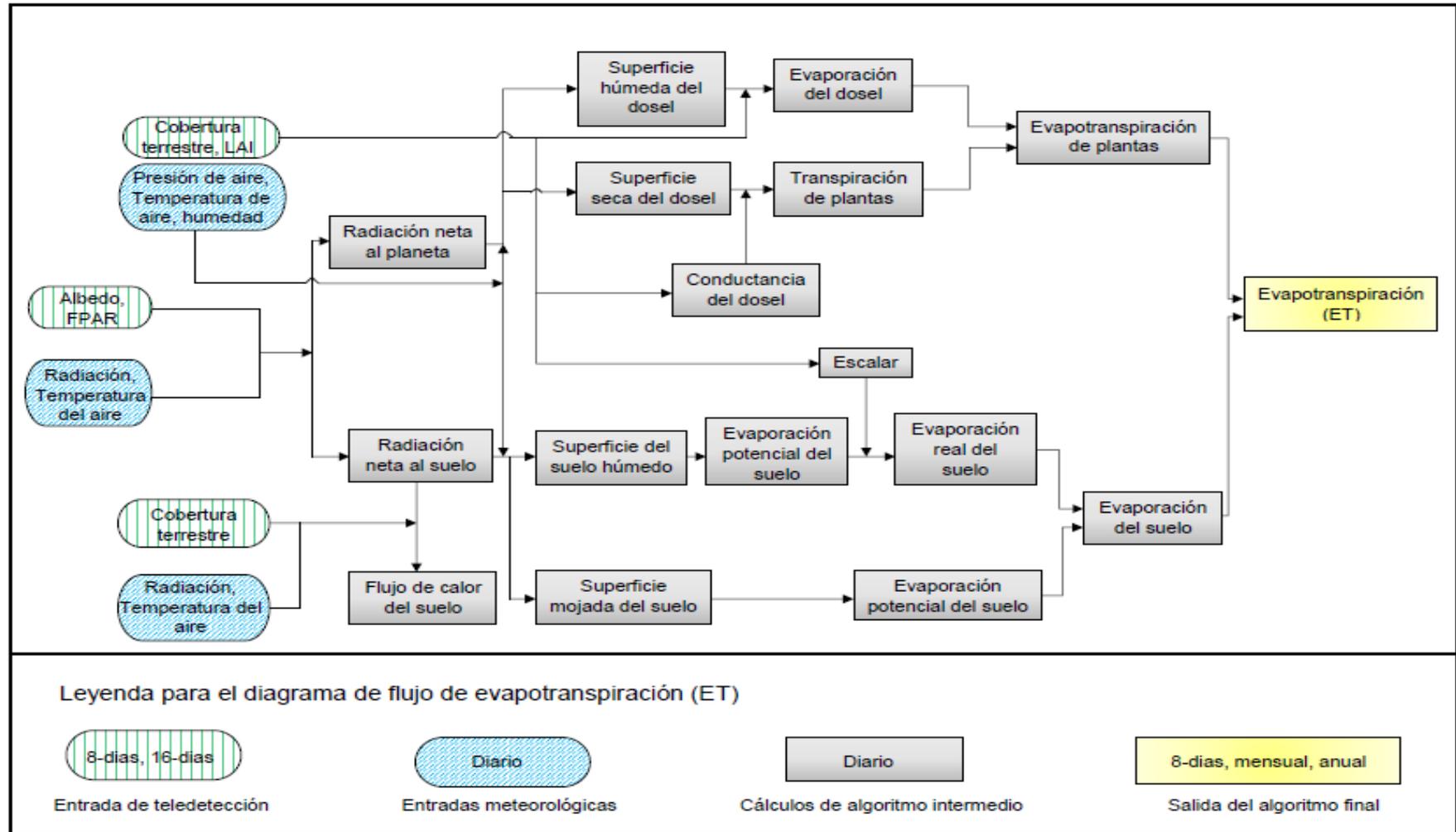


Figura 9. Diagrama de flujo del algoritmo MOD16 A2 ET mejorado. Fuente: NASA

En el Cuadro 2 se lista los conjuntos de datos científicos en el MOD16A2 de 8 días. ET_500m y potencial ET (PET), PET_500m, son la suma de 8 días de pérdida total de agua por ET (0.1 kg / m² / 8 días). Pero debe tenerse cuidado de que los últimos 8 días (MOD16A2.A20?? 361. *. Hdf) de cada año no sean de 8 días sino de 5 o 6 días, dependiendo del año normal o bisiesto, como se enumera en la Cuadro 2, para datos válidos (datos válidos con el rango válido) de MOD16A2, el valor real (valor real) de cada conjunto de datos (ET, LE, PET o PLE) en las unidades correspondientes (kg / m² / 8d o J / m² / d) se puede calcular usando la ecuación 2.

$$\text{Valor_real} = \text{Datos_validos} * \text{Factor_escala} \quad (2)$$

Cuadro 2. Información sobre los conjuntos de datos científicos en MOD16A2

Conjunto de datos	Información	Unidades	Tipo de dato	Rango valido	Factor escala
ET_500m	8-day total ET	kg/m ² /8d	int16	-32767~32760	0.1
LE_500m	8-day media LE	j/m ² /d	int16	-32767~32760	10000
PET_500m	8-day total PET	kg/m ² /8d	int16	-32767~32760	0.1
PLE_500m	8-day media PLE	j/m ² /d	int16	-32767~32760	10000
ET_QC_500m	Control calidad	ninguna	int16	0~254	ninguna

Fuente: RUNNING *et al*, (2017)

Todos estos datos de evapotranspiración real que nos generó la imagen Modis cada 8 días, fueron analizados para cada mes en este proyecto y de esta manera determinar la evapotranspiración acumulada mensual. Todos estos datos de información satelital que nos brindó el sensor Modis fueron comparados con la estación automática Challana donde se realizó una prueba

estadística de mínima diferencia significativa al 95 % de confianza, apoyado por el programa estadístico Excel.

3.3.2.3. Estimación de la escorrentía

Para estimar la escorrentía se consideraron las siguientes características y procesos:

- Parámetros morfométricos de la cuenca

Para realizar el análisis morfométrico de la cuenca se utilizó el modelo digital de elevación (MDE) del satélite ALOSPALSAR proporcionando información topográfica, facilitando la delimitación y estimación de parámetros de la cuenca, llevándose a cabo en el ArcMap 10.5 (Ver Anexo 6).

- Topografía del cauce

Los lugares de monitoreo fueron seleccionados presentando las siguientes características:

- Fácil accesibilidad.
- Transportan agua durante todo el año.
- Lugares adecuados para la ubicación del sensor.
- Lugares adecuados para realizar los aforos.
- Lugar poco erosivo del bode del cauce.

**- Instalación y calibración del sensor de nivel de agua
ODISSEY**

Para la ubicación del nivel de agua, previamente, se ha analizado la descarga máxima probable y se identificó un espacio estable, con paredes y fondos de cauce uniforme y tramo recto. Dicha ubicación corresponde a uno de los márgenes, donde permanece el eje hidráulico de las aguas en temporada de estiaje.

En el lugar se calibró el equipo ODISSEY de acuerdo a las especificaciones técnica del proveedor, a dos niveles extremos, tanto inferior y superior con respecto al sensor estableciéndose la mejor ecuación de ajuste de los datos recogidos. De igual manera, en el software se sincronizó el tiempo de registro del sensor con la estación meteorológica instalada en el lugar y el intervalo de tiempo o frecuencia de recepción de los niveles de agua en el punto de aforo.

**- Monitorización de las variables meteorológicas e
hidrométricas**

Los niveles que se obtuvo con el sensor ODYSSEY ubicado en la coordenada 382687.017 E, 8934539.49 N a una elevación de 1550 m.s.n.m., el cuál fue el punto de aforo, tiene el principio básico de obtener la altura del agua del cauce por medio de la presión que el flujo provoca en la sección de la quebrada. Las alturas se tomaron cada 15 minutos al día, y se registraron

automáticamente en la memoria interna del sensor para ser monitorizada (descargadas) cada semana al software ODYSSEY 4.7 en una Pc portátil, los mismos que fueron transportados a una hoja de cálculo en EXCEL, cada dos o tres semanas, para su posterior procesamiento.

- Aforos

Para conocer la cantidad de agua que pasa por la sección de aforos de la quebrada se tomó los datos de nivel de agua, y se realizó el levantamiento y seccionamiento topográfico del cauce de todo el tramo donde se ubica el sensor tantas aguas arribas como aguas abajo. Con los cuales obtuvimos los perfiles de la superficie de agua con el modelo unidimensional HEC -RAS cuyo procedimiento de cálculo se basó en la ecuación de energía unidimensional. Se introdujeron los datos de corte transversal en el modelo copiando estación y datos de nivel en la tabla de destino y la ubicación de la sección transversal dentro del alcance fue definido por la estación de río y la distancia a la sección trasversal aguas abajo (longitud de alcance aguas abajo). Esta metodología se utilizó, para cada aforo del estudio donde todos los participantes del proyecto realizaron esta operación, presentándose los resultados y métodos en la tesis de ALEGRIA (2017), ver resultados de aforo obtenidos a través de este método en el Anexo 6.

- Escorrentía superficial

La escorrentía superficial de la cuenca se determinó al dividir el caudal aforado con el área de la cuenca; para cada mes del periodo de análisis

(septiembre 2014 a agosto 2015). Para ello, se utilizó la siguiente ecuación 8 mostrada a continuación:

$$E = \frac{Q}{A} \times 1000 \quad (8)$$

Donde:

E = Escorrentía en milímetros (mm)

Q = Caudal en m³/s

A = Área de la cuenca en m²

3.3.3. Determinar el balance hídrico de la cuenca Challana

3.3.3.1. Definición de datos y período de análisis

La estimación del balance hídrico se realizó en periodos mensuales desde septiembre 2014 a agosto 2015. Los datos medidos en campo de cada mes, fueron, proporcionados por registros de la estación automática Challana (Precipitación y evapotranspiración) y la estación hidrométrica ODISSEY (caudal), mientras que los estimados por información satelital proceden del sensor MODIS 16 A2 (500m) (Evapotranspiración).

3.3.3.2. Balance hídrico

La estimación del balance consiste en estimar la precipitación y evapotranspiración a nivel distribuido en una escala temporal mensual para la zona de estudio y después se agregaron, a nivel mensual, las mediciones de

escorrentía de la cuenca. Los puntos de estaciones hidrométricas y meteorológicas constituyen puntos de salida y entrada de la cuenca; el contenido de humedad del suelo se asume como cero, es decir se establece que no se produce un cambio sustancial de almacenamiento en el suelo (ROSALES, 2012), con esta suposición es posible determinar infiltración como la única incógnita del balance hídrico. El esquema de la metodología se muestra en la Figura 12.

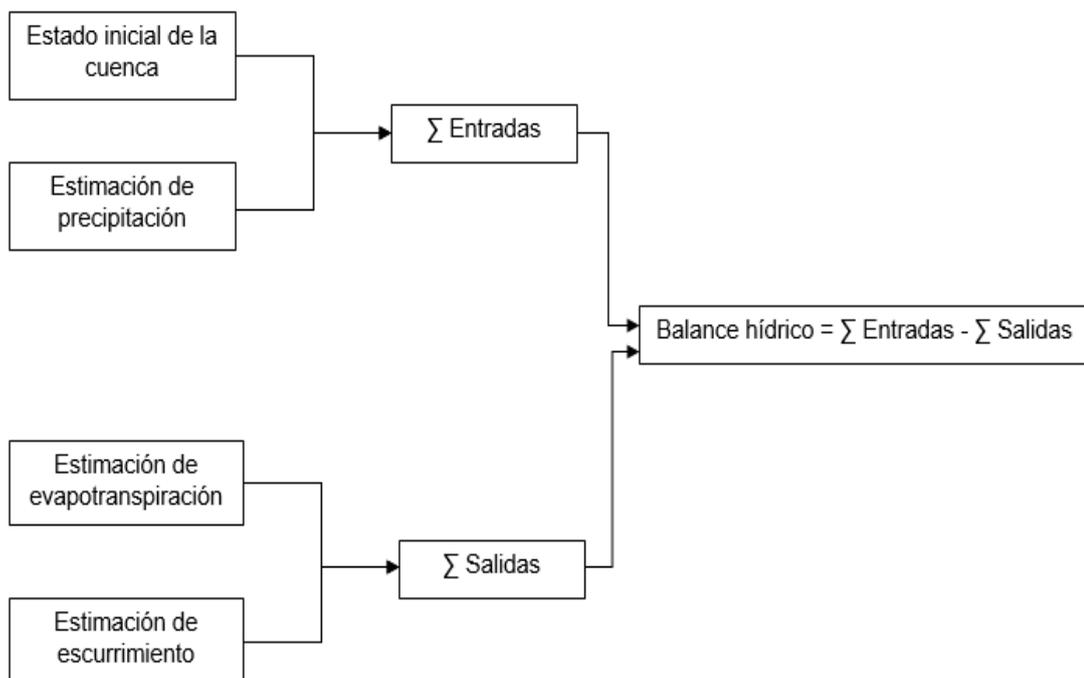


Figura 12. Esquema general de la metodología, muestra el flujo de datos que son requeridos para la estimación del balance hídrico. Fuente: ROSALES (2012)

Para el balance empleamos la ecuación 9, que es una modificación de la ecuación 6, donde se ha despejado la infiltración (I).

$$I = P - Q - ET \quad (9)$$

Dónde: P es la precipitación, Q el caudal y ET la evapotranspiración. Como la ecuación 9 de balance hídrico comienza generalmente con el cálculo de la precipitación sobre la cuenca, los otros componentes también se expresan como altura de agua en las unidades recomendadas (mm).

3.3.4. Determinar la capacidad de retención de agua (CRA)

3.3.4.1. Capacidad de retención de agua del suelo

Este parámetro fue propuesta por GANDULLO (1985) y revisado por SANTOS *et al.*, (2006), que derivaron dos parámetros, “Capacidad de retención de agua modificada” (CRAM) y “Capacidad de retención de agua disponible” (CRAD).

La obtención del parámetro CRA fue realizada mediante un modelo con bases físicas que estima la cantidad de agua que contendrá un suelo a su capacidad de campo en condiciones de drenaje, que influyen sobre el retardo en la evacuación del agua gravitacional que ocupa los macroporos del suelo.

La metodología de cálculo del parámetro se desarrolló en tres pasos:

- **parámetros que condicionan la permeabilidad y condiciones de drenaje del perfil**

GANDULLO (1985) define un estimador de la permeabilidad de cada horizonte edáfico, PER, en relación con el volumen de macroporos que, después de las lluvias, dejan el agua y quedan llenos de aire. Se trata de un parámetro

relativo adimensional, resultado de combinar otros dos parámetros, CCC y CIL cuya definición es:

CCC: Coeficiente de capacidad de cementación

$$CCC = \frac{\text{arc} - 4 * \text{mo}}{TF} \quad (10)$$

CIL: Coeficiente de impermeabilidad debida al limo

$$CIL = \frac{\text{Limo} * TF}{10^4} \quad (11)$$

Donde:

arc: porcentaje de la arcilla en la tierra

mo: materia orgánica

Limo: porcentaje de limo en la tierra fina

TF: el porcentaje de tierra fina sobre una muestra de tierra natural secada al aire.

- Valores del parámetro Permeabilidad en función de la CCC y CIL (Ver Anexo 3)

$$PER = \begin{cases} \text{if } CCC < 0.15 & \text{then } PER = (5 - CCC / 0.15) \\ \text{elseif } CIL < 0.2 & \text{then } PER = (5 - CCC / 0.15) \\ \text{else } CIL \geq 0.2 & \text{then } PER = (5 - (CCC + CIL - 0.1) / 0.15) \\ \text{if } PER < 1 & PER = 1 \end{cases}$$

Donde:

$$CCC = (\text{arc} - 4 * \text{mo}) / TF$$

$$CIL = \text{limo} * TF / 10^4$$

arc = porcentaje de arcilla en tierra fina

mo = porcentaje de materia orgánica en tierra fina

TF = porcentaje de tierra fina secada al aire

- Cálculo del equivalente de humedad del suelo (h_e)

El valor de h_e depende de la textura y la materia orgánica de cada horizonte; la expresión de su cálculo fue obtenida por Sánchez Palomares y Blanco (1985).

$$h_e = 4.6 + 0.43 * \text{arc} + 0.25 * \text{limo} + 1.22 * \text{mo} \quad (12)$$

Donde h_e se expresa en porcentaje de peso de agua sobre peso de suelo seco que es capaz de retener una muestra preparada de tierra fina, una vez eliminada toda el agua gravitacional.

- Obtención del parámetro de la Capacidad de agua modificada (CRAM)

Una vez estimado el valor de equivalente de humedad, el modelo físico desarrollado por GANDULLO (1985) y modificado por DOMINGO *et al.*, (2006) estima la capacidad de retención de agua de cada horizonte por unidad de espesor, teniendo en cuenta tanto el agua retenido en los poros pequeños del suelo, como una parte del agua gravitacional que puede quedar disponible en el suelo a causa de la mayor lentitud de drenaje de horizontes inferiores; la expresión de cálculo es la siguiente:

$$\text{CRAM}(\text{mm}/\text{m}) = \left[12.5 * h_e + 12.5 * (50 - h_e) * c * \frac{k}{2} \right] * \frac{\text{TF}}{100} \quad (13)$$

Donde:

h_e = equivalente de humedad de la tierra fina de ese horizonte.

c = complemento a uno de la pendiente en que se encuentra dicho suelo, expresada está pendiente en tanto por uno ($c = 1 - \%pte/100$).

TF = porcentaje de tierra fina secada al aire de ese horizonte, con respecto a tierra natural.

k = coeficiente que depende del valor de PER de ese horizonte (PER_i), del valor de PER del horizonte inmediato inferior (PER_{i+1}) y de la pendiente del terreno, según se indica más abajo.

El coeficiente k para el horizonte i , que denominaremos k_i tomará siempre el valor 0 para el último horizonte, y en el resto de casos según se indica a continuación:

➤ Si $\text{PER}_i > \text{PER}_{i+1}$

$$k_i = 1 - \alpha_{i+1} - (1 + \alpha_i) * (1 - c) \quad (14)$$

(tal que si la expresión anterior es <0 , $k_i = 0$)

Donde α se obtiene en función de PER, α_i es el valor de α para el horizonte que se analiza y α_{i+1} para el inmediatamente inferior.

➤ Si $\text{PER}_i \leq \text{PER}_{i+1}$ entonces $k_i = 1$

- **Obteniendo altura de agua para cada metro de horizonte (mm/m)**

Se calcula el valor de la capacidad de retención de agua para todo el suelo, sin más que sumar los productos de la CRAM de cada horizonte por sus espesores e_i respectivos medidos en metros.

$$\text{CRAM}_{\text{SUELO}}(\text{mm}) = \sum_{i=1}^{\text{n}^{\circ}\text{horizontes}} \text{CRAM}_i * e_i \quad (15)$$

IV. RESULTADOS

4.1. Características del suelo para la estimación de la CRA

En la Figura 13 se muestra la textura o distribución proporcional de arcilla, limo y arena en los horizontes del perfil del suelo, con mayor presencia de arena seguido de limo y finalmente arcilla en toda la cuenca Challana (Ver Anexo 7).

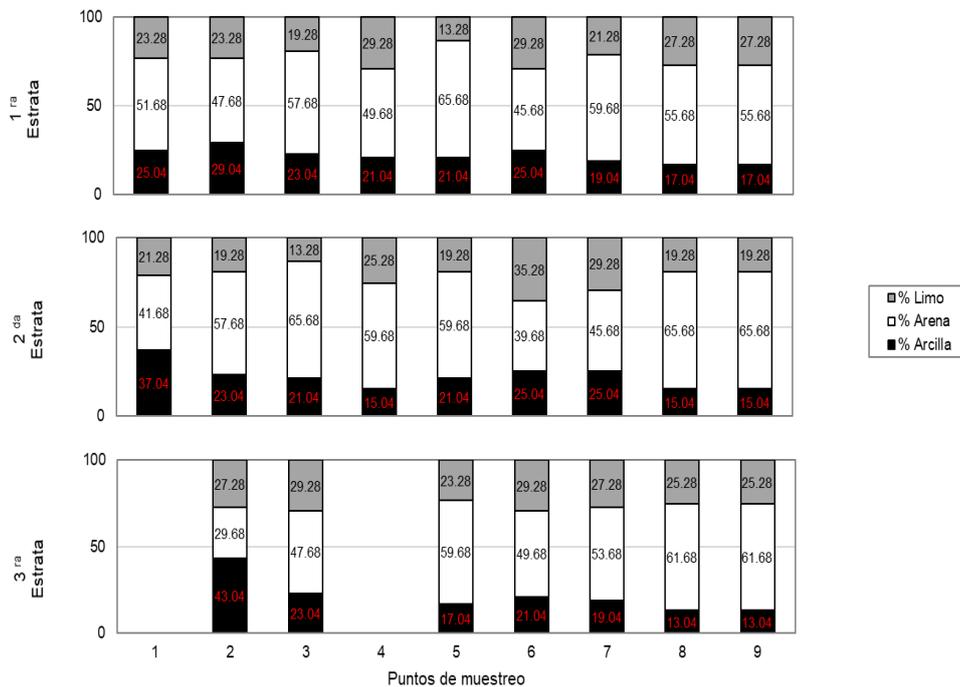


Figura 13. Proporción de arcilla, arena y limo, para los diferentes estratos en los diferentes puntos de muestreo (zona en blanco son aquellos suelos que no poseen el tercer horizonte).

En el Cuadro 3 determinamos que la distribución de las texturas de los suelos en base a la profundidad de las 9 calicatas conformada de 25 horizontes, predominan la clase textural franco arcilloso arenoso (FArAo), franco arenoso (FAo), franco (F), franco arcilloso (Fa) y arcilloso (Ar), según se observa en la estratigrafía del suelo Figura 13.

Cuadro 3. Características del suelo por cada horizonte analizado

Muestras	%Ao	%Lmo	%Ar	MO %	Textura
MS-01-1	51.68	23.28	25.04	6.38	franco arcillo arenoso
MS-01-2	41.68	21.28	37.04	2.02	Franco Arcilloso
MS-02-1	47.68	23.28	29.04	6.72	franco arcillo arenoso
MS-02-2	57.68	19.28	23.04	1.68	franco arcillo arenoso
MS-02-3	29.68	27.28	43.04	1.01	Arcilloso
MS-03-1	57.68	19.28	23.04	4.77	franco arcillo arenoso
MS-03-2	65.68	13.28	21.04	4.55	franco arcillo arenoso
MS-03-3	47.68	29.28	23.04	5.63	franco
MS-04-1	49.68	29.28	21.04	6.05	Franco
MS-04-2	59.68	25.28	15.04	4.70	franco arenoso
MS-05-1	65.68	13.28	21.04	6.15	franco arcillo arenoso
MS-05-2	59.68	19.28	21.04	6.07	franco arcillo arenoso
MS-05-3	59.68	23.28	17.04	4.15	franco arenoso
MS-06-1	45.68	29.28	25.04	4.77	franco
MS-06-2	39.68	35.28	25.04	4.33	franco
MS-06-3	49.68	29.28	21.04	2.44	franco
MS-07-1	59.68	21.28	19.04	4.15	franco arenoso
MS-07-2	45.68	29.28	25.04	4.77	franco
MS-07-3	53.68	27.28	19.04	2.44	franco arenoso
MS-08-1	55.68	27.28	17.04	5.37	franco arenoso
MS-08-2	65.68	19.28	15.04	4.37	franco arenoso
MS-08-3	61.68	25.28	13.04	1.34	franco arenoso
MS-09-1	55.68	27.28	17.04	4.85	franco arenoso
MS-09-2	65.68	19.28	15.04	4.77	franco arenoso
MS-09-3	61.68	25.28	13.04	4.48	franco arenoso

El Cuadro 4 se muestra las medidas de tendencia central para las tres clases granulométricas (arcilla, limo y arena) y el contenido de MO. Todas las propiedades determinadas tienen una distribución sesgada, excepto el contenido en limo coincidiendo la media, mediana y moda. Sobre todo, la distribución de la arcilla muestra un sesgo no tan significativo esto se debe a la ocurrencia de algunos valores elevados.

Cuadro 4. Medidas de tendencia central de algunas propiedades edafológicas, para los 25 horizontes de la cuenca Challana, obtenidas de los análisis en laboratorio.

(%)	m	med	s	s ²	min	max	sesgo	curt
arcilla	21.8	21.0	6.9	48.3	13.0	43.0	1.50	3.06
limo	24.1	25.3	5.3	28.0	13.3	35.3	-0.27	-0.01
arena	54.2	55.7	9.2	84.8	29.7	65.7	-0.81	0.48
MO	4.3	4.7	1.6	2.6	1.0	6.7	-0.68	-0.40

4.2. Precipitación, evapotranspiración y escorrentía

4.2.1. Precipitación acumulada mensual

En el Cuadro 5 las precipitaciones medias máximas de la cuenca Challana que se generan en los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo en un rango de 183.6 a 339.6 mm seguido de septiembre, octubre, y diciembre con 198.6 mm, 239.2 mm y 270 mm, siendo los meses con mayor precipitación para las dos estaciones. Los meses de junio, julio, agosto y noviembre son precipitaciones bajas de 90.4 mm a 113.86 mm definiendo periodos secos o baja lluvia. La precipitación acumulada de la cuenca Challana es de 2350.86 mm, caracterizando la zona como lugar húmedo y lluvioso.

Cuadro 5. Datos de precipitación media mensual de la estación Challana y estación Carpish.

Meses	Precipitación (mm)	
	Carpish-SENAMHI	Challana (Automática)
sep-14	191.1	198.6
oct-14	232.2	239.2
nov-14	127	97.2
dic-14	238.9	270
ene-15	280.7	339.6
feb-15	232.5	183.6
mar-15	297.5	259.2
abr-15	250.3	301.1
may-15	210.3	212
jun-15	44.9	90.4
jul-15	43.6	46.1
ago-15	58.9	113.86
Total	2207.9	2350.86

En el Cuadro 6 se presenta la estadística descriptiva de los registros de precipitación de la estación Challana comparando o validando sus datos con la estación Carpish que pertenece a SENAMHI, durante el periodo de estudio. La mediana, así como el error típico presenta una diferencia entre estaciones de 16 y 0.01 %, respectivamente las cuales son muy parecidas, esto es debido a que la estación (Carpish) para validar los datos está a 200 -400 metros de la estación Challana. Las medidas de dispersión entre las estaciones, presentaron una máxima diferencia en la varianza de 1.45 %, lo cual es aceptable para ingeniería siendo menor al 5%. Por otra parte, la estación Carpish presentó menor niveles de desviación estándar, varianza y precipitación máxima, con respecto a la estación Challana. La precipitación acumulada presentó una diferencia de 142.96 mm con respecto a la estación Carpish.

Cuadro 6. Medidas de tendencia central de los valores de precipitación colectados por las estaciones Challana y Carpish.

Estadístico	Challana	Carpish
Media	195.91	183.99
Error típico	4.83	4.81
Mediana	205.3	221.25
Desviación estándar	92.22	91.96
Varianza	256.30	254.85
Rango	293.5	253.9
Mínimo	46.1	43.6
Máximo	339.6	297.5
Suma (Precipitación acumulada)	2350.86	2207.9
Registros	365	365

En la Figura 14 observamos el comportamiento de la precipitación en las estaciones Challana y Carpish en donde se presenta correlación de 98.5 %, a largo del periodo de análisis, siendo las máximas para ambas estaciones en enero, abril y las mínimas en noviembre y julio, respectivamente.

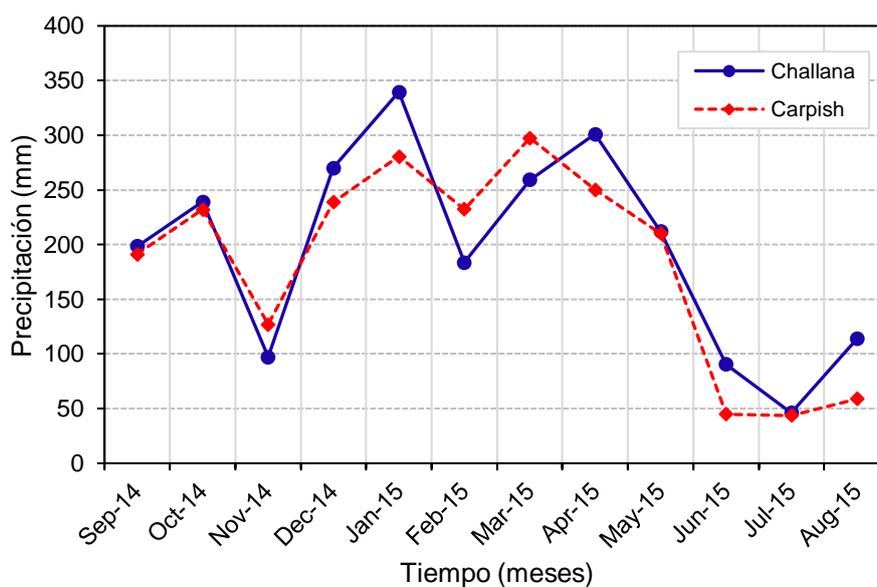


Figura 14. Variación de la precipitación en el año hidrológico de la cuenca Challana y la estación Carpish para validar los datos.

4.2.2. Evapotranspiración de MODIS 16 A2 y estación Challana

En la Cuadro 7 solo nos enfocamos en los datos MODIS donde se observa en los meses de septiembre, octubre, mayo, junio, julio y agosto para MODIS la evapotranspiración real es mayor en rango de 90.85 a 110.92 mm, presentando mayor consumo de agua y evaporación, y en los demás meses la evapotranspiración real no es muy alta, siendo menor el mes de Abril 63.51 mm, esto es debido a que la zona entra en estación de invierno en esos meses, donde la radiación es baja y concentración de nubes alta, y también por la ubicación de la cuenca. Ver Anexo 6 cuadro completo cada 8 días de datos MODIS.

Cuadro 7. Evapotranspiración real obtenida de las imágenes MODIS 16 A2 y datos de la estación Challana durante el periodo setiembre del 2014 - agosto del 2015.

Evapotranspiración (mm)		
Meses	Est. Challana	MODIS 16A2
sep-14	113.3	110.92
oct-14	94.84	91.57
nov-14	86.92	68.49
dic-14	73.59	66.66
ene-15	81.29	74.29
feb-15	67.018	66.06
mar-15	77.71	66.46
abr-15	77.29	63.51
may-15	75.58	90.85
jun-15	86.45	97.82
jul-15	102.62	102.97
ago-15	108.27	109.01
promedio anual	1044.9	1008.62

En el Cuadro 8 al realizar la prueba de confianza al 95 %, se determinó que P valor es mayor que 0.05 por lo que establecemos que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medidas de los registros de la estación Challana y de MODIS 16 A2.

Cuadro 8. Prueba de "t de student" para la muestra suponiendo varianzas iguales.

Variables	Challana	Modis 16A2
Media	87.0731667	84.0515452
Grados de libertad	22	
Estadístico t	0.445854	
P (T<=t) dos colas	0.66005968	P>0.05
Valor crítico de t (dos colas)	2.07387307	

En la Figura 15 se puede observar que la evapotranspiración obtenida de las imágenes MODIS 16 A2 son similares a la estación Challana presentando comportamientos parecidos durante el periodo de análisis, donde se presenta máximas el mes noviembre con 110.92 y 113.3 mm seguido de agosto con 108.27 y 109.01 mm siendo la mínima para ambas estaciones el mes de febrero con 67.018 y 66.06 mm. El Cuadro 7 muestra que la ETr anual de MODIS es de 1008.62 mm y 1044.9 mm, con una diferencia entre ambas de 36.28 mm, representando 3.4 % de error.

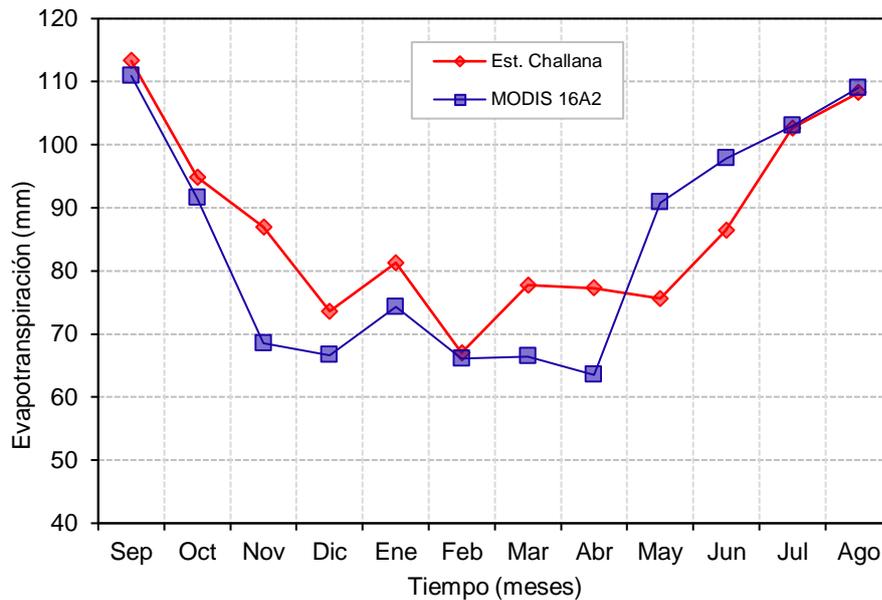


Figura 15. Comportamiento de la evapotranspiración real de los datos MODIS 16 A2 vs la de la Estación Challana

4.2.3. Escorrentía media mensual

En el Cuadro 9 la escorrentía media máxima de la cuenca de estudio es de 215.37 mm para el mes de abril representando un caudal de 75.11 lt/s registrado por la estación de aforo del nivel de agua, y posteriormente se presenta otra escorrentía máxima de 212.31 mm para el mes de enero generando un caudal de 71.66 lt/s y para el mes de agosto se generó una escorrentía mínima de 39.43 mm con un caudal de 13.31 lt/s siendo la más baja de todos los meses ya que la zona entra en la estación de verano donde baja la precipitación disminuyendo la escorrentía. La cuenca challana llegó a registrar una escorrentía media anual de 1463.43 mm.

Cuadro 9. Datos estimados de escorrentía de la cuenca Challana durante el periodo septiembre 2014 - agosto del 2015.

Meses	Est. Q (lt/s)	Q (m ³ /mes)	E (m)	E (mm)
Sep	16.80	43545.60	0.05	48.17
Oct	32.71	87612.94	0.10	96.92
Nov	17.81	46164.96	0.05	51.07
Dic	45.42	121645.19	0.13	134.56
Ene	71.66	191930.16	0.21	212.31
Feb	71.79	173681.44	0.19	192.13
mar	57.35	153614.67	0.17	169.93
Abr	75.11	194693.17	0.22	215.37
may	59.10	158300.51	0.18	175.11
Jun	28.37	73525.04	0.08	81.33
Jul	15.90	42581.26	0.05	47.10
Ago	13.31	35648.50	0.04	39.43

Los meses con mayor escorrentía que se genera son: diciembre, enero, febrero, marzo, abril y mayo durante la época de invierno ya que en estas condiciones se producen altas precipitaciones en la cuenca, mientras que en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y agosto se presentan escorrentías bajas debido a las estaciones de verano, primavera, y otoño por lo que disminuye la precipitación, época en la cual los suelos no están saturados por lo que una parte de la de la lluvia se infiltra y la otra parte pasa a ser escorrentía como se muestra en la Figura 16.

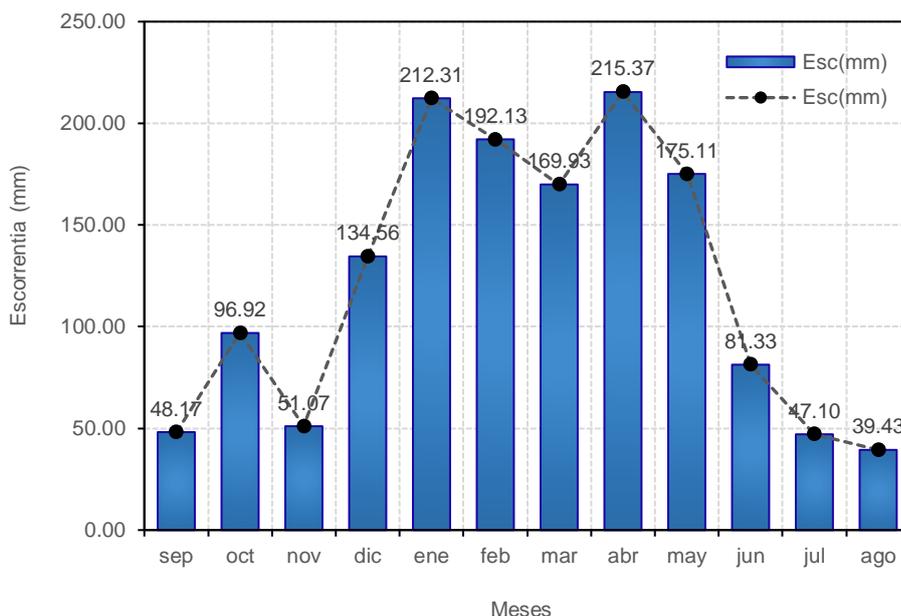


Figura 16. Resultados de la escorrentía media mensual en la cuenca Challana de un año de estudio desde septiembre 2014 - agosto del 2015

4.3. Balance hídrico de la cuenca

En el Cuadro 10 se presenta el balance de agua de la cuenca Challana de un año desde septiembre 2014 a agosto del 2015 en la Figura 18 se muestra de una manera simple lo que sucede con el agua captada por la cuenca a través de la precipitación (PP) y de cómo es distribuida en forma de escurrimiento (Q), evapotranspiración real (ET_r), infiltración (I) y almacenamiento de agua en el suelo.

Los valores negativos de infiltración (I) que se dan en los meses de noviembre, febrero, mayo, junio, julio y agosto se explican que son temporadas donde la lluvia es mínima (mayo a agosto), mientras que noviembre y febrero son meses en los cuales se aprecia que la precipitación de los meses

precedentes fueron bajas; lo que indica que el suelo y otros aportes subsuperficiales de agua se constituyen en los proveedores hídricos para que se produzcan tanto caudal (Q) como Evapotranspiración (ETr), generando como resultado la capacidad de infiltración anual mediante el balance de -121.19 mm, que es compensada por la Capacidad de Retención del Suelo.

Cuadro 10. Datos de estimación para las áreas de captación de la cuenca Challana: P (precipitación), ETr (evapotranspiración real), Q (gasto) y el diferencial $I = P - (ETr + Q)$.

Meses	P (Estación) mm	ETr mm	Q mm	I mm
Sep	198.6	110.92	48.17	39.51
Oct	239.2	91.57	96.92	50.71
Nov	97.2	68.49	51.07	-22.36
Dic	270	66.66	134.56	68.78
Ene	339.6	74.29	212.31	53.00
Feb	183.6	66.06	192.13	-74.59
Mar	259.2	66.46	169.93	22.82
Abr	301.1	63.51	215.37	22.22
May	212	90.85	175.11	-53.96
Jun	90.4	97.82	81.33	-88.76
Jul	46.1	102.97	47.10	-103.98
Ago	113.86	109.01	39.43	-34.59
Total	2350.86	1008.62	1463.43	-121.19

En el Cuadro 11 la sumatoria total de la infiltración (I) resultante negativa (-), indica que se altera la CRA (ΔW) de los suelos de la cuenca, cubriendo las necesidades de agua para que los niveles de Q y ETr sean superiores a los estimados en algunos periodos de alta precipitación.

Cuadro 11. Balance hídrico anual de la cuenca Challana.

Challana	Σ	%
P (km ³)	0.002125	100.00
ET (km ³)	0.000912	42.90
Q (km ³)	0.001323	62.25
I (km ³)	-0.000110	-5.16

En la Figura 17 también se puede observar que el Q como ETr siguen un comportamiento semejante a la P, es decir que la lluvia se manifiesta rápidamente generando escorrentía e infiltración. Esto es un comportamiento común en regiones con pendientes pronunciadas en las cuales el flujo superficial por gravedad se manifiesta preponderantemente.

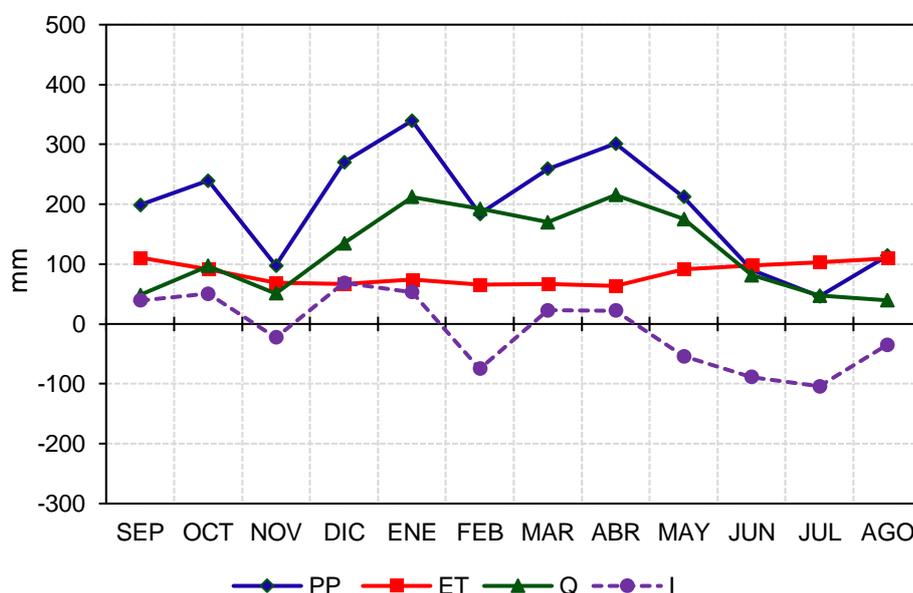


Figura 17. Acumuladas mensuales para el área de captación de la cuenca Challana. Precipitación (P), evapotranspiración real (ETr), Gasto de agua (Q) y la diferencia (P-(ETr+Q)) de un año de análisis septiembre 2014 - agosto 2015.

4.4. Capacidad de retención de agua (CRA)

Como se puede observar en el Cuadro 12 la cuenca Challana tiene una capacidad de retención promedio de 125.521 mm representando el 5.34 % de la precipitación, con 113470.08 m³ de capacidad total de retención de agua de la cuenca. La zona de estudio presenta diferentes capacidades de retención según la cobertura, tipo de suelo y pendiente, donde las partes altas o cabecera de cuenca con cobertura boscosa poseen una capacidad de retención de 144.995 mm, 177.202mm, 123.143mm, para MS09, MS04 y MS08 respectivamente con suelos francos y francos arenosos para pendientes de 25 – 75 %, y las coberturas de purmas en la parte alta, el MS07 tiene una CRA de 171.127 mm para el mismo tipo de suelos que la zona boscosa con pendiente 12 – 25 %. Así mismo en la cuenca se presentan coberturas de pastos como son las muestras MS06 que tienen una CRA de 62.169 mm para suelos francos con pendientes de 25 – 50 % y el MS02 con una CRA de 128.994 mm en suelos franco arcilloso y arcilloso para pendiente de 5-12%, donde observamos claramente que las coberturas de pastos por más que tienen un buen suelo y una pendiente adecuada o baja no tiene buena capacidad de retención. Mientras que para zonas boscosas MS05 tiene una CRA de 73.224 mm para pendientes de 50 – 75 % con suelos franco arcillo arenosos y franco arenosos, donde apreciamos que las coberturas boscosas y purmas tienen mayor capacidad de retención de agua que los pastos en cualquier condición de suelo y pendiente.

Cuadro 12. Capacidad de retención de agua de la cuenca Challana en diferentes puntos de muestreo (Ver Anexo 6).

Calicatas	CRA de todo el perfil (mm)	Suelos según el horizonte	Cobertura	Pendientes (%)
MS-01	109.197	FArAo FAr	Zonas de purmas	25 - 50 % ligeramente escarpada
MS-02	128.994	FAr FAr Ar	Zonas de pastizales	5 - 12 % moderadamente inclinada
MS-03	139.634	FArAo FArAo F	Zonas de pastizales con purmas	50 -75 % moderadamente escarpada
MS-04	177.202	F FAo	Zonas boscosas	50 -75 % moderadamente escarpada
MS-05	73.224	FArAo FArAo FAo	Zonas boscosas	50 -75 % moderadamente escarpada
MS-06	62.169	F F F	Zonas de pastos	25 - 50 % ligeramente escarpada
MS-07	171.127	FAo F FAo	Zonas de purmas	12-25 % fuertemente inclinada u ondulada
MS-08	123.143	FAo FAo FAo	Zonas boscosas	25 - 50 % ligeramente escarpada
MS-09	144.995	FAo FAo FAo	zonas boscosas	25 - 50 % ligeramente escarpada
Promedio	125.521			

V. DISCUSIÓN

EL contenido de partículas en la clase textural del perfil y extensión del suelo de la cuenca Challana, se caracterizan: del tipo Franco arenoso (FAo), Franco Arcillo Arenoso (FArAo) y Franco (F) de buena permeabilidad, retención de agua y nutrientes. Asimismo, VIDAL (1997), menciona que la proporción respecto del total en que se encuentran estas partículas determinan la textura, característica que se asocia a la capacidad de retención, velocidad de infiltración, curva característica de desorción y conductividad hidráulica. En la cuenca se encontró 43.04% de arcilla para el tercer horizonte en cobertura de pasto y pendiente moderadamente inclinada, este suelo retiene mayor cantidad de agua y gran parte de ella es retenida con mucho trabajo y no está disponible para las plantas. USDA (2009) indica que un contenido de arcilla mayor o igual a 40% impide el movimiento y redistribución del agua en el suelo

La precipitación como la evapotranspiración real y escurrimiento observados en un año, a partir de setiembre 2014 hasta agosto 2015, corresponden con el régimen pluviométrico del país y la zona de vida bosque pluvial – montano bajo tropical bp -MBT de clima cálido y húmedo según UNESCO (2006) y ONERN (1976), acentuado los cinco primeros meses como un periodo húmedo y tres meses del medio año un periodo seco.

La precipitación anual de 2350.86 mm concuerda con el promedio multianual de 2060.8 mm de la vertiente del Atlántico (UNESCO, 2006), aún si la estación automática de Challana no incluye el registro del agua directamente en la vegetación proveniente del rocío y neblina del lugar

Particularmente, durante el periodo de estudio, la evapotranspiración acumulada mensual de cada 8 días, medidos con imágenes MODIS tiene buena correlación con los datos de registro de la estación Challana, donde no se presenta diferencia estadísticamente significativa al 95 %. Asimismo, CLEUGH *et al.*, (2007), menciona que las acumuladas de 8 o 16 días de imágenes MODIS, generan mapas de evapotranspiración con alta correlación con los datos medidos por la estación climatológica de la red FLUXNET.

La lámina de agua evapotranspirada de la cuenca ascendió a 1008.62 mm durante un año, observación característica de la cuenca Amazónica (UNESCO, 2006) con mayor consumo de agua por la vegetación durante los meses de setiembre, octubre, mayo, junio, julio y agosto cuando se presenta mayor radiación solar, mientras lo contrario sucede en los meses de enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre, época con mayor concentración de nubes y poca radiación. Esto demostró que las condiciones de la Cuenca Challana son similares y corresponden a la zona de vida del territorio amazónico, 42.9 % en promedio global, el 57% de la precipitación anual es devuelta a la atmosfera por evapotranspiración (SANCHEZ y TORIBIO, 1992).

La lámina de agua anual de la cuenca de estudio es 1463.43 mm valor observado y comprende a las vertientes del Atlántico entre 0 mm y 3850 mm, alcanzando un promedio multianual de 1742.00 mm (UNESCO, 2006).

El escurrimiento en la cuenca Challana en virtud del factor climático y físico (suelo y cobertura vegetal) interactúa para presentarse en los meses de junio, julio, agosto y septiembre por bajas de la precipitación y altas evapotranspiración real con mayor demanda de agua por el suelo y la cobertura vegetal; compensadas por el contenido de humedad del suelo, esta condición hidrológica de un sitio se refleja por la tasa de infiltración y la erosión entre canalillos que integran estos factores de suelo y vegetación (SERNA *et al*, 2002), sin embargo otros autores como LÓPEZ Y MINTEGUI (1986), mencionan que autores como Molchanov en Tellerman, Brasov en Kamennaya y Agapova en Derkul, demostraron que la escorrentía superficial en terrenos forestales podría representar el 1 % de la precipitación total anual, mientras que, en terrenos agrícolas análogos, podría ser del orden del 30 % de la precipitación, y en terrenos no cultivados, del orden del 50 %. Es decir, los cambios de cobertura perturban la oportunidad de almacenamiento de agua infiltrada en el suelo como la facilidad de fluir superficialmente.

En la cuenca Challana el Q como ETr siguen un comportamiento semejante a la P, es decir que la lluvia se manifiesta rápidamente generando escorrentía e infiltración común en zonas con pendientes pronunciadas, características también observadas en la cuenca Boca Cerro donde el flujo por gravedad se manifiesta preponderantemente ROSALES (2012).

Los valores negativos de infiltración (I), durante los meses de noviembre, febrero, mayo, junio, julio y agosto explican que son temporadas de menor lluvia para los cuatro últimos, y de baja precipitación en los meses precedentes a los dos meses mencionados (noviembre y febrero), valores compensados por la CRA del suelo o ΔW como proveedor hídrico del escurrimiento (Q) y la ETr. Según ROSALES (2012), indica que en la cuenca de Boca del Cerro se observan valores negativos de infiltración (I) principalmente en las épocas secas lo que indica que el suelo y otros aportes subsuperficiales de agua se constituyen en los proveedores hídricos para que se presente tanto Q como ETr. El mismo autor indica que en las cuencas San Pedro y Boca de Cerro se observa que en la temporada de secas, la infiltración (I) tiende a cero por la poca precipitación ocurrida en esa temporada, mientras que los gastos de agua (Q) tienden a ser superiores a la precipitación en comparación con la época de lluvias, y que la evapotranspiración real (ETr) tiende a incrementarse y rebasar los niveles de escurrimientos y los de precipitación, dichos niveles de ETr se invierten durante el periodo de lluvias, pero permanecen casi constantes a lo largo de todos los periodos analizados. Este hecho nos lleva concluir que durante los meses de poca precipitación o temporada de secas es ΔW quien aporta el agua suficiente para que los niveles de Q y ETr sean superiores a los estimados en los periodos de alta precipitación. Asimismo, LEIVA (2012), indica que la demanda de humedad por parte de la vegetación, para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo (ETc), conlleva a evaluar la disponibilidad de agua en el suelo. Cuando la ETc excede a la precipitación, la demanda de agua se satisface en parte por la precipitación y/o riego y en parte

mediante la utilización de humedad del suelo (almacenamiento). Si, al contrario, la precipitación excede la ETc el resultado es una recarga de humedad en el suelo, y cualquier exceso se convierte en superávit, que se pierde como drenaje al subsuelo o como escorrentía o es retenido por el suelo.

La capacidad de retención de agua CRA es una de las principales propiedades de las clases texturales de suelo identificadas en la cuenca Challana de acuerdo con el tipo de cobertura vegetal y pendiente de terreno. Según POULENARD *et al.*, 2001; BUYTAERT *et al.*, 2007; CAMARGO *et al.*, 2012 Y MORENO, 2012, actúan particularmente alimentando las aguas subterráneas y nacientes de los ríos, variando su contenido y posibilidad de drenaje interno debido al cambios de uso del suelo BUYTAERT *et al.*, 2006. La zona de estudio presento una CRA de 125.521 mm y representa el 5.34% de la precipitación, dispuestas en las cabeceras de cuenca de cobertura boscosa de 73.224 mm a 177.202 mm en suelos franco y franco arenoso de 50 -75 % en pendiente, de 123.143 mm a 144.995 mm en suelos franco arenoso de 25 -50% en pendiente; purmas de 171.127 mm suelos franco y franco arenoso de 12-25% en pendiente y, de 109.197 mm a 139.634 mm en suelos franco, franco arcillo arenoso y franco arcilloso de 25 -50% y 50 -75% en pendiente, reduciéndose en pastos de 62.169 mm a 128.99 mm en suelos franco y franco arcilloso de 25-50% y 5-12% en pendiente.

De acuerdo con la ONERN (1976) y OTAYA *et al.*, 2008, la CRA de Challana representa un 5.34% (125.521 mm) de la precipitación anual

observada, para una zona de vida bosque pluvial montano bajo tropical con capacidad de máxima de almacenamiento de agua hasta del 7.5% (176.31) de la precipitación total anual. Esta diferencia distingue una variación de 2.16 % (50.789 mm) a efectos del cambio en el uso de suelo por pastos y purmas como las actividades agropecuarias que se desarrollan en el lugar, con impactos a las propiedades físicas del suelo DAZA *et al.*, (2014), baja densidad aparente y porosidad elevada BUYTAERT *et al.*, (2006), disminuyendo la máxima cantidad de agua almacenada en el suelo según la profundidad radicular, pendiente del terreno y la disponibilidad de agua LEIVA (2012).

VI. CONCLUSIONES

1. Los suelos de la cuenca Challana, con mayor predominio en el espacio, corresponde a la clase textural franco arcillo arenoso (FArAo), franco arenoso (FAo), franco (F), franco arcilloso (FAr) y Arcilloso (Ar), con características de baja permeabilidad y buena retención de agua y nutrientes, siendo relacionadas con la materia orgánica, a un valor mayor aumenta el agua retenida en el suelo.
2. Durante el periodo de evaluación setiembre 2014 a agosto 2015, se observó 2350.86 mm de precipitación en el aporte y un retiro de 1008.62 mm en evapotranspiración real y 1463.43 mm en escurrimiento superficial de la cuenca. La mayor cantidad de precipitación y escorrentía observada durante el año, se distribuye los meses de: diciembre, enero, febrero, marzo, abril y mayo (periodos húmedos), mientras de menor cuantía se presentó los meses de: junio, julio, agosto y setiembre (periodo seco) donde la evapotranspiración es mayor.
3. El balance de agua en la cuenca Challana desde setiembre del 2014 a agosto del 2015 demuestra la relación entre la precipitación con la evapotranspiración y la escorrentía generada por el sistema hidrológico. La lámina de agua infiltrada asciende a -121.19 mm /año indicando que el almacenamiento de

agua en el suelo (ΔW) es quien aporta el agua suficiente para que los niveles de escorrentía (Q) y evapotranspiración (E_{Tr}) sean superiores durante los meses de poca precipitación o temporadas secas.

4. La CRA de la cuenca Challana asciende a 125.521 mm (5.34 % de la precipitación), según su cobertura vegetal, boscosas con suelos franco, franco arenoso y pendientes del 25 – 75 %, la CRA en la parte alta (cabecera de cuenca) posee 144.995 mm, 177.202 mm y 123.143 mm, mientras coberturas de purmas de igual clase textural con pendientes de 12 – 25 % posee 171.127 mm. Asimismo, la cobertura de pasto con suelos franco y pendientes 25 – 30 % posee una CRA de 62.169 mm y en suelos franco arcillosos y arcillosos con pendiente de 5- 12 % presenta una CRA de 128.994 mm, de igual manera coberturas boscosas con suelos franco arcillo arenoso y franco arenoso y pendiente de 50 – 75 % presenta CRA de 73.224 mm. La cuenca posee una capacidad total en volumen de 113470.08 m³.
5. La CRA ha disminuido por el cambio en el uso de suelo (agrícola) generando efectos desfavorables al escurrimiento.

VII. RECOMENDACIONES

1. Aumentar la distribución de las estaciones pluviométricas en la cuenca en base a las elevaciones y espacio para cuantificar la altura presente en lo posible en toda la cuenca.
2. Utilizar las observaciones de evapotranspiración real cada 8 días de la imagen satélite MODIS 16 A2, permitiendo contar con imágenes que se encuentren en óptimas condiciones (libres de nubes). Y también por que mide por encima de la cobertura vegetal y de diferentes espacios o superficies, permitiendo seguir el fenómeno durante todo el periodo de estudio, y de esta forma realizar un mejor análisis en la toma de decisiones a la hora de optimizar el recurso hídrico.
3. Las observaciones de las descargas de la quebrada Challana se debe realizar mediante un aforador de infraestructura hidráulica fija construida de concreto y sección prismática estable.
4. El muestreo de suelos debe ser en mayor número respecto al tipo de cobertura vegetales y pendientes en común para asegurar una medida entre los límites presentes de la capacidad de retención de agua.

5. Establecer un estricto control de calidad en los datos meteorológicos utilizados.
6. Realizar temas de investigación que permitan valorar la capacidad de retención de agua en unidades donde haya actividades antrópicas de potencial impacto.
7. La monitorización de las variables climáticas, hidrométrica y físicas del suelo para este tipo de investigación deberán prolongarse para mayores tiempos, a fin de analizar la variabilidad de las mismas respecto al clima con la variación de la capacidad de retención de agua y el balance hídrico.
8. Difundir el cambio descendente de la capacidad de retención de agua debido a la alteración de uso de suelos bosque por agrícola, a la población y comunidad involucrada en el uso y administración del recurso hídrico en general, a fin de tomar las medidas de mitigación tendientes a su reversión.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABTEW, W., & MELESSE, A. (2013). Evaporation and Evapotranspiration Measurement. Springer, 17(1), pp: 29-42.

ACEVEDO, C., ORTEGA, S., y PABLO, V. 2009. Estudio Alcance de la agricultura de precisión en Chile : estado del arte , ámbito de aplicación y perspectivas Informe de resultados. Odepa.

ACEVEDO-OPAZO, C., TISSEYRE, B., GUILLAUME, S., y OJEDA, H. 2008. The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status. Precision Agriculture Journal 9, 285-302.

ALEGRIA DE LA CRUZ, M.A. 2017. Estimacion de los caudales medios mensuales en la cuenca Challana – Distrito Chinchao – Huánuco (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú.

ALLEN, R., PEREIRA, L., RAES, D., y SMITH, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje: Roma: FAO Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

- ANDRADE A., E. 2011. Conceptos básicos de los modelos hidrológicos [En Línea]: ([http://civilgeeks.com/2011/09/27/conceptos-basicos-de-los-modelos-hidrologicos/.](http://civilgeeks.com/2011/09/27/conceptos-basicos-de-los-modelos-hidrologicos/)).
- ARREOLA M., A. (s/f). El Manejo Integral de Cuencas: limitaciones de una política sectorial para la gestión territorial del agua. Instituto para el Desarrollo Sustentable en Mesoamérica, A.C. (IDESMAC). 2
- BLANCO, A.A., MARTÍNEZ, R.S., CISNEROS, C.C., 1998. Temas de Ciencia y Tecnología: Un modelo de balance hídrico para cuencas hidrográficas: discusión, propuesta y aplicaciones. [en línea] (www.utm.mx/~temas/temas-docs/e0611.pdf)
- BUYTAERT, W., R. CÉRELLI, B. De BIÈVRE, F. CISNEROS, G. WYSEURE, J. DECKERS y R. HOFSTEDE. 2006. Human impact on the hydrology of the andean páramos. *Earth Science Reviews* 79(1-2): 59-72.
- BUYTAERT, W., IÑIGUEZ AND DE BIÈVRE. 2007. The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management* 251(1-2): 22-30.
- CAMARGO, J.C., DOSSMAN, M.A., RODRÍGUEZ, J.A, ARIAS, L.M., GALVIS, J.H. 2012. Cambios en las propiedades del suelo, posteriores a un incendio en el Parque Nacional Natural de Los Nevados, Colombia. *Acta Agronómica* 61(2): 151-165.

- CLEUGH, H.A., LEUNING, R., QIAOZHEN MU, RUNNING W.S., 2007, Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data, *Remote Sensing of Environment* 106, 285–304.
- DAZA TORRES, M. C., HERNÁNDEZ FLÓREZ, F., TRIANA, F. A. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>
- DOORENBOS, J. 1986. *Las Necesidades de Agua de los Cultivos*. Estudio FAO: Riego y Drenaje. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y el Alimentación: 124 p.
- FAO, 2007, *Cambio climático: ayudar a los más vulnerables*, disponible en internet <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2007/1000724/index.html>, último acceso 16/08/2011.
- GANDULLO J.M., 1985. *Ecología Vegetal*. Fundación Con- de del Valle de Salazar. Madrid. 208 pp.
- GEOINSTITUTOS. (2010). *La cobertura vegetal en la cuenca del canal de panamá*. URL : http://www.geoinstitutos.com/art_03_cober2.asp.
- GUROVICH, L. (1985). *Fundamentos y diseño de sistemas de riego*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José de Costa Rica: 433 p.

- JOHNSON, L.F., BOSCH, D.F., WILLIAMS, D.C., LOBITZ, B.M., 2001. Remote sensing of vineyard management zones: implications for wine quality. *Appl. Eng. Agric.* 17, 557_/560.
- JUELA S., O. L. (2011). Estudio hidrológico y balance hídrico de la cuenca alta del río Catamayo hasta la estación el arenal en el sitio el boquerón, provincia de Loja, 1–120.
- KEMERER, A. 2011. Procedimientos para la delimitación de zonas de manejo mediante imágenes satelitales. 1a. ed. Buenos Aires, Argentina. INTA. 85 p.
- LEIVA GUTIÉRREZ, N. (2012). Metodología para el cálculo de la humedad del suelo usando parámetros topográficos(MDE), climáticos y edáficos en un sector del piedemonte depositacional del municipio de Villavicencio. Universidad Nacional de Colombia. (<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s13312-016-0878-0>).
- LILLESAND T., KIEFER R. 1997. Remote Sensing and Image Interpretation. 3th Edition, John Wiley & Sons Inc., 750 pp.
- LÓPEZ C., F. y MINTEGUI, J.A. 1986. Hidrología de Superficie. Tomo I. Fundación Conde del Valle de Salazar. E.T.S. Ingenieros de Montes. Madrid.

- MONSALVE, S. G. 2002. Hidrología en la ingeniería. Editorial escuela colombiana de ingeniería: Colombia.
- MORENO, C.A. 2012. Efectos de diferentes tipos de vegetación sobre la capacidad de infiltración de agua en suelos de páramo en la reserva privada Palugullo (Ecuador). Tesis de Grado de Licenciatura en Ecología Aplicada al Manejo de Recursos. Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales. Universidad San Francisco de Quito. 23 p.
- MOSCATELLI, G., SOBRAL, R., NAKAMA, V, V., 2005. Nueva tendencia para conocer el estado de los suelos. [En línea]: (<http://www.inta.gov.ar/>,Articulo, 07 Feb. 2015).
- MURILLAS, A., & LONDOÑO, A. E. 2014. Estimación de la evapotranspiración en cultivos de arroz con sensores remotos. Santiago de Cali, 16 de julio 2014.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), 2008. MODIS WEB, URL: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/> (Última fecha de acceso: 5 de septiembre de 2008).
- ONERN (Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales). 1976. Mapa ecológica del Perú. Guía explicativa. Lima. Perú. 274 p.
- ORTEGA, S., CALDERON, R., ACEVEDO, C., FUENTES, S. 2002. Estimación de la Evapotranspiración Real Diaria de un Cultivo de Tomates Usando

la ecuación de Penman-Monteith. Servicio Integrado de Agroclimatología y Riego (SIAR), 2(27): pp.91-96.

ORTIZ, O. 2011. Propuesta de una metodología para la integración de datos de precipitación: caso de estudio la Cuenca Usumacinta, tesis de licenciatura facultad de ingeniería. México: UNAM, en redacción.

OTAYA BURBANO, A. L., VÁSQUEZ VELÁSQUEZ, G. L., Y BUSTAMANTE CARMONA, G. 2008. Estimación de la oferta hídrica con información escasa en ecosistemas estratégicos, 61(1), 4366–4380.

PALOMINO, B. T. 2015. Calidad de los suelos en vegetación en diferentes edades en la localidad de caracol – distrito Chinchao – Huánuco (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú.

POULENARD, J., P. PODWOJEWSKI, J.L. JANEAU y J. COLLINET. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of andisols from the ecuadorian páramo: effect of tillage and burning. *Catena* 45(3): 185-207

RENDON, L. 2003. La cuenca: sistema hidrológico o curso de agua natural. IMTA. Documento electrónico.

ROSALES, E. 2012. Metodología y estimación del balance hídrico de la cuenca del Usumacinta. *Fordecyt-Conacyt-Centrogeo*, 105(137). <https://doi.org/10.1056/NEJM198010233031707>.

- RUNNING, S.W., JUSTICE, C.O., SALOMONSON, V.V., HALL, D., BARKER., J., KAUFMAN, Y.J., STRAHLER, A.H., HUETE, A.R., MULLER, J.P., VANDERBIT, V., WAN, Z.M., TEILLET, P., CARNEGGIE, D., 1994. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 15(17):427-439p.
- RUNNING, S. W., MU, Q., ZHAO, M., MORENO, A. (2017). User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm. Retrieved from https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/product_documentation/mod16_v6_user_guide.pdf
- SADEH, E. 2002. A failure of international space cooperation: the International Earth Observing System. *Space Policy*: 18(2):135-150p.
- SANCHEZ - TORIBIO, M. I. 1992. Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Geofoma Ediciones, 35 pp.
- SANTOS, J. D., VILLARÁN, R. F., PROVENS,. P., ARRARÁS, R. (2006). Estimación de la capacidad de retención de agua en el suelo : revisión del parámetro CRA, *15*, 14–23.
- SERNA P., A., & ECHAVARRIA Ch., F. (2002). Caracterización hidrológica en un agostadero comunal excluido al pastoreo en Zacatecas , México .

Hydrological characterization of a communal rangeland excluded from cattle grazing at Zacatecas , Mexico ., 40(1), 55–69.

UNESCO. 1971. Scientific framework of world wáter balance. Technical papers in hydrology. No. 7. Paris, Francia. 27p.

UNESCO. 1981. Método de cálculo del balance hídrico. París, Francia. 191 pág.

UNESCO. 2006. Balance hídrico superficial del Perú a nivel multianual. Documento técnico del PHI – LAC N°1. Montevideo, Uruguay. Impreso en los talleres graphinet. 137 p.

USDA. 2009. Soil Taxonomic. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. U.S. of Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 2° ed. Washington D.C. 871p.

VÁSQUEZ. 2000. Hidrología aplicada. Madrid - España.

VIDAL. I. 1997. Naturaleza y propiedades del suelo. Manual de Prácticas. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Dpto de Suelos. Chillán, Chile.

WALSH PERÚ S.A. 2010. Modificaciones de Estudios de Impacto Ambiental del proyecto central hidroeléctrica Chaglla. Volumen I EIA. Lima, Perú.

XIONG J., 2008. MCST Calibration Information, URL: <http://www.mcst.ssai.biz/mcstweb/calib/calibration.html> (Última fecha de acceso: 28-de septiembre de 2008).

ANEXOS

Anexo 1. Mapas

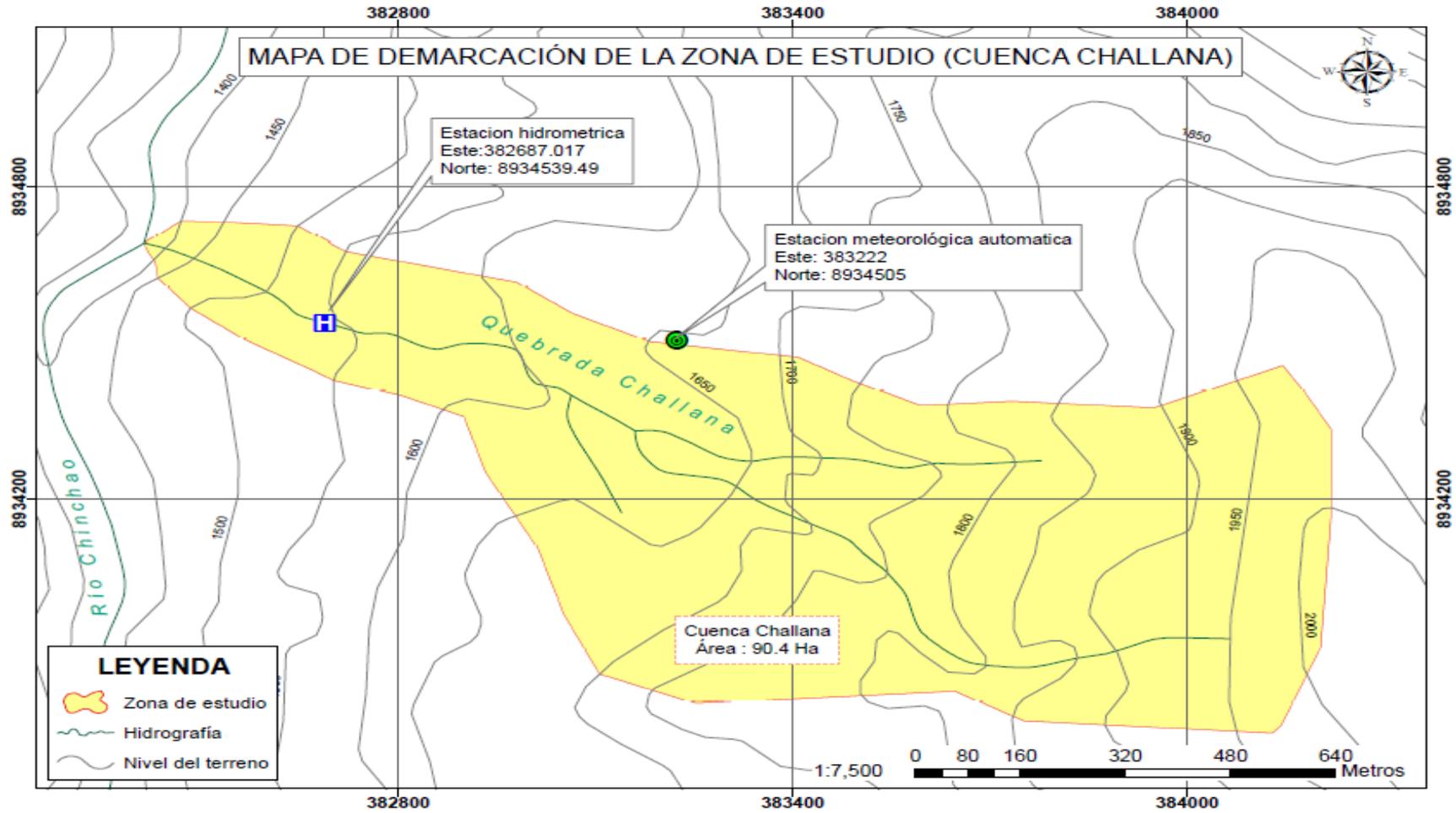


Figura 18. Zona de estudio y ubicación de las estaciones de medición

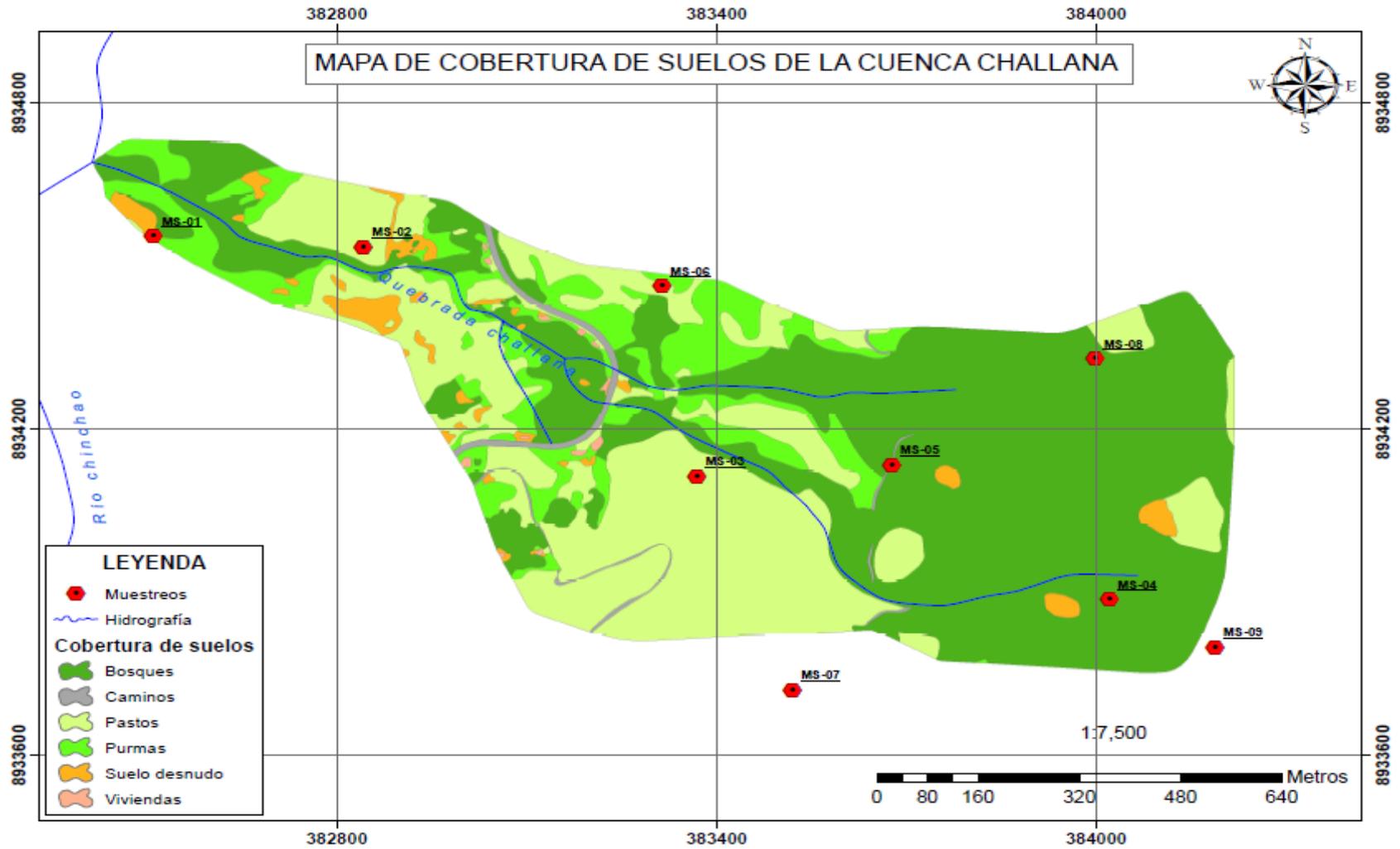


Figura 19. Mapa de clasificación de suelos y ubicación de calicatas de la cuenca Challana

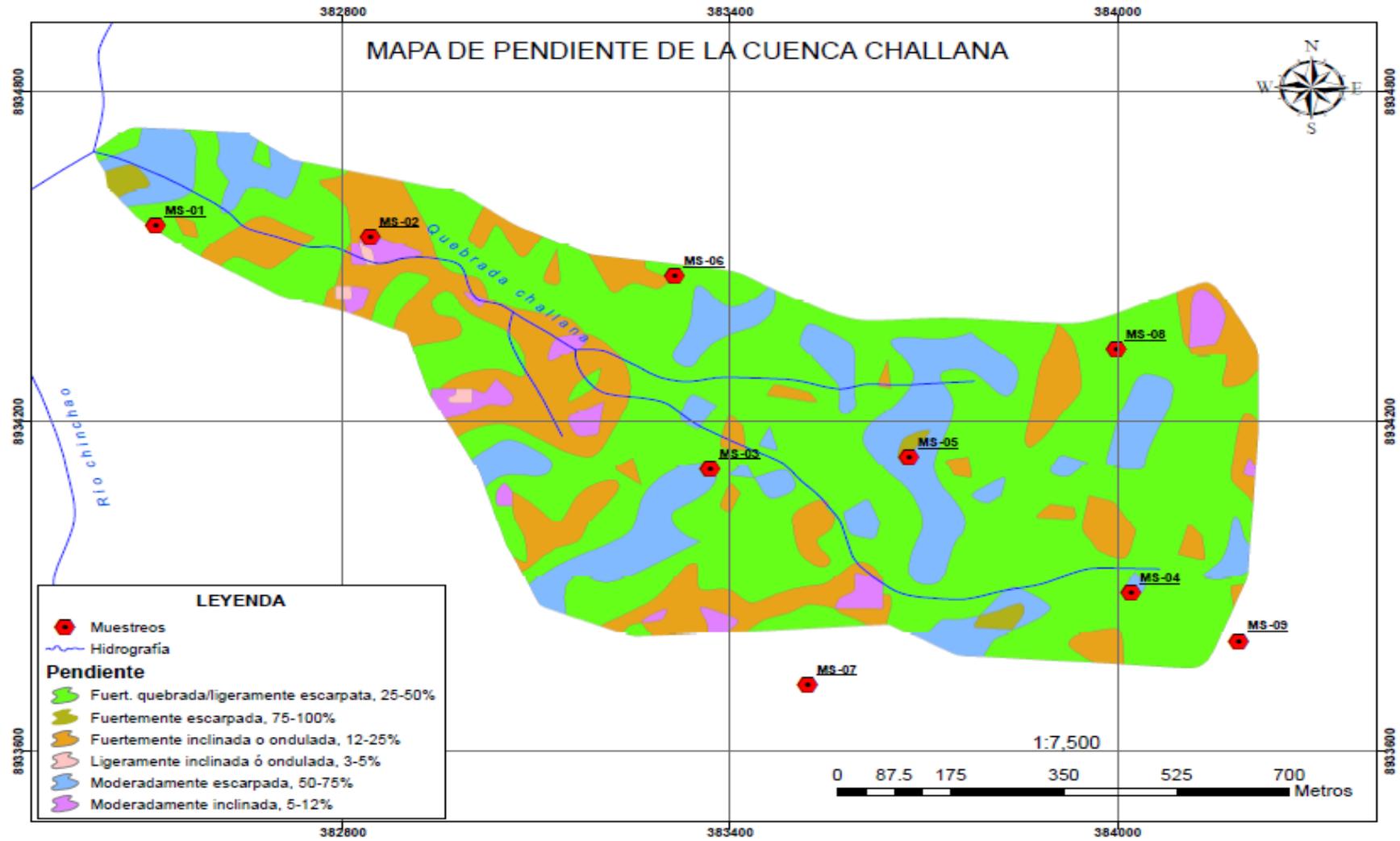


Figura 21. Mapa de pendiente de la cuenca Challana

Anexo 2. Resultados de análisis de suelo de laboratorio

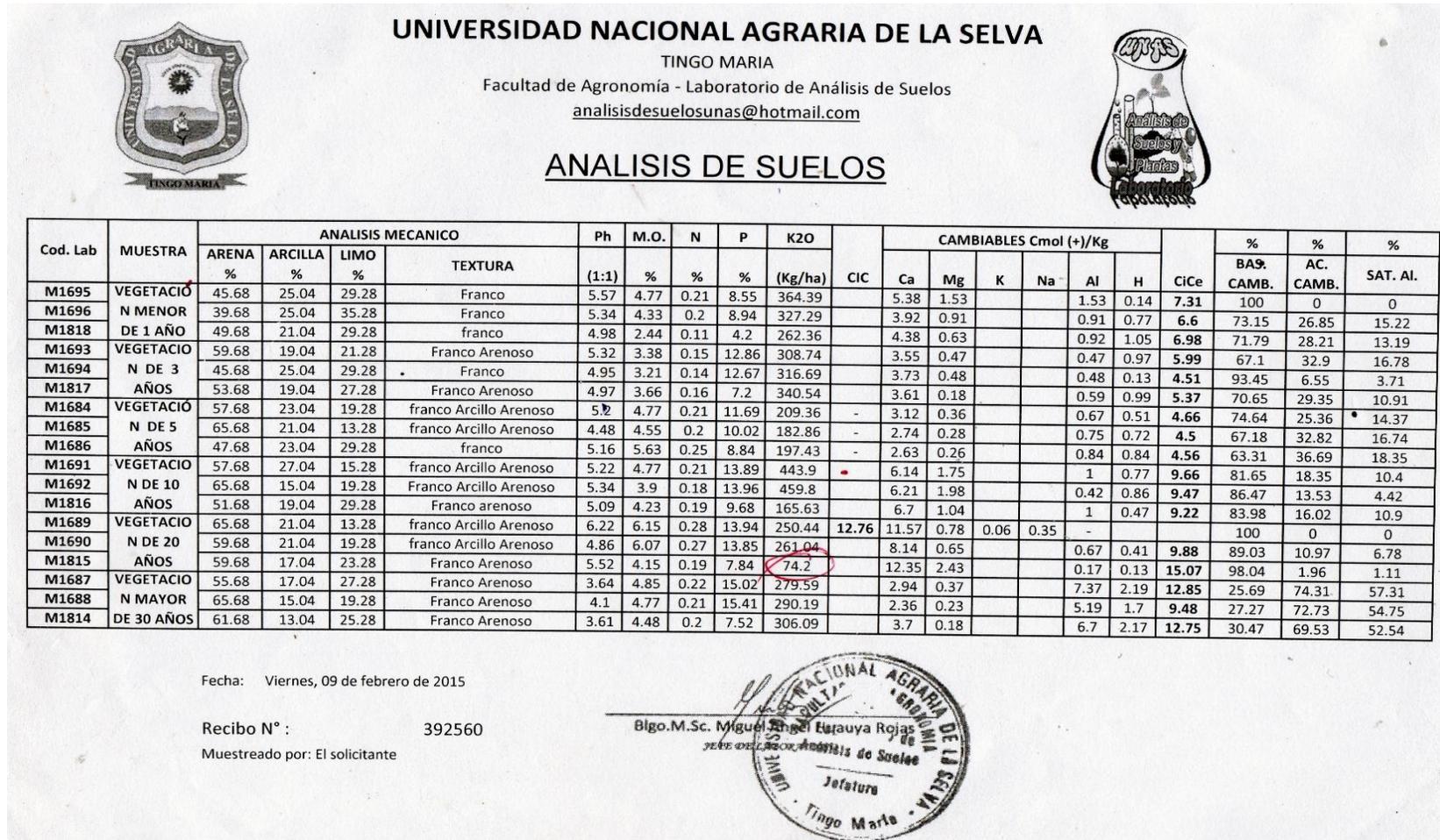


Figura 12. Análisis de suelos de las primeras 5 calicatas

Anexo 3. Imagen de la distribución de suelo en la cuenca Challana

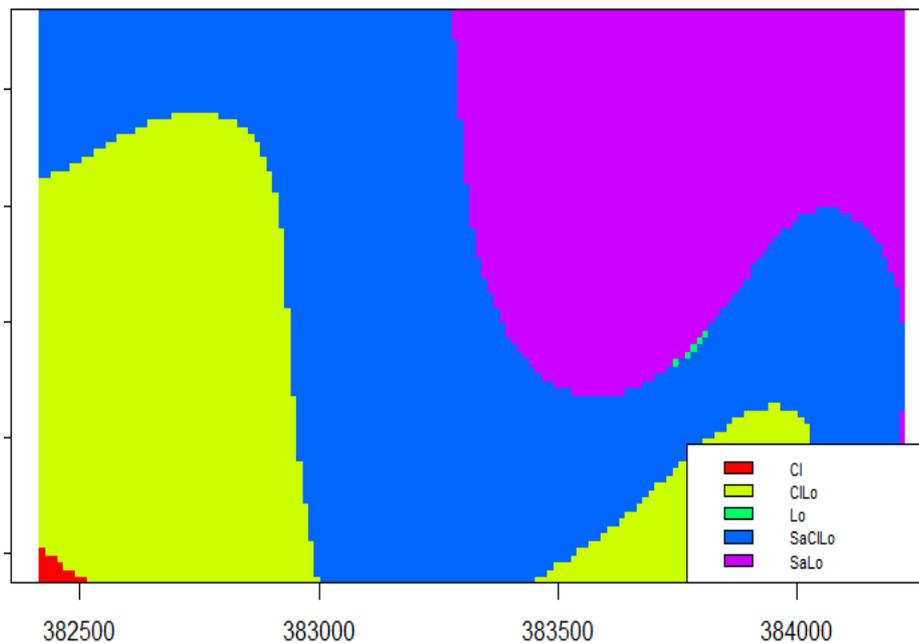


Figura 24. Suelos de la cuenca Challana, CI (Arcilla), CILo (Franco Arcilloso), Lo (Franco), SaCILo (Franco Arcilloso Arenoso), SaLo (Franco Arenoso)

Anexo 4. Tratamiento de imágenes Modis 16 A2 para la obtención de ETr

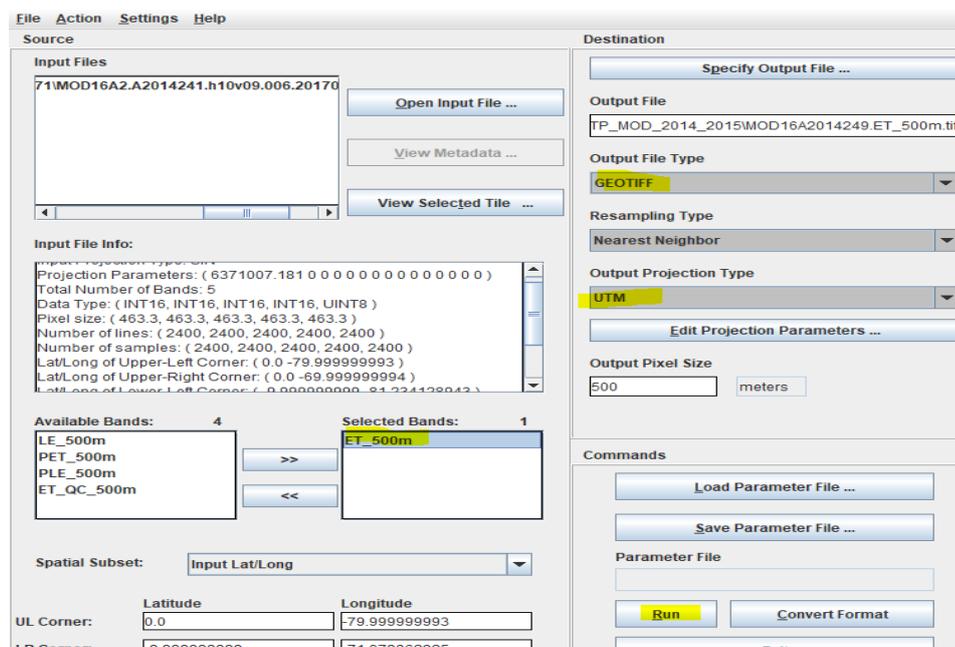


Figura 25. Selección, proyección y cambio de formato de las imágenes MODIS

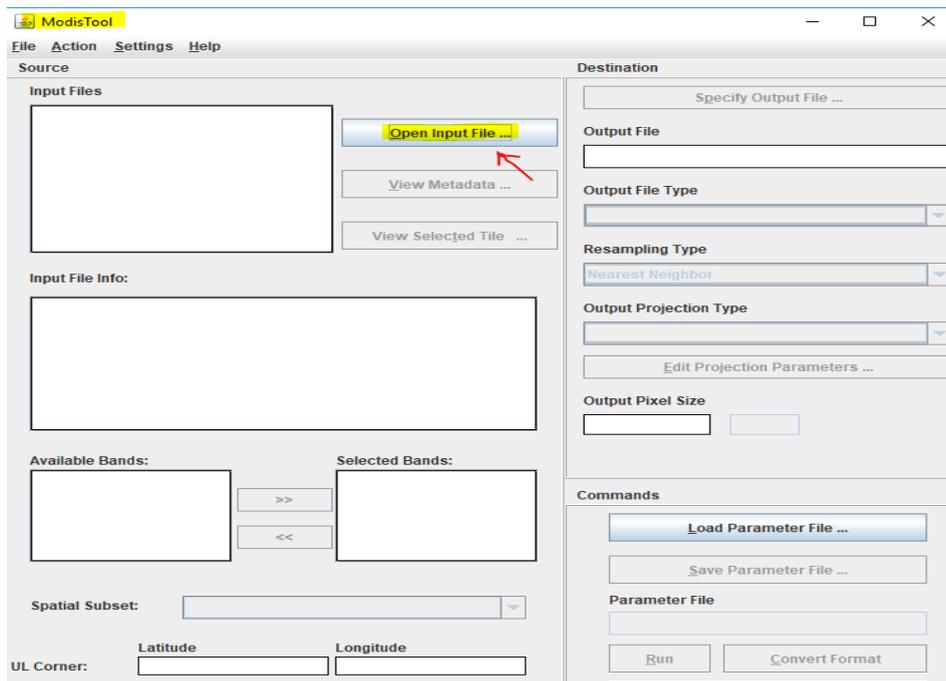


Figura 26. Entorno Modis Tools para proceso de imágenes MODIS.

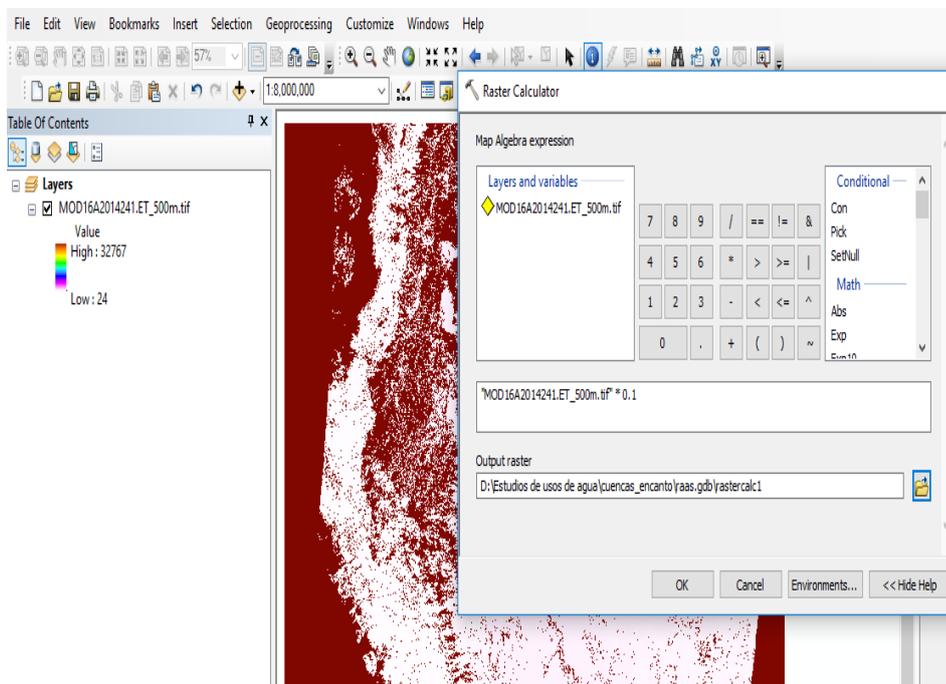


Figura 27. Multiplicación de la imagen con su factor de escala

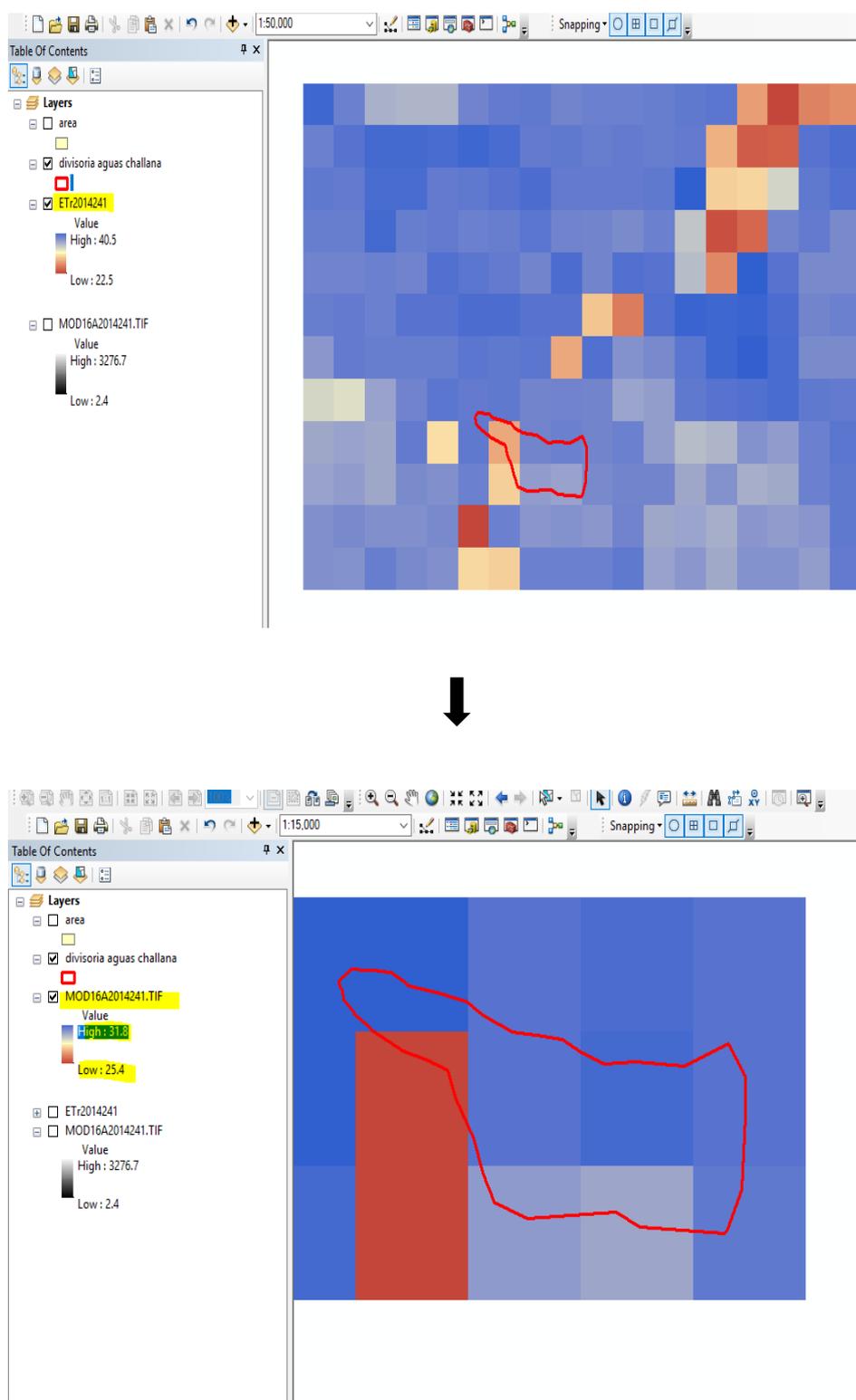


Figura 28. Extracción de área de interés de un tamaño de pixel de 3 x 5

Anexo 5. Valor de PERmeabilidad

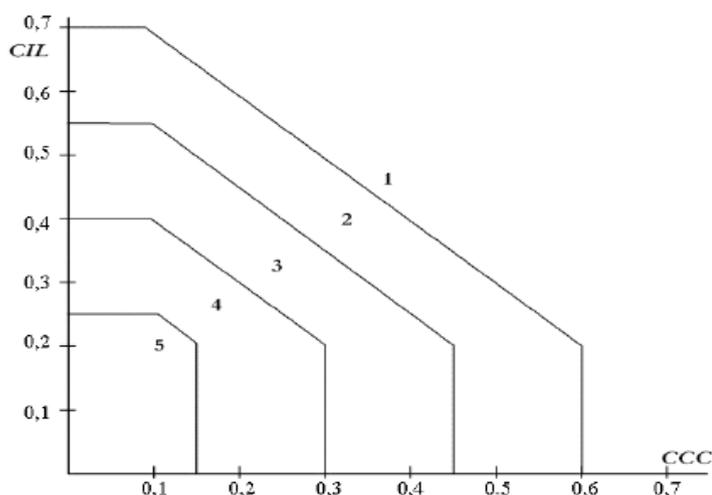


Figura 29. Valor del parámetro PERmeabilidad en función de CCC y CIL. Fuente:

GANDULLO, 1985

Anexo 6. Cuadros

Cuadro 13. Principales características físicas de la cuenca Challana.

GEOMORFOLOGICO DE LA CUENCA CHALLANA			
Descripción	Valor	Unidad	
Área	0.90	Km ²	
Perímetro de la Cuenca	4.79	Km	
Factor de Forma Cuenca	0.35	F<1	
Coefficiente de Compacidad	1.41	K>1	
Altitud Media	1772.66	m.s.n.m	
Altitud de Frecuencia Media	1714.10	m.s.n.m	
Pendiente promedio de la cuenca	31.22	%	
Longitud del Cauce Principal	2.03	Km	
Longitud Total de la Red Hidrográfica	2.91	Km	
Pendiente del Cauce	27.38	%	
Densidad de Drenaje	3.22	Km/Km ²	
orden cauce	2		

Cuadro 14. Datos de ETr cada 8 días de MODIS 16 A2 del periodo de septiembre 2014 - agosto 2015

DIA JULIANO	DIAS	Etr (mm)
2014241	29-ago-14	33.17
2014249	06-sep-14	34.40
2014257	14-sep-14	23.41
2014265	22-sep-14	0
2014273	30-sep-14	32.13
2014281	08-oct-14	30.79
2014289	16-oct-14	32.17
2014297	24-oct-14	28.61
2014305	01-nov-14	0
2014313	09-nov-14	17.40
2014321	17-nov-14	0
2014329	25-nov-14	19.13
2014337	03-dic-14	0
2014345	11-dic-14	17.00
2014353	19-dic-14	0
2014361	27-dic-14	10.35
2015001	01-ene-15	19.57
2015009	09-ene-15	17.88
2015017	17-ene-15	0
2015025	25-ene-15	0
2015033	02-feb-15	18.88
2015041	10-feb-15	0
2015049	18-feb-15	0
2015057	26-feb-15	0
2015065	06-mar-15	0
2015073	14-mar-15	0
2015081	22-mar-15	17.4
2015089	30-mar-15	0
2015097	07-abr-15	15.15
2015105	15-abr-15	0
2015113	23-abr-15	18.50
2015121	01-may-15	0
2015129	09-may-15	19.38
2015137	17-may-15	27.41
2015145	25-may-15	22.10
2015153	02-jun-15	26.05
2015161	10-jun-15	25.37
2015169	18-jun-15	26.68
2015177	26-jun-15	27.01
2015185	04-jul-15	24.51
2015193	12-jul-15	24.66
2015201	20-jul-15	26.25
2015209	28-jul-15	30.28
2015217	05-ago-15	25.41
2015225	13-ago-15	30.33
2015233	21-ago-15	32.08
2015241	29-ago-15	30.72

Cuadro 15. Caudales diarios en lt/s de la quebrada Challana

DIAS	CAUDAL (LTS/S)	Nivel (mm)						
			13/12/2014	50.67	59.71	20/05/2015	18.19	42.00
			14/12/2014	49.99	59.22	21/05/2015	18.19	42.00
			15/12/2014	51.40	60.11	22/05/2015	18.19	42.00
25/09/2014	16.85	61.82	16/12/2014	48.23	58.07	23/05/2015	18.14	41.93
26/09/2014	17.32	62.76	17/12/2014	50.54	59.60	24/05/2015	37.10	62.99
27/09/2014	17.50	63.11	18/12/2014	51.69	60.42	25/05/2015	51.54	80.44
28/09/2014	16.65	61.47	19/12/2014	50.00	59.22	26/05/2015	50.70	79.67
29/09/2014	16.23	60.64	20/12/2014	48.51	58.23	27/05/2015	48.25	77.17
30/09/2014	16.25	60.67	11/01/2015	42.67	54.71	28/05/2015	70.55	95.33
01/10/2014	37.07	60.77	12/01/2015	42.78	54.79	29/05/2015	74.30	98.58
02/10/2014	37.54	61.17	13/01/2015	58.62	72.28	30/05/2015	71.76	96.29
03/10/2014	37.60	61.21	14/01/2015	61.70	74.18	01/06/2015	23.60	71.80
04/10/2014	37.53	61.16	15/01/2015	63.47	72.31	02/06/2015	22.29	69.70
05/10/2014	36.04	59.91	16/01/2015	62.33	69.26	03/06/2015	22.83	70.46
06/10/2014	34.88	58.94	17/01/2015	62.33	69.26	04/06/2015	23.37	71.41
07/10/2014	35.94	59.82	18/01/2015	75.68	85.44	05/06/2015	22.89	70.68
08/10/2014	35.07	59.09	19/01/2015	64.91	78.21	06/06/2015	22.66	70.30
09/10/2014	34.59	58.69	20/01/2015	60.68	72.07	07/06/2015	22.99	70.84
10/10/2014	31.96	56.46	21/01/2015	64.48	71.73	08/06/2015	22.87	70.65
11/10/2014	31.78	56.30	22/01/2015	60.24	72.78	09/06/2015	34.59	87.01
12/10/2014	31.15	55.77	23/01/2015	63.37	75.58	10/06/2015	41.32	96.54
13/10/2014	31.96	56.45	24/01/2015	61.32	71.79	11/06/2015	40.90	96.03
14/10/2014	30.81	55.48	25/01/2015	64.93	78.60	12/06/2015	40.76	95.85
15/10/2014	28.98	53.91	30/01/2015	131.20	125.19	13/06/2015	39.95	94.84
16/10/2014	26.75	51.96	31/01/2015	177.00	157.27	14/06/2015	39.24	93.94
17/10/2014	31.31	55.88	03/02/2015	91.07	175.80	15/06/2015	39.12	93.79
18/10/2014	29.22	54.11	04/02/2015	83.48	167.24	16/06/2015	38.00	92.30
19/10/2014	32.01	56.49	05/02/2015	79.42	162.55	17/06/2015	35.16	88.54
20/10/2014	28.22	53.25	06/02/2015	77.81	160.67	18/06/2015	35.03	88.47
21/10/2014	28.88	53.82	07/02/2015	76.64	159.27	19/06/2015	36.74	90.52
22/10/2014	29.95	54.75	08/02/2015	71.00	151.96	20/06/2015	35.11	87.84
23/10/2014	30.22	54.98	09/02/2015	63.95	143.56	21/06/2015	25.33	74.08
24/10/2014	30.28	55.03	10/02/2015	62.03	141.04	22/06/2015	20.01	65.82
25/10/2014	31.27	55.87	11/02/2015	67.70	148.33	23/06/2015	19.64	65.21
26/10/2014	29.81	54.62	12/02/2015	67.89	148.57	24/06/2015	21.20	67.84
27/10/2014	32.20	56.66	13/02/2015	70.23	151.49	25/06/2015	22.88	70.63
28/10/2014	36.31	60.11	14/02/2015	65.77	145.90	26/06/2015	21.93	69.11
29/10/2014	38.91	62.21	15/02/2015	64.36	144.11	27/06/2015	21.50	68.38
30/10/2014	35.53	59.48	16/02/2015	63.38	142.83	28/06/2015	20.11	66.03
31/10/2014	30.28	55.03	17/02/2015	62.83	142.13	29/06/2015	19.60	65.16
01/11/2014	24.45	60.20	18/02/2015	61.53	140.46	30/06/2015	19.37	64.75
02/11/2014	22.95	56.70	19/02/2015	59.82	138.14	01/07/2015	15.66	64.51
03/11/2014	17.07	42.85	22/02/2015	92.17	176.99	02/07/2015	15.74	64.69
04/11/2014	17.53	43.93	23/02/2015	82.98	166.64	03/07/2015	15.74	64.69
05/11/2014	17.97	44.99	17/03/2015	172.24	227.80	04/07/2015	16.05	65.42
06/11/2014	17.88	44.76	18/03/2015	89.31	153.58	05/07/2015	15.96	65.20
07/11/2014	18.56	46.36	19/03/2015	43.47	107.59	06/07/2015	16.08	65.47
08/11/2014	17.02	42.70	20/03/2015	43.74	107.99	07/07/2015	15.86	64.96
09/11/2014	12.61	32.18	21/03/2015	44.63	109.07	08/07/2015	18.04	69.50
10/11/2014	12.76	32.52	22/03/2015	50.23	116.45	09/07/2015	23.55	81.27
11/11/2014	13.02	33.16	23/03/2015	49.95	116.09	10/07/2015	22.98	80.14
12/11/2014	12.91	32.90	24/03/2015	49.33	115.30	11/07/2015	20.43	74.97
13/11/2014	14.97	37.79	25/03/2015	50.50	116.76	12/07/2015	19.38	72.76
14/11/2014	13.12	33.40	26/03/2015	48.48	114.22	13/07/2015	18.89	71.73
15/11/2014	13.96	35.42	27/03/2015	48.85	114.67	14/07/2015	18.54	70.95
16/11/2014	13.93	35.35	28/03/2015	48.01	113.53	15/07/2015	19.89	73.84
17/11/2014	15.57	39.26	29/03/2015	43.55	107.64	16/07/2015	18.54	70.95
18/11/2014	18.97	47.34	30/03/2015	40.44	103.47	17/07/2015	17.81	69.36
19/11/2014	18.41	46.02	31/03/2015	37.59	99.44	18/07/2015	17.56	68.81
20/11/2014	18.70	46.71	01/04/2015	117.20	116.40	19/07/2015	16.99	67.53
21/11/2014	19.07	47.57	02/04/2015	100.41	105.35	20/07/2015	16.70	66.89
22/11/2014	24.06	60.25	03/04/2015	96.50	102.70	21/07/2015	16.10	65.51
23/11/2014	19.87	49.47	04/04/2015	95.63	102.09	22/07/2015	15.83	64.90
24/11/2014	19.29	48.10	05/04/2015	92.14	99.67	23/07/2015	16.74	66.98
25/11/2014	19.62	48.89	06/04/2015	93.84	100.79	24/07/2015	16.11	65.50
26/11/2014	19.89	49.52	07/04/2015	125.58	121.72	25/07/2015	12.04	55.33
27/11/2014	20.23	50.30	08/04/2015	87.26	93.84	26/07/2015	8.50	45.75
28/11/2014	19.52	48.66	09/04/2015	132.38	126.85	27/07/2015	8.43	45.53
29/11/2014	20.41	50.74	10/04/2015	146.88	135.68	28/07/2015	9.61	48.81
30/11/2014	19.99	49.75	11/04/2015	123.73	120.60	29/07/2015	9.55	48.83
01/12/2014	38.73	51.32	12/04/2015	111.52	112.70	30/07/2015	9.77	49.47
02/12/2014	39.13	51.64	13/04/2015	88.38	97.04	31/07/2015	9.79	49.52
03/12/2014	39.27	51.74	14/04/2015	66.22	76.80	01/08/2015	12.77	57.42
04/12/2014	39.20	51.69	15/04/2015	39.54	39.54	02/08/2015	13.21	58.59
05/12/2014	38.46	51.11	16/04/2015	26.83	42.00	03/08/2015	12.82	57.61
06/12/2014	40.71	52.83	17/04/2015	26.83	42.00	04/08/2015	11.22	53.47
07/12/2014	43.79	55.06	18/04/2015	26.83	42.00	05/08/2015	13.08	58.28
08/12/2014	44.40	55.59	19/04/2015	26.83	42.00	06/08/2015	13.12	58.36
09/12/2014	44.88	55.93	20/04/2015	26.83	42.00	07/08/2015	12.90	57.83
10/12/2014	44.94	55.94	21/04/2015	26.83	42.00	08/08/2015	12.60	57.06
11/12/2014	46.68	57.05	22/04/2015	42.00	42.00	09/08/2015	12.47	56.72
12/12/2014	47.13	57.34	23/04/2015	26.74	41.93	10/08/2015	12.31	56.31
			24/04/2015	49.97	64.46	11/08/2015	12.40	56.52
			25/04/2015	65.80	80.44	12/08/2015	12.61	57.01
			26/04/2015	64.80	79.67	13/08/2015	13.18	58.53
			27/04/2015	61.62	77.17	14/08/2015	12.85	57.69
			28/04/2015	86.31	95.33	15/08/2015	12.76	57.46
			29/04/2015	90.57	98.58	16/08/2015	12.90	57.80
			30/04/2015	87.40	96.29	17/08/2015	11.67	54.56
			01/05/2015	95.49	116.40	18/08/2015	10.01	50.14
			02/05/2015	82.15	105.35	19/08/2015	10.39	51.05
			03/05/2015	79.04	102.70	20/08/2015	11.23	53.48
			04/05/2015	78.34	102.09	21/08/2015	12.46	56.46
			05/05/2015	75.55	99.67	22/08/2015	15.47	64.05
			06/05/2015	76.90	100.79	23/08/2015	15.45	64.02
			07/05/2015	102.11	121.72	24/08/2015	15.62	64.40
			08/05/2015	68.56	93.84	25/08/2015	15.45	64.01
			09/05/2015	109.18	126.85	26/08/2015	15.25	63.54
			10/05/2015	119.92	135.68	27/08/2015	15.37	63.83
			11/05/2015	100.66	120.60	28/08/2015	15.69	64.57
			12/05/2015	91.06	112.70	29/08/2015	15.40	63.89
			13/05/2015	72.55	97.04	30/08/2015	14.99	62.94
			14/05/2015	52.27	76.80	31/08/2015	14.95	62.83
			15/05/2015	19.63	43.97			
			16/05/2015	18.19	42.00			
			17/05/2015	18.19	42.00			
			18/05/2015	18.19	42.00			
			19/05/2015	18.19	42.00			

Cuadro 15. Calculo de la capacidad de retención de agua (CRA) de la cuenca Challana

MUESTRAS	Espesor Horizonte (cm)	espesor horizonte (m)	%Ao	%Lmo	%Ar	MO %	Coefficiente de capacidad de cementacion (CCC)	Coefficiente de impermeabilidad del limo (CIL)	h_e (calculo del equivalente de humedad)	CRAM = Capacidad de retencion de agua total del perfil en mm	texturasdel suelo
MS-01-1	26	0.26	51.68	23.28	25.04	6.38	0	0.078418229	28.9708	109.1972661	franco arcillo arenoso
MS-01-2	34	0.34	41.68	21.28	37.04	2.02	0.472252282	0.130495674	28.3116		Franco Arcilloso
MS-02-1	20	0.2	47.68	23.28	29.04	6.72	0.062239586	0.080792311	31.1056		franco arcillo arenoso
MS-02-2	23	0.23	57.68	19.28	23.04	1.68	0.384073898	0.081924234	21.3768	128.9941038	franco arcillo arenoso
MS-02-3	28	0.28	29.68	27.28	43.04	1.01	0.728596154	0.14602328	31.1594		Arcilloso
MS-03-1	9.1	0.091	57.68	19.28	23.04	4.77	0.165783051	0.046053441	25.1466		franco arcillo arenoso
MS-03-2	33.5	0.335	65.68	13.28	21.04	4.55	0.105323838	0.035808797	22.5182	139.6343797	franco arcillo arenoso
MS-03-3	57.5	0.575	47.68	29.28	23.04	5.63	0.009988349	0.152433606	28.6958		franco
MS-04-1	40.5	0.405	49.68	29.28	21.04	6.05	0	0.15302716	28.3482	177.2018738	Franco
MS-04-2	59.5	0.595	59.68	25.28	15.04	4.7	0	0.150237718	23.1212		franco arenoso
MS-05-1	9.9	0.099	65.68	13.28	21.04	6.15	0	0.038770864	24.4702		franco arcillo arenoso
MS-05-2	40	0.4	59.68	19.28	21.04	6.07	0	0.050018499	25.8726	73.22449257	franco arcillo arenoso
MS-05-3	50.1	0.501	59.68	23.28	17.04	4.15	0.020391878	0.050231763	22.8102		franco arenoso
MS-06-1	10.5	0.105	45.68	29.28	25.04	4.77	0.49267733	0.035420505	28.5066		franco
MS-06-2	40.2	0.402	39.68	35.28	25.04	4.33	0.642940458	0.04236187	29.4698	62.16865024	franco
MS-06-3	52.3	0.523	49.68	29.28	21.04	2.44	0.442960927	0.07456152	23.944		franco
MS-07-1	29	0.29	59.68	21.28	19.04	4.15	0.059855016	0.086748285	23.1702		franco arenoso
MS-07-2	31	0.31	45.68	29.28	25.04	4.77	0.117728395	0.14823	28.5066	171.1268223	franco
MS-07-3	50	0.50	53.68	27.28	19.04	2.44	0.178391682	0.141911549	22.584		franco arenoso
MS-08-1	32.5	0.325	55.68	27.28	17.04	5.37	0	0.087166864	25.2986		franco arenoso
MS-08-2	40.5	0.405	65.68	19.28	15.04	4.37	0	0.100677133	21.2186	123.1428213	franco arenoso
MS-08-3	23.5	0.235	61.68	25.28	13.04	1.34	0.11976803	0.162105364	18.162		franco arenoso
MS-09-1	21.1	0.211	55.68	27.28	17.04	4.85	0	0.140154128	24.6642		franco arenoso
MS-09-2	30.5	0.305	65.68	19.28	15.04	4.77	0	0.139119534	21.7066	144.9952264	franco arenoso
MS-09-3	58.4	0.584	61.68	25.28	13.04	4.48	0	0.081658143	21.9928		franco arenoso

Cuadro 16. Clasificación de pendiente

PENDIENTE	SIMBOLO	DESCRIPCION	PROCESOS CARACTERISTICOS Y CONDICIONES DEL TERRENO
0-3%	a	A nivel/ casi nivel	Denudación no apreciable; por su condición transitable y laborable, es objeto de uso agrícola, solamente se dificulta su uso bajo condiciones secas.
3-5%	b	Ligeramente inclinada/ ligeramente ondulada	Laderas afectadas especialmente por erosión hídrica en sectores desprovistos
5-12%	c	Moderadamente inclinada/ moderadamente	Laderas que pueden generar movimientos en masa de diferentes clases y baja velocidad, especialmente soliflucción y
12-25%	d	Fuertemente inclinada/ fuertemente ondulada/ moderadamente quebrada	Movimientos en masa de todo tipo, especialmente soliflucción, reptación erosión en surcos, ocasionalmente deslizamientos.
25-50%	e	Fuertemente quebrada/ ligeramente escarpada	Procesos denudacionales intensivos de diferentes clases zonas con reemplazos forestales evidencias claras de erosión del suelo.
50-75%	f	Moderadamente escarpada	Desprendimiento de rocas, coluviación.
75-100%	g	Fuertemente escarpada (incluye escarpe subverticales y verticales)	Caída de rocas, por efectos de tectonismo y bioclastia.

Fuente: (<https://edoc.site/clasificacion-de-pendientes-y-su-caracteristicas-pdf-free.html>)

Anexo 7. Gráfica de resultados

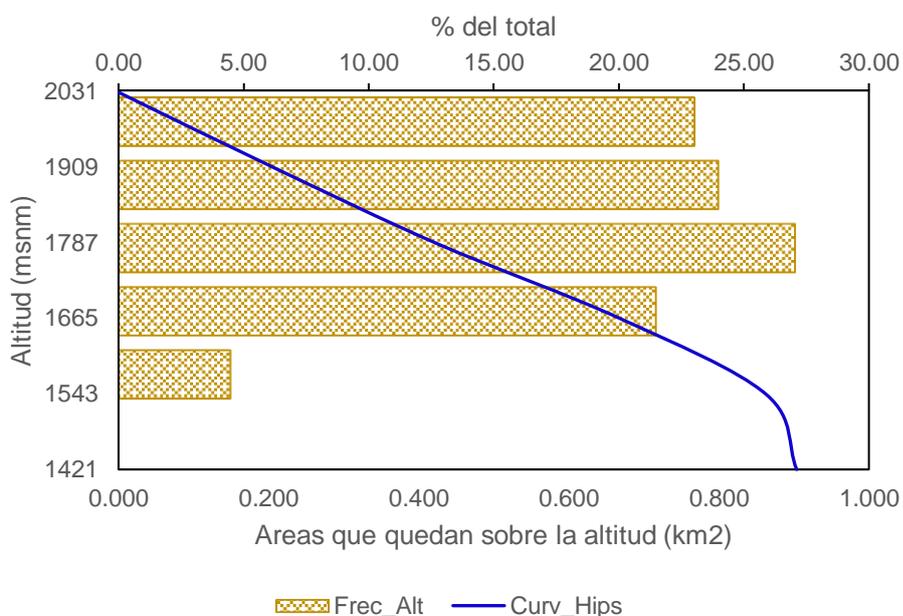


Figura 30. Curva hipsométrica de la cuenca Challana.

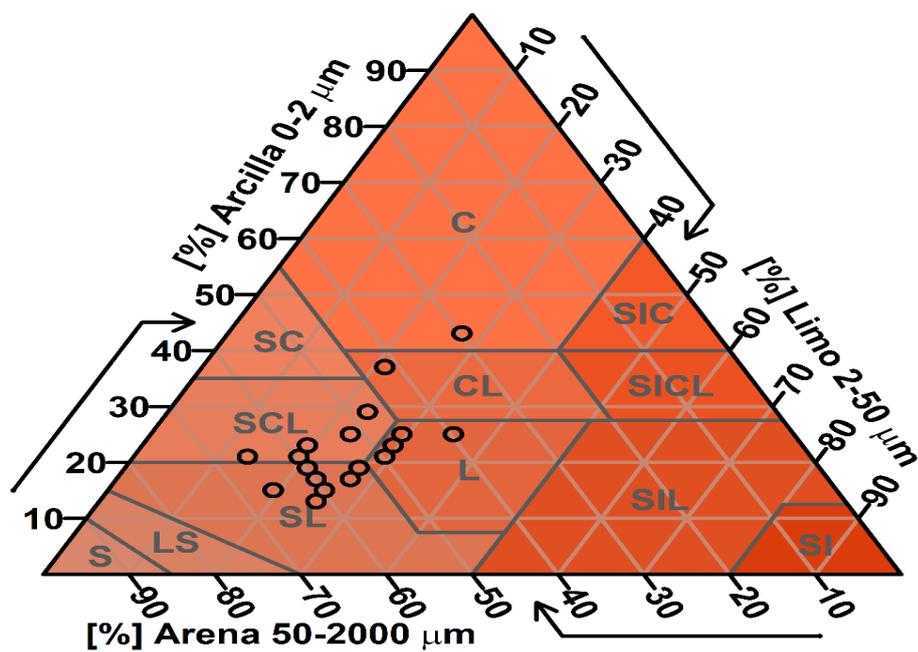


Figura 31. Contenido de Arcilla (0-2 µm), Limo (2-50 µm) y Arena (50-2000 µm) de los 25 horizontes de las 9 calicatas de la cuenca Challana.

Anexo 9. Panel fotográfico



Figura 32. Vista en campo de la cuenca hidrográfica



Figura 33. Calibración del sensor de nivel de agua ODISEY



Figura 34. Zona de aforo en la cuenca: A (Quebrada challana), B (Instalación y nivelación del equipo), C (Equipo instalado)



Figura 35. Caudal en época lluviosa (A y B)



Figura 36. Suelo de cobertura de bosque, A: Excavación de la calicata, B: Calicata culminada, C: Visualización de los horizontes, D: Muestras listas para laboratorio.



Figura 37. Muestreando suelos de una cobertura boscosa de cabecera de cuenca



Figura 38. Tomas de muestras: A (Medida de los horizontes), B (Toma de muestra de cada horizonte), C (Pesado natural), D (Etiquetado).



Figura 39. Perfil de suelos de algunos puntos de muestreos, A: suelo para pasto, B: suelo para purmas, C: suelo para bosques aproximadamente de 30 años, D: suelo para bosque de 20 años aproximadamente.



Figura 40. Estación meteorológica automática challan