

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“MODELO DE GEOFORMACIONES CÓNCAVAS PARA
RECARGAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN CABECERAS DE
CUENCA DEL RÍO JEQUETEPEQUE, CAJAMARCA”**

Presentada por:

FRANCISCO ALEJANDRO ALCÁNTARA BOZA

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
DOCTORIS PHILOSOPHIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

Lima - Perú

2015

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

ESCUELA DE POSGRADO

DOCTORADO EN RECURSOS HÍDRICOS

**“MODELO DE GEOFORMACIONES CÓNCAVAS PARA
RECARGAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN CABECERAS DE
CUENCA DEL RÍO JEQUETEPEQUE, CAJAMARCA”**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE

Doctoris Philosophiae (Ph. D.)

Presentada por:

FRANCISCO ALEJANDRO ALCÁNTARA BOZA

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Ph.D. Absalón Vásquez Villanueva

PRESIDENTE

Dr. Néstor Montalvo Archiñigo

PATROCINADOR

Dr. Abel Mejía Marcacuzco

MIEMBRO

Ph.D. Eusebio Ingol Blanco

MIEMBRO

Dr. Carlos Francisco Cabrera Carranza

MIEMBRO EXTERNO

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico:

- ✓ A los investigadores en este recurso esencial como es el agua.

- ✓ A mis hijas *Ibet Alexandra* y *Qunny kamsir Helena*, como reflejo del futuro aprendizaje y el camino de luz hacia la investigación.

- ✓ A mis alumnos y alumnas, como guía en un mundo tan cambiante fruto de la investigación para la construcción de nuevos saberes.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por la concesión de sabiduría, salud y comprensión.

Al Dr. Néstor Montalvo, por sus sabias enseñanzas y el apoyo constante para culminar la presente tesis.

A los doctores: Eusebio Ingol, Abel Mejía, y Absalón Vásquez, por su apoyo técnico durante el desarrollo y culminación de la presente tesis.

Al Dr. Carlos Cabrera Carranza, por su acompañamiento y apoyo hacia la investigación desde pre grado.

A mis profesores del doctorado, por los conocimientos hidrológicos de primera calidad la cual esclarecieron el tema de mi investigación.

A mi padre Roberto Alcántara Guevara, pionero en la defensa de los intereses de su pueblo, quien con su sabiduría me encaminó en este maravilloso mundo de la ingeniería.

A mi tía Olinda, a mi esposa Santos y primos, por su comprensión y tolerancia muchas veces desatendiendo mis deberes en el hogar.

Al CONCYTEC – FINCYT, que ha hecho posible el otorgamiento de una beca de estudios de Doctorado.

RESUMEN

La presente investigación, tiene como objetivo desarrollar un modelo de recarga de aguas subterránea, utilizando geoformaciones cóncavas localizados en las cabeceras de cuenca del río Jequetepeque como sistema de recarga. Para ello, se realizó un trabajo previo de coordinación con las autoridades y la población en el área de influencia al estudio, la recolección de información, cartas geográficas y geológicas y la adquisición de materiales. En campo, se logró la identificación de geoformaciones cóncavas, la toma de datos de infiltración, medida de caudales, humedad del suelo y su densidad, sedimentación y erosión, evaluación geomorfológica y la intemperización. Luego se interpretó y consolidó la información mediante programas informáticos y de cálculo.

Para la investigación, se determinó un área de influencia de 1 113 km², en la cual se encontró 37 geoformaciones cóncavas a lo largo de la cabecera de cuenca. En las geoformaciones cóncavas se generan dos tipos de recarga: de infiltración difusa y escorrentía de infiltración. La geomorfología en la cabecera de cuenca, es variable; desde partes planas, lomas y colinas, a pendientes abruptas, la cual tiene influencia en la infiltración, y conservación del agua en forma de almacenamientos ya sea recargas subsuperficial o profunda.

Los resultados permiten concluir que más del 70 %, de las precipitaciones que ocurren en las geoformaciones cóncavas constituyen fuentes de recarga de agua subterránea, las cuales se han ido formando por interacción de procesos naturales geológicos, climáticos y edafológicos continuos. La infiltración difusa, presenta una conductividad hidráulica entre 0.04 a 0.17 cm/h y un flujo de infiltración que se encuentra entre 0.17 L/s y 12.3 L/s que alimenta al acuífero. Los aportes a las recargas están directamente relacionadas con su área de influencia. En la geoformación cóncava (A-01) la recarga natural es de 9 387.31 m³/año, que, sumando las recargas artificiales mediante sistemas de conducción de 28 067.04 m³/año, se genera una recarga total de 37 454.35 m³/año, que si no existieran la geoformaciones cóncavas se perdería como escorrentía. Así mismo, en cuencas sin glaciares, existe un proceso de acondicionamiento natural de medio, formando colchones de agua en un medio poroso y un medio con infiltración secundaria. La cabecera de cuenca, presenta un suelo altamente intempérico, en la cual, el 65% del

agua infiltrada emergen en forma de manantiales incluso en épocas de estiaje (aguas subterráneas), constituyendo los primeros escurrimientos del cauce de los primeros ríos.

Palabras Claves: Geoformaciones cóncavas, infiltración, geomorfología,

SUMMARY

The present investigation, it aims to develop a model of groundwater recharge, using geof ormations located in the headwaters of basin of the Jequetepeque River as recharging system. To do this, work was carried out pre-coordination with the authorities and the population in the area of influence to the study, the collection of information, geographical and geological letters and the purchase of materials. In the field, achieving the identification of geof ormations concave, the collection of data of infiltration, measurement of flow, soil moisture and its density, sedimentation and erosion, geomorphological assessment and weathering. Then it is interpreted and consolidated the information through software programs and spreadsheets.

For the investigation, it was determined an area of influence of 1 113 km², which found 37 geof ormations concave along the headland of basin. In the concave geof ormations will generate two types of recharging: diffuse infiltration of infiltration and runoff. The geomorphology at the bedside of basin is variable; from flats, hills and hills, to steep slopes, which has an influence on infiltration, and water conservation in the form of either storages refills or deep subsurface.

The results allow concluding that more than 70 %, of the rainfall occurring in the concave geof ormations are sources of recharge of groundwater, which have been formed by interaction of natural processes geological, climatic and soil continued. The diffuse infiltration, presents a hydraulic conductivity between 0.04 to 0.17 cm/h and a flow of infiltration which is between 0.17 L/s and 12.3 L/s that feeds the aquifer. Contributions to the recharges are directly related to their area of influence. In the concave geof ormation (A-01) is the natural recharge of 9 387.31 m³/year, which, by adding artificial recharges through conduction systems 28 067.04 m³/year, generates a total recharge of 37 454.35 m³/year, that if you do not exist the concave geof ormations would be lost as runoff. Likewise, in basins without glaciers, there is a conditioning process of natural environment, forming water mattresses in a porous medium and a medium with infiltration secondary.

The bedside of basin, presents a highly intemperance soil, in which 65% of the water infiltrated emerge in the form of springs even in times of dry season (subsurface waters), constituting the first runoff the riverbed of the first rivers.

Key Words: Geoformations concave, infiltration, geomorphology, recharges.

ORGANIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se organiza en seis capítulos.

En el capítulo I, introducción, se describe la problemática respecto a la escasez del recurso agua, especialmente en la vertiente del pacífico, la falta de información en lugares específicos de la cuenca, y la no utilización de recursos naturales capaces de generar recargas de agua subterránea, salvando problemas de sobreexplotación de acuíferos en partes bajas. Además se presentan los objetivos de investigación y la justificación.

El capítulo II, está referido al marco teórico, en la cual se resalta el desarrollo de la información teórica sobre recursos hídricos, conceptualización de términos y el desarrollo o profundización de teorías que nos ayuden a tener un cabal conocimiento del tema de investigación.

En el capítulo III, referido a la metodología, se explica los procesos o procedimientos que se desarrolló para dar éxito a la presente investigación, se describen los pasos y la metodología utilizada, así como la descripción del conjunto de materiales y herramientas que se utilizó tanto en campo y en gabinete.

El capítulo IV, sobre resultados y discusión, es el capítulo en la cual se resalta los hallazgos encontrados y la discusión de los mismos, producto de la experimentación y los trabajos en campo, que luego de procesados a través de herramientas y software se describe mediante tablas, figuras, textos y representaciones matemáticas.

El capítulo V, referido a las conclusiones y recomendaciones, se presenta las principales conclusiones que se ha logrado en la presente investigación, las cuales están correspondientemente relacionadas con los objetivos. Así mismo exponemos algunas recomendaciones fruto de la experiencia de la presente investigación.

Finalmente se presenta la bibliografía consultada y los anexos correspondientes al desarrollo de la presente investigación.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

SUMMARY

ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	4
1.2.1 Problema general.....	4
1.2.2 Sub problemas	4
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	5
II. REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1 RECURSOS HÍDRICOS	7
2.1.1 Aguas Atmosféricas	8
2.1.2 Aguas superficiales	9
2.1.3 Aguas subterráneas.....	9
2.1.4 Glaciares.....	11
2.1.5 Calidad de las aguas	12
2.2 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUAS	14
2.2.1 Escorrentía.....	15
2.2.2 Infiltración.....	16
2.2.3 Recargas	22
2.3 EVENTOS EXTREMOS	24
2.3.1 Las inundaciones	25
2.3.2 Las sequías	26
2.4 CUENCAS	27
2.4.1 Características de la cuenca.....	28
2.4.2 Red hidrográfica.....	30
2.4.3 Cuenca del río Jequetepeque	30

2.5	CABECERAS DE CUENCA	33
2.6	GEOMORFOLOGÍA	35
2.7	GEOLOGÍA	37
2.8	SEDIMENTACIÓN	41
2.9	ACTIVIDADES ANTRÓPICAS	43
2.10	MODELAMIENTO	44
	2.10.1 Definiciones y conceptos fundamentales	44
	2.10.2 Software	45
	2.10.3 El modelo geoespecial.....	49
2.11	RESUMEN TEÓRICO	51
2.12	CONTRIBUCIÓN A LA INVESTIGACIÓN	54
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	56
3.1	MATERIALES	56
	3.1.1 Zona de estudio	56
	3.1.2 Caracterización de la cuenca	57
	3.1.3 Materiales utilizados	57
3.2	MÉTODOS	59
	3.2.1 Delimitación del área de estudio	60
	3.2.2 Fase de planteamiento y coordinación	60
	3.2.3 Fase de campo	61
	3.2.4 Muestreo.....	62
	3.2.5 Análisis de la información.....	67
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
4.1	IDENTIFICACION Y UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE GEOFORMACIONES CÓNCAVAS	69
4.2	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN FORMACIONES CÓNCAVAS	72
	4.2.1 Infiltración del suelo.....	72
	4.2.2 Humedad del suelo	84
	4.2.3 Caudales en espacios cóncavos	88
	4.2.4 Variaciones de volúmenes de pérdidas de agua	93
	4.2.5 Niveles de sedimentación.....	95
4.3	GÉNESIS DE GEOFORMACIONES CÓNCAVAS	96
	4.3.1 Carácter geológico en las formaciones cóncavas en la cabecera de cuenca.....	96
	4.3.2 Identificación geomorfológica de la cabecera de cuenca	99
	4.3.3 Factores Endógenos.....	103

4.3.4 Factores Exógenos.....	109
4.4 ESCORRENTIAS Y RECARGAS DE AGUA EN CABECERA DE CUENCA	115
4.4.1 Simulación de caudales en las cabeceras de cuenca.....	115
4.4.2 Descargas de agua	122
4.4.3 Recargas de agua.....	124
4.4.4 Aporte de recarga de aguas en las geoformaciones cóncavas	125
4.5 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO MUESTRAL	128
4.6 ESTRUCTURACIÓN DE LAS GEOFORMACIONES CÓNCAVAS	132
4.7 EVALUACIÓN DE RECARGAS ARTIFICIALES DE AGUA SUBTERRÁNEA	136
V. CONCLUSIONES.....	139
VI. RECOMENDACIONES	142
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
VIII. ANEXOS.	148

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro N° 2.1: Componente pendiente del coeficiente de infiltración.....	22
Cuadro N° 2.2: Componente vegetal del coeficiente de infiltración.....	22
Cuadro N° 2.3: Partes de una cuenca.	29
Cuadro N° 2.4. Forma de clasificar los suelos de acuerdo a la textura.	41
Cuadro N° 3.1: Estaciones meteorológicas en la cuenca del río Jequetepeque.....	59
Cuadro N° 4.1: Identificación de formaciones cóncavas, en la cabecera de cuenca del río Jequetepeque.	69
Cuadro N° 4.2: Parámetros ajustados y calibrados para la zona de estudio.	73
Cuadro N° 4.3: Tasas de infiltración en la cabecera de cuenca.	82
Cuadro N° 4.4: Medidas de humedad del suelo, en la microcuenca del río Pallac.	84
Cuadro N° 4.5: Medidas de humedad de suelo en la micro cuenca Llapa.	85
Cuadro N° 4.6: Medidas de humedad del suelo en FC: A-01.....	86
Cuadro N° 4.7: Distribución de la vegetación nativa y la humedad del suelo.	87
Cuadro N° 4.8: Medidas de variación de volumen respecto al tiempo.....	94
Cuadro N° 4.9: Análisis de la sedimentación y erosión en varillas.....	95
Cuadro N° 4.10: Gradiente de la pendiente.	101
Cuadro N° 4.11: Aporte de lluvia en geoformaciones cóncavas.....	125
Cuadro N° 4.12: Escurrimiento convertido en recarga en geoformaciones cóncavas.	126
Cuadro N° 4.13: Flujo de agua subsuperficial, expresado en caudal de escurrimiento.	131
Cuadro N° 4.14: Recarga de aguas subterráneas en la FC: A-01. Asunción.	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1: Esquema del frente mojado.....	17
Figura N° 2.2: Límites y Ubicación de la cuenca del río Jequetepeque.....	31
Figura N° 2.3: Desarrollo del modelo hidrológico de bandeja de agua.....	46
Figura N° 4.1: Fotos de formaciones cóncavas en las cabeceras de cuenca.....	71
Figura N° 4.2: Distribución espacial de formaciones cóncavas en la cuenca del Jequetepeque.....	72
Figura N° 4.3: Tendencia de la infiltración FC: EP-01, El Prado.....	75
Figura N° 4.4: Mediciones de infiltración en el distrito, El Prado, FC: EP-03.....	76
Figura N° 4.5: Resultados de infiltración en la FC: EP-05, El Prado.....	77
Figura N° 4.6: Valores de infiltración en el distrito de Llapa en la FC: LL-01.....	77
Figura N° 4.7: Medidas de infiltración en el distrito de Calquis, FC: C-02	78
Figura N° 4.8: Medidas de infiltración en la FC: M-02.....	79
Figura N° 4.9: Medidas de infiltración en la FC: M-08.....	79
Figura N° 4.10: Capacidad de infiltración en la FC: A-01, distrito Asunción.....	80
Figura N° 4.11: Capacidad de infiltración en la FC: Cz-01	81
Figura N° 4.12: Correlación “r” al cabo de una hora de lluvia en cabecera de cuenca del Jequetepeque.....	83
Figura N° 4.13: Medidas de humedad del suelo en el distrito de El Prado. EP-05.....	85
Figura N° 4.14: Medida de humedad del suelo. FC: LI-01.....	86
Figura N° 4.15: Medidas de humedad de suelo en el distrito Asunción.....	87
Figura N° 4.16: Canal de distribución de usos de agua. EP-05.....	88
Figura N° 4.17: Registro de caudales en la quebrada Llapa.....	89
Figura N° 4.18: Escorrentía de 3.7 L/s de agua. FC: M-07.....	90
Figura N° 4.19: Escorrentía de 12.3 L/s de agua. FC: M-08.....	91
Figura N° 4.20: Escorrentía de 29.69 l/s de agua. FC: M-12.....	92
Figura N° 4.21: Medidas de caudal en el río Los Zarcos. FC: A-01.....	92
Figura N° 4.22: Variaciones de volúmenes de agua. Junio-julio respectivamente. FC: C- 01.....	94
Figura N° 4.23: Geología de la cabecera de cuenca.	96
Figura N° 4.24: Proceso de succionamiento circular de la superficie.....	98
Figura N° 4.25: Proceso de succionamiento amorfo de la superficie.....	98
Figura N° 4.26: Proceso de succionamiento ovoide de la superficie.....	99

Figura N° 4.27: Uso del TIN, para el procesamiento geomorfológico en ArcGIS.....	100
Figura N° 4.28: Variación de la Geomorfología (parte norte y sur de la cabecera de cuenca).....	101
Figura N° 4.29: Intemperismo y formación de horizontes del suelo.....	107
Figura N° 4.30: Empalme de triángulos de Thiessen, estaciones e hidrografía.....	116
Figura N° 4.31: Simulación de caudales a partir de la precipitación. Est. Lives.....	117
Figura N° 4.32: Simulación de caudales a partir de la precipitación. Est. Llapa.....	118
Figura N° 4.33: Simulación de caudales a partir de la precipitación. Est. Porcón.....	119
Figura N° 4.34: Simulación de caudales a partir de la precipitación. Est. Magdalena.....	120
Figura N° 4.35: Simulación de caudales a partir de la precipitación. Est. Asunción.....	120
Figura N° 4.36: Simulación de caudales a partir de la precipitación. Est. Contumazá.....	121
Figura N° 4.37: Variación de las descargas en las cabeceras de cuenca del Jequetepeque.....	122
Figura N° 4.38: Correlación directa e inversa de la presencia de precipitación y descarga de aguas.....	123
Figura N° 4.39: Correlación entre el área y su recarga anual.....	127
Figura N° 4.40: Gráfico de barras de la ubicación de formaciones cóncavas.....	128
Figura N° 4.41: Gráfico cuantitativo del tamaño de formaciones cóncavas.....	129
Figura N° 4.42: Valores de infiltración en las formaciones cóncavas.....	129
Figura N° 4.43: Comparación de la humedad del suelo en cabecera de cuenca.....	130
Figura N° 4.44: Mediciones de caudales en formaciones cóncavas.....	131
Figura N° 4.45: Variación del volumen de agua junio-julio 2012.....	132
Figura N° 4.46: Procesos de hundimiento del terreno en función al tiempo.....	133
Figura N° 4.47: Modelo de la geoformaciones cóncavas.....	134
Figura N° 4.48: Traslado del agua mediante tubería y mangueras a una FC.....	137
Figura N° 4.49: Recarga de aguas en una formación cóncava. Asunción.....	137
Figura N° 4.50: Potenciales recargas de agua.....	138

ÍNDICE DE ANEXOS

8.1	ANEXO CARTOGRÁFICO	148
8.2	ANEXO METEOROLÓGICO.....	153
8.3	ANEXO FOTOGRÁFICO.....	162
8.4	ANEXO GEOLÓGICO.....	167
8.5	ANEXO DE MAPAS.....	168

I. INTRODUCCIÓN

La presente investigación, aborda la recarga de aguas subterráneas en geoformaciones cóncavas. El estudio se ha desarrollado en una de las cuencas con alta demanda de aguas subterráneas, ubicadas en la vertiente del pacífico. Tiene como finalidad buscar alternativas de recargas de agua desde las partes más altas de la cuenca alta utilizando sistemas naturales como sistemas de captación de lluvia.

Para ello, primero se generó una delimitación de la investigación de 1 113 Km² denominado cabeceras de cuenca del río Jequetepeque. El objetivo es identificar geoformaciones de naturaleza cóncava, explicar su génesis y funcionamiento y la posibilidad de utilizarlos como sistemas de recargas de agua subterránea.

En el área de estudio se realizaron diferentes pruebas hidrológicas, edafológicas y geomorfológicas, las cuales consistieron en determinar parámetros de medidas de infiltración, humedad del suelo, el sistema de pendientes, así como una evaluación de los caudales que se generan producto de almacenamientos de agua por cortos y largos periodos de tiempo, las cuales se expresan en aguas subterráneas y superficiales.

Se planteó sistemas de coordinación y trabajos in situ a lo largo de las cabeceras de cuenca del río Jequetepeque. Luego de un trabajo de campo, se utilizaron diferentes herramientas y programas informáticos de Word, Excel y programas especiales como ArcGIS, GR2M con la finalidad de generar un tratamiento y análisis de los datos y establecer cuantificaciones con la finalidad de establecer correlaciones del área de estudio con el sistema de recargas de aguas subterráneas, las cuales se reflejan en las conclusiones y recomendaciones expresadas en la presente investigación.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

El agua cumple un ciclo natural, conocido como ciclo hidrológico. Razón de ello, es de esperar que el recurso agua no aumente pero tampoco disminuya; sin embargo, el gran problema terrestre, se manifiesta básicamente en dos aspectos, primero, la gran demanda del agua en aumento por el incremento poblacional, y en segundo lugar, el deterioro de la calidad de éste; resumido en estos dos problemas básicos, el más crítico es el primero, dado el desequilibrio que genera el incremento de la demanda de agua.

En consecuencia, las demandas de agua a futuro, son una necesidad creciente en correlación con la explosión demográfica. Además el incremento del desarrollo industrial, agrícola, pecuario y otras, conllevan a incrementar la competencia por el agua. Visto en este perfil, el problema es mucho más agudo aun cuando las reservas de agua subterránea son sobreexplotadas para los usos mencionados, alterando los parámetros hidrológicos y con ello la variación natural del ciclo del agua, especialmente en las cuencas de la vertiente del pacífico donde la población alcanza el 64.9% y el recurso hídrico solamente se encuentra en un 1.82%, del total del territorio nacional.

El agua, parte de la materia, obedece a los fenómenos físicos que ocurren en el universo. Uno de los fenómenos físicos, se genera básicamente en las partes altas de los andes, donde por procesos de enfriamiento de las nubes se condensan y forman las gotas de agua, que por efectos de la gravedad caen sobre la superficie terrestre. Una vez en este ambiente, se enfrenta a tres procesos físicos hidrológicos, la evaporación, el escurrimiento o la infiltración. En consecuencia, el recorrido de las aguas se desarrolla de una mayor a menor gradiente, desde las partes altas hacia las partes bajas. Por un lado, el escurrimiento se encuentra comprometida con la velocidad y cantidad, la cual depende de muchos factores, entre ellos: la pendiente, las características de la superficie, la geología, la presencia vegetal, el tipo de suelo, etc., y por otro lado la infiltración bajo la influencia, también, de los factores mencionados anteriormente.

En periodos de lluvia, se observa una creciente pérdida de los recursos hídricos hacia el mar, el transporte de sedimentos y en muchos casos las crecidas generan

inundaciones cuando las precipitaciones se alteran en su curso natural de lluvias. Entonces, ¿Cómo evitar pérdidas de agua en temporadas húmedas, si el agua es escasa en temporadas de estiaje?

Bajo este enfoque, se quiere investigar, qué existe en las partes altas, que ayude a gestionar los recursos hídricos desde las cabeceras de cuenca. Para tal efecto, es importante conocer la geomorfología, el intemperismo, las recargas de agua, algunas formaciones geomorfológicas y otros parámetros ubicadas en las cabeceras de cuenca, como elemento importante de gestión para las recargas de agua de los acuíferos, principalmente en las cuencas de la vertiente del pacífico, dado que las cabeceras de cuenca, presentan geoformaciones, las cuales se les puede utilizar como depósitos naturales contribuyendo a la recarga de agua de los acuíferos.

Adicionalmente, es importante considerar la ocurrencia de eventos extremos, la presencia de inundaciones más pronunciadas y de cortos periodos de duración, con grandes volúmenes de agua en espacios bastante limitados, que son claves en el sistema de almacenamiento y recarga periódica del agua subterránea; y en otros, las sequias prolongadas, la ausencia de agua durante largos periodos, lo cual genera hambre, miseria, pérdida de cultivos, muerte de animales, migración o extinción de especies, (UNESCO, 2006) cuya mitigación depende solamente del agua subterránea, que obliga a realizar estudios de gestión de los recursos hídricos a fin de evitar pérdidas de agua por procesos de escurrimiento incontrolado.

De lo anterior, y dada la carencia de una explicación técnica y científica de la funcionalidad de la cuenca alta (cabeceras de cuenca), y alternativas que constituyan a un buen funcionamiento de estos sistemas, implica diseñar sistemas de evaluación, medición, monitoreo, control, interacción, comportamiento y modelación del perfil geomorfológico y el agua, que se desarrolla en las cabeceras de cuenca, el uso y adecuación de la geomorfología, la geología, el suelo, las plantas y las actividades realizadas en la parte alta, contribuyan a generar un beneficio con el recurso, desarrollar pautas de solución en el sistema de recargas de agua en las cuencas interandinas, el uso y explicación de los colchones de agua como un elemento de formación natural frente al problema grave de la

escasez del agua que ya se manifiesta en muchos lugares, especialmente en la costa, considerado ecológicamente como zona de desierto, donde se concentra la mayor cantidad de población y donde la precipitación es menor a 50 mm al año.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Dado los cuestionamientos anteriores y la imperiosa necesidad del entendimiento y comprensión del comportamiento de las cabeceras de cuenca, el estudio de la geomorfología, y la variación positiva que pueda aportar el ser humano para evitar la disminución y escasas del recurso, es importante resaltar medidas de contingencia frente al problema planteado. En tal sentido, se intenta desarrollar un marco teórico científico y determinar explicaciones técnicas del funcionamiento de las cabeceras de cuenca en las recarga de agua subterránea, así como estudiar metodologías para el uso de la geomorfología natural para el desarrollo de sistemas de recarga de agua que ayudarían a controlar el equilibrio del volumen de los acuíferos; en tal sentido, se plantea el siguiente problema:

1.2.1 Problema general

¿Cómo explicar y utilizar las formaciones geomorfológicas en las cabeceras de cuencas como sistemas de almacenamiento y recargas de agua subterránea frente a los problemas de escasez y mayores demandas de agua?

1.2.2 Sub problemas

1. ¿Cuáles son los parámetros directos e indirectos relacionados con las geoformaciones cóncavas para el almacenamiento y recargas de agua subterráneas?
2. ¿Cuáles son las características geológicas y geomorfológicas de las formaciones cóncavas en cabeceras de cuenca del río Jequetepeque
3. ¿Cómo se relaciona la escorrentía y recargas de aguas subterráneas en geoformaciones cóncavas en las partes altas de la cuenca del río Jequetepeque?

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar fundamentos del proceso de funcionamiento de las formaciones geomorfológicas cóncavas ubicados en las cabeceras de cuenca del río Jequetepeque como sistemas de almacenamiento y recargas de agua frente a los problemas de escasez y mayores demandas del recurso.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Determinar, explicar y relacionar los parámetros directos e indirectos, con las formaciones cóncavas para el almacenamiento y recargas de agua subterránea.
2. Evaluar el comportamiento geológico y geomorfológico de las formaciones cóncavas en cabeceras de cuenca del río Jequetepeque.
3. Estudiar y determinar la escorrentía y recarga de aguas en las parta alta de la cuenca.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se justifica bajo las siguientes premisas:

El uso de la geomorfología natural, como sistemas de almacenamiento y recargas de agua, dada la compleja geografía y la importancia que conllevan las cabeceras de cuencas como sistemas de alimentación y purificación en el origen de aguas subterráneas y posteriormente aguas superficiales.

La inexistencia de metodologías que expliquen cómo funcionan los sistemas de alimentación y recargas de agua en las cabeceras de cuencas, muchas veces desatendida la importancia de la interacción de los agentes circundantes dado que el planeta es un sistema, que bajo la ocurrencia de un fenómeno implica la ocurrencia de otro y con ello favorables o desfavorables para los ecosistemas.

Desde un punto de vista de soporte de los recursos hídricos, las cabeceras de cuenca constituyen el elemento clave del soporte de los recursos hídricos, pues son los espacios donde se originan los ríos y se forman ecosistemas muy distintivos, en tal razón es importante considerar el desarrollo de un marco teórico científico sobre el tema.

Está relacionada, con la búsqueda y contribución de metodologías que nos ayuden a generar un sistema de evaluación a nivel de cuenca y mejor aprovechamiento de la geomorfología natural y artificial, con datos fiables, las cuales nos permitan generar una buena gestión del recurso hídrico, mediante el uso de herramientas geoespaciales y de campo, además, la generación de algunos indicadores precisos, generación de conceptos, optimización del tiempo y distancias, la utilización de Imágenes Satelitales, el uso de Software para un estudio eficiente y la generación de modelos acordes a cada espacio particular de las cuencas del país.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 RECURSOS HÍDRICOS

Los recursos hídricos, es el conjunto de aguas superficiales, subterráneas y atmosféricas, tomado con bastante preocupación en los últimos años, debido a que es un recurso natural altamente sensible a los efectos del cambio de diversas variables atmosféricas y antrópicas. Los recursos hídricos dependen del ciclo del agua: la precipitación, la intensidad de temperatura, la cantidad de evaporación, la infiltración, la presencia de plantas y todos los sistemas asociados a éste.

Para la Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, (FCIHS, 2009, p.31), menciona respecto al tema que, “tradicionalmente se consideraban únicamente los llamados recursos hídricos convencionales, que incluyen las aguas superficiales y subterráneas. Además estas dos componentes están directamente interrelacionadas al tratarse de dos de los elementos del ciclo hídricos”. Los recursos hídricos por tanto comprende el recurso agua en la totalidad, es decir los tres estados, lo cual comprende el ciclo hidrológico.

Los recursos hídricos para la UNESCO (2003), sólo se pueden comprender en el contexto de la dinámica del ciclo del agua. Estos recursos se consideran como renovables (excepto algunas aguas subterráneas), pero solo dentro de límites bien establecidos ya que, en la mayoría de los casos, el agua fluye por cauces más o menos determinados. Los recursos hídricos son variables, tanto en el tiempo como en el espacio, con enormes diferencia de disponibilidad en distintas partes del mundo y amplias variaciones estacionales y anuales en las precipitaciones en muchos lugares.

Los recursos hídricos, se estudian por su ubicación en diferentes espacios, tales como: en la atmosfera, las aguas atmosféricas; en la superficie del suelo, las aguas superficiales y debajo de la superficie terrestre, las aguas subterráneas. Las ciencias encargadas de su estudio son la hidrología y más específicamente la hidrogeología en el caso de las aguas subterráneas.

2.1.1 Aguas Atmosféricas

Las aguas atmosféricas, llamadas así porque se encuentran en el espacio atmosférico en estado gaseoso formando las nubes, posteriormente neblinas, lluvia o granizo. Las aguas atmosféricas ocupan básicamente las dos primeras capas, siendo la tropósfera la más influyente sobre este fenómeno.

Para Chow, Maidment y Mays, (1994), el agua atmosférica existe principalmente como un gas o vapor, que en el tiempo y espacio, puede convertirse en líquido o en las pequeñas gotas de agua formando las nubes; o puede convertirse en sólido: nieve, granizo o cristales de hielo. La cantidad de vapor de agua en la atmosfera, según el autor, es menor que una parte en 100 000 de toda el agua de la tierra, pero cumple una función vital en el ciclo hidrológico. Para Monsalve, (2002), el vapor de agua producto de la evaporación de océanos, ríos, lagos y embalses, puede llegar en regiones tropicales a ser el 4% del volumen del aire natural.

Para Bradient, Huber y Vieux (2008), sostienen que el sistema de aguas atmosféricas, está asociado a la radiación solar y caracterizada por las masas de aire en acción; en este ambiente entra en interacción la circulación de los vientos en general, este fenómeno genera cambios de temperaturas y precipitación, resultado del movimiento de masas de aire húmedo y condiciones típicas de temperatura que generan la condensación, originando la caída de agua en sus diferentes formas.

Estas aguas, que forman parte del ciclo hidrológico, resultan del proceso de la evaporación del agua líquida desde ríos, mares y lagos, sumando la transpiración, que resulta del proceso natural de los seres vivos. El vapor de agua, finalmente forma masas de aguas atmosféricas, que luego por procesos físicos son las que originan la precipitación y con ello la alimentación y crecida de ríos en épocas de lluvias, así como el fenómeno de infiltración en espacios con características propias para este fenómeno.

2.1.2 Aguas superficiales

Son las aguas que discurren por la superficie terrestre. Estas aguas se rigen por la pendiente que presenta el espacio geográfico denominado cuenca, donde los ríos colectores, confluyen las aguas hacia un río recolector, en torno al cual se teje la delimitación de la cuenca. También forman parte de estas aguas, las aguas lenticas, formadas por amplios espacios como los lagos o pequeños espacios como las lagunas, las cuales se almacenan en formaciones denominadas depresiones (Monsalve, 2002).

Para Chow, et al, (1994, p.131), “el agua superficial, es la que se almacena o se encuentra fluyendo sobre la superficie de la tierra”. Por consiguiente el agua que se encuentra escurriendo por los cauces, forman las aguas superficiales; éstas, resultan de la precipitación, el deshielo de los nevados o el flujo de las aguas subterráneas mediante afloramiento, las cuales alimentan a los cursos de agua de los ríos. De esta manera la FCIHS, (2009, p. 110), afirma que “no necesariamente toda el agua que circula por los ríos procede de la lluvia. Parte del caudal del río puede originarse por las descargas de agua subterránea procedente de un acuífero sobre el cual discurre. Así, se llama río efluente o río ganador al que drena un acuífero subyacente. Y al contrario, un río influente o río perdedor es aquel que alimenta un acuífero por infiltración”.

Las aguas superficiales, discurren sobre un determinado espacio denominado cuenca, la cual limita los cursos de agua desde las partes superiores hasta su confluencia en un colector, el cual puede ser un océano o un lago como el caso del Lago Titicaca.

Las aguas superficiales, durante su trayecto, se encuentran dispuestas a seguir otros procesos, debido a parámetros atmosféricos (evaporación) y físicos (absorción, infiltración y escorrentía).

2.1.3 Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas, son parte de las aguas dulces existentes en el planeta tierra, éstas, representan alrededor del 2.4 % del agua total del planeta, de las cuales sólo el

0.68% del total, se encuentra en forma de agua subterránea, suponiendo un volumen de 9.5 millones de Km^3 , que respecto a las aguas superficiales, representa el 70% de las reservas de agua dulce, (FCIHS, 2009).

Para Chow, et al. (1994), Existen tres procesos importantes en el flujo de agua subterránea: la infiltración, la cual se convierte en humedad del suelo, el flujo subsuperficial o flujo no saturado y el flujo de agua subterránea o flujo saturado; estos procesos de ocurrencia con el agua dentro del suelo, se encuentra relacionado con los medios porosos, los cuales se encuentran en razón de la textura del suelo, la estructura y las formaciones geológicas de un determinado espacio.

Las aguas subterráneas, agrupa al conjunto de aguas que discurren por debajo de la superficie terrestre formando corrientes de agua y acuíferos, transitan por espacios vacíos o fisuras de las rocas en dirección de la gradiente hidráulica; sus velocidades de escurrimiento son muy lentas, respecto a las aguas superficiales medidas en cm/día , cuyas antigüedades de almacenamiento pueden datarse a través de radioisótopos. (Moser, 1990).

La geología cumple un rol importante sobre las aguas subterráneas, pues, los lugares de almacenamiento de agua, se denominan acuíferos; los acuíferos varían en extensiones geográficas de menos de 10km^2 a más de 1000 km^2 (World Bank, 1999). Su sistema de recargas, generalmente se debe a la ocurrencia de lluvias, requisitos para infiltrarse en la superficie terrestre en suelos relativamente permeables. Estos procesos de infiltración, ocurre tanto en forma directa (sentido difuso) e indirectamente (lechos de los cursos de agua) tanto efímeros como permanentes.

Muchas naciones se van interesando por las aguas subterráneas, ya sea por las condiciones de conservación de la calidad de las aguas superficiales o la ausencia de estas; sin embargo, las aguas subterráneas han sido y son el sustento de agua en las zonas rurales. En África y América Latina, el agua subterránea tiende a ser de un uso primario, así como en el desarrollo de la agricultura, básicamente en épocas de sequías, tal es la tendencia que Bangladesh, utiliza en riego el 69 por ciento de agua de origen subterráneo, la India en un

53 por ciento, Argentina 25 por ciento, Perú 11 por ciento, entre otros (Foster, Chilton, Moench, Cardy y Schiffler. 2000).

En el estudio de las aguas subterráneas, la interpretación hidrogeológica en un determinado espacio, supone construir un modelo conceptual para identificar cómo funciona el sistema de aguas subterránea, mediante la identificación de los procesos de recarga, el régimen tridimensional del caudal, las áreas de descarga y la relación las aguas superficiales, UNESCO (2003). Por lo cual esto constituye una base del conocimiento científico necesario para la gestión y protección de los recursos hídricos a nivel de espacios delimitados llamados cuencas.

Dado que las aguas subterráneas recorren espacios y largas distancias por distintos tipos de material poroso, es susceptible la formación de procesos de disolución, donde los solutos, formado por partes minerales y sales disueltas, irrumpiendo su calidad. Así mismo, existen otros fenómenos de carácter antrópico que influyen sobre la calidad del recurso, como es el caso de la disposición de aguas servidas, rellenos sanitarios, agroquímicos, depósitos mineros, entre otros.

Los estudios para analizar el potencial y reserva de aguas subterráneas son altamente costosos. En el Perú se ha desarrollado muy poco el estudio y evaluación de la presencia de acuíferos básicamente en la sierra y selva del país, sin embargo se proyecta que nuestro país, así como tiene un alto potencial de agua superficial, también se repita para las aguas subterráneas.

2.1.4 Glaciares

Son depósitos de agua en estado sólido, que se acumulan en la parte alta de las montañas y cordilleras por procesos físicos y meteorológicos. La causa principal para la formación de los nevados son las bajas temperaturas existentes en estos espacios. Los glaciares, son depósitos de agua, que por procesos de fusión, originan las primeras escorrentías e infiltraciones, dando origen a los riachuelos (primeras escorrentías

continuas), a través del lento proceso de derretimiento debido a la insolación y el incremento de temperaturas.

La distribución de los glaciares a lo largo de la Cordillera de los Andes, está en función a la latitud; por lo cual, las aguas de algunas cuencas de la vertiente del Océano Pacífico, son producto del derretimiento de glaciares.

Nuestra cuenca en estudio (cuenca del río Jequetepeque), se encuentra ubicada cerca de la región tropical, región del pacifico tropical, como una continuación de los sistemas básicos de las montañas de los andes (Bonell, Hufschmidt y Gladwell, 1993), así mismo en la mayor parte de la cordillera la existencia de los glaciares determinan la continua escorrentía tanto en los meses de invierno como de verano, alimentando la escorrentía en las partes bajas.

A diferencia de la parte central y sur de la Cordillera de los Andes, en el norte, los glaciares no forman parte de las altas cumbres, de ahí la importancia en el sostenimiento y estudio de estas zonas carentes de glaciares pero capaces de mantener importantes fuentes de agua que alimentan los cursos de aguas en diferentes vertientes.

2.1.5 Calidad de las aguas

El agua, presenta una propiedad muy interesante, es el disolvente universal por excelencia, dado que el agua es un cuerpo altamente capaz de captar las sustancias que se encuentran a su alrededor; entonces, debido a la presencia de diversos vertidos y el tránsito por diversos espacios, la mezcla ocurre inevitablemente.

En el caso de las aguas subterráneas el proceso de contaminación generalmente es natural, sin embargo también incide las actividades antrópicas como focos puntuales de contaminación, tales son el caso de las recargas y drenajes que se realiza desde los campos agrícolas quienes utilizan altas concentraciones de agroquímicos los cuales infiltran hacia los acuíferos, y por otro lado los relaves mineros y pasivos ambientales, cuyos efectos

pueden notarse en días, décadas o centurias de años debido al lento tránsito de las aguas subterráneas (Foster, et al. 2000).

En el caso de las aguas superficiales, para Vargas (2006), uno de los factores de la alteración de la calidad del agua, son los factores antrópicos, tal es el caso de la calidad de las aguas del río Rímac, cuyas aguas se han modificado profundamente por las actividades humanas, donde, las descargas minero-metalúrgicas sin tratamiento previo de la mina Casapalca, las descargas domésticas del mismo centro minero hasta el mar, entre otros focos, representa la alta alteración de las aguas del río Rímac en todo su recorrido, lo cual indica la deficiencia en la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río hablador; sin embargo, este no es el único caso, situación que se repite en muchas otras cuencas a nivel nacional y mundial, especialmente en países en desarrollo.

Las fuentes de contaminación, a nivel superficial, pueden ser puntuales como también, no puntuales. En el caso de las primeras son el sector industrial el principal agente, y como fuentes difusas, está representada por las actividades agrícolas, uso de pesticidas y fertilizantes agrícolas.

Por otro lado, en el caso de las aguas subterráneas, según la FCIHS (2009), la calidad en estos ambientes, dependerá de tres factores principales: la climatología, el quimismo del agua de recarga y la composición litológica de la estructura sólida del acuífero. Por lo general la calidad del agua subterránea es buena, sin embargo existen indicios que debido al recorrido por diferentes estratos de diferente composición, puede comprometer la calidad del agua subterránea (Deutsch, 2000); esto implica, con fines de utilización se debe realizar un análisis previo de las características del recurso, descartando parámetros que podrían alterar su calidad.

Para Clarke y otros, 1996, (citado por la UNESCO, 2003), los acuíferos son menos vulnerables a la contaminación debido a que estas masas de aguas se encuentran protegidos de manera natural por el suelo, sin embargo debido a las grandes cantidades y a los largos periodos de permanencia, cuando los acuíferos se contaminan, esta contaminación se hace persistencia y es difícil de eliminar.

2.2 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUAS

El origen de las aguas superficiales y subterráneas, se encuentra bajo el régimen del principio del ciclo hidrológico. Lo que se pretende estudiar, es una parte de este ciclo, el sistema de alimentación y origen de las aguas subterráneas (recargas) básicamente en la parte alta de las cuencas y precisar un sistema de recarga y alimentación continua, las cuales sustentan la dinámica de la cuenca con la presencia de agua superficial.

Por su parte el INADE (2002), menciona que las recarga de agua de los acuíferos, ante la ausencia de lluvias en la costa, se produce mayormente en el lecho del río, acequias sin revestir, campos muy permeables regados en exceso, y campos con cultivos de alta demanda de agua, como el arroz y la caña de azúcar. También argumenta que, la hidrología de los ríos de la costa determina los períodos de carga y descarga de los acuíferos subterráneos. El período de carga coincide con el período de avenida de los ríos, cuando se declara toma libre para que el agua circule sin restricciones por todas las acequias del valle, y los usuarios agrícolas utilicen toda el agua que necesiten.

Así mismo, el INADE, sustenta que el pico de la curva de recarga de los acuíferos no coincide con el pico de descargas del río. Hay un desplazamiento de uno a tres meses que depende de la distancia del pozo a los lugares de mayor recarga, por lo general el lecho del río y de la permeabilidad de los acuíferos por donde fluye el agua subterránea. El período de descarga de los acuíferos se realiza durante el estiaje de los ríos y, por consiguiente, el aprovechamiento de los acuíferos es mayor en los años secos, cuando las demandas de agua son superiores a los caudales disponibles en los ríos.

El sistema de recargas, se encuentra asociado al ciclo hidrológico, en la cual ocurre el fenómeno de la condensación de las nubes originando pequeñas gotas de agua, las cuales forman la lluvia; esta lluvia, abarca espacios indistintos, donde ocurre otro nuevo proceso que es la infiltración, la escorrentía, la absorción por parte de las plantas o la evaporación.

2.2.1 Escorrentía

La escorrentía, es parte del ciclo hidrológico, constituido por el agua que fluye sobre la superficie del suelo o dentro de él (Molina, 1975); el agua que da origen a las aguas de escorrentía, son las aguas atmosféricas y los afluentes de aguas, cuyo origen son las aguas subterráneas.

Monsalve (2002), menciona que la escorrentía superficial es el fenómeno más importante desde el punto de vista de ingeniería, la cual comprende el exceso de la precipitación que ocurre después de una lluvia intensa y se mueve libremente por la superficie del terreno, también puede ser alimentado por el afloramiento de aguas subterráneas.

Para la FCIHS (2009), diferencia entre la escorrentía superficial, como la parte de agua de lluvia precipitada que no llega a infiltrarse en el terreno y que circula por la superficie en forma de torrentes, ríos o arroyos, cauces que forman una red hidrográfica; y por otro lado la escorrentía subterránea, como la parte del agua que se infiltra y lleva a la zona saturada incorporándose a las aguas subterráneas de un acuífero.

Por su parte Villón, (2011), menciona que la escorrentía es el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega finalmente a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca; identifica tres tipos de escorrentía: escorrentía superficial, subsuperficial y escorrentía subterránea.

La escorrentía superficial, se inicia desde las zonas de precipitación, generalmente concuerda geográficamente con las partes altas de una cuenca (cabeceras de cuenca), a partir de estos espacios, se van juntando y confluyendo en las primeras escorrentías con la formación de pequeñas cárcavas que luego van originando las quebradas para luego confluir en espacios más organizados que son los ríos, cuya escorrentía final son los océanos. Para Vásquez (2012), con la finalidad de aprovechar esta escorrentía, es necesario la construcción de obras hidráulicas tal es el caso de zanjas o acequias de infiltración, cuyo fin también es la conservación de suelos y cosechas de agua.

La escorrentía, se encuentra directamente relacionada con algunos parámetros de la superficie terrestre; la pendiente, es uno de ellos, dado que a mayor pendiente, las aguas superficiales tienden a escurrir superficialmente antes que infiltrarse, así mismo la vegetación es un parámetro inverso al escurrimiento, a mayor vegetación menor escorrentía.

2.2.2 Infiltración

Para Martínez y Navarro (1995), la infiltración, es el movimiento de agua a través de la superficie del suelo hacia su interior producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares; así mismo Molina, (1975), sostuvo que la rapidez con que el agua se infiltra en el suelo, es un factor muy importante en la formación o no de la escorrentía.

Por otro lado, la infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el interior del suelo, Chow, et al (1994); también argumenta que, la infiltración es un proceso muy complejo que puede describirse mediante ecuaciones matemáticas solamente en forma aproximada.

En tal sentido, la infiltración es un evento importante a analizar en los estudios de hidrología superficial y subterránea, este es un elemento cuya consecuencia se refleja en las recargas de agua o las pérdidas de aguas superficiales temporales; los niveles de infiltración, se encuentran relacionados con un conjunto de factores externos, entre ellos la geomorfología, la textura y estructura del suelo, así como las formas complejas de meteorización de la rocas (Alcántara, 2013).

Los diferentes eventos externos, condicionan y direccionan el transitar de las aguas dentro o sobre la superficie terrestre, las cuales se enfrentan a otras condiciones como la velocidad y la densidad de las mismas, dado que las aguas subterráneas pueden tener recorridos en mm/día, que dependiendo de los espacios de infiltración, se los puede clasificar como espacios permeables, semipermeables e impermeables.

Los espacios permeables, generalmente lo constituyen sustratos de naturaleza arenosa y limosa o expansión o líneas porosas expresados en fallas geológicas. Los espacios semipermeables, son ambientes que limitan en cierta medida la velocidad de infiltración de las aguas en su recorrido vertical. Los ambientes impermeables, son los espacios que limitan en sobremanera la escorrentía subterránea del agua infiltrada o en proceso de infiltración.

En última instancia podemos decir que, cuando el agua precipita, tiene tres caminos por recorrer: la escorrentía, la evapotranspiración o la infiltración; cada uno de estos fenómenos se comporta independientemente de las condiciones del medio donde ocurre los fenómenos por lo que nunca son equiparables.

Existen varios métodos para calcular la infiltración:

A. Método de Green y Ampt (1911)

Green y Ampt (1911), propusieron un análisis de la infiltración del agua en el suelo, este cálculo analítico, evalúa la tasa de infiltración a una determinada profundidad, Polo, et al (2003), donde el frente húmedo avanza saturando el suelo con agua una profundidad L , como se ilustra en la figura 01, partiendo del supuesto teórico que se tiene una cantidad de humedad inicial θ_i , pues a medida que avanza el frente húmedo va disminuyendo la porosidad libre por lo que se tiene $(\eta - \theta_i)$, (η) porosidad; en consecuencia, el incremento de volumen de agua estará dada por $L(\eta - \theta_i)$, cuya ecuación es la infiltración acumulada F .

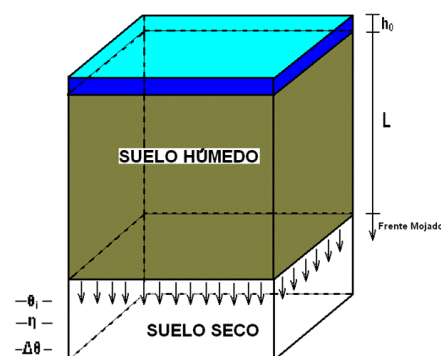


Figura N° 2.1: Esquema del frente mojado.

$$F = L(\eta - \theta_i) \quad (2.1)$$

Donde: $\Delta\theta = (\eta - \theta_i)$; ($\Delta\theta$) variación del contenido de humedad del suelo.

Por lo tanto

$$F = L\Delta\theta \quad (2.2)$$

De otro lado, la tasa de infiltración f , (LT^{-1}), en relación con la infiltración acumulada, está dada por la siguiente ecuación.

$$F(t) = \int_0^t f \, dt \quad (2.3)$$

De donde, inversamente se obtiene:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.4)$$

De la ecuación del momentum, dado por la ley del flujo de Darcy.

$$q = -k\left(\frac{\partial h}{\partial z}\right) \quad (2.5)$$

Entendiendo que el flujo de Darcy es constante, se tiene $q = -f$; así mismo, analizando la diferencial de h , la cual estaría dado por $h = h_1 - h_2$; al mismo tiempo que $h_1 = h_0 = 0$, toda vez que el encharcamiento de agua, se hace cero, y h_2 , subsiguientemente del frente mojado, está dado por $-\psi - L$, donde (ψ) grado de succión y (L), avance del frente mojado; al mismo tiempo que $z = z_1 - z_2 = L$, donde (z) avance del agua por gravedad; por consiguiente, la ecuación estaría dada por:

$$f = k\left(\frac{\psi+L}{L}\right) \quad (2.6)$$

Reemplazando L de (2.1), se tiene

$$f = k\left(\frac{\psi\Delta\theta+F}{F}\right) \quad (2.7)$$

Reemplazando la tasa de infiltración por la derivada (2.4), se tiene:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = k \left(\frac{\psi \Delta \theta + F}{F} \right) \quad (2.8)$$

$$\left(\frac{F}{\psi \Delta \theta + F} \right) \partial F = k \partial t \quad (2.9)$$

$$\left(1 - \frac{\psi \Delta \theta}{\psi \Delta \theta + F} \right) \partial F = k \partial t \quad (2.10)$$

Integrando

$$\int_0^F \left(1 - \frac{\psi \Delta \theta}{\psi \Delta \theta + F} \right) \partial F = \int_0^t k \partial t \quad (2.11)$$

Se tiene

$$F(t) = kt + \psi \Delta \theta \ln \left(\frac{\psi \Delta \theta}{F} + 1 \right) \quad (2.12)$$

B. Forma unidimensional de la ecuación de Richard (1931)

La ley de Darcy para un medio poroso se describe como:

$$\frac{Q}{A} = q = K S_f \quad (2.13)$$

Donde: K es la conductividad hidráulica y S_f , es el grado total de flujo.

En un cubo de suelo, si se considera el flujo de agua en dirección hacia el centro de la tierra y utilizamos un h como grado total de flujo, se tiene que $S_f = -\frac{\partial h}{\partial z}$, el signo negativo indica la acción de la fricción del suelo en la disminución del flujo, por lo que q, se expresaría como la ecuación (2.13)

C. El método de Horton (1939)

Horton observó, que la infiltración empieza con una tasa de infiltración f_0 , y que luego alcanza un valor constante f_c , obteniéndose la siguiente ecuación:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (2.14)$$

Donde (k), constante de decaimiento (T^{-1}), f_0 es la capacidad de infiltración inicial y f_c es la capacidad de infiltración final.

D. Método de Phillips (1969)

A partir de la ecuación de Richards, y suponiendo que K y D pueden presentar una variabilidad en función al contenido de humedad (θ) en el suelo y empleando la transformación de Boltzmann $B(\theta) = zt^{-1/2}$ para convertir la ecuación unidimensional de Richards en una ecuación ordinaria para B, llegando a la infiltración acumulada, después de un procedimiento de series infinitas se llega a la siguiente ecuación:

$$F(t) = St^{1/2} + Kt \quad (2.15)$$

Donde: S es un parámetro de adsorción y K, la conductividad hidráulica; que luego por diferenciación se obtiene:

$$f(t) = \frac{1}{2}St^{-1/2} + K \quad (2.16)$$

Sin embargo, para la infiltración, también se debe considerar las características del suelo y la topografía del terreno; también influyen en las fuentes de alimentación e infiltración de las aguas, la presencia de las rocas que es otro elemento a considerar por presentar características distintivas que ayudan el escurrimiento de las aguas entre las fisuras o fracturas rocosas, el desgaste y socavamiento, lo que finalmente implica un largo recorrido en tiempo y distancias originando los acuíferos subterráneos.

Cálculo de infiltración pluvial mensual

Los datos obtenidos en campo mediante los métodos de la prueba de anillos aplicados en la superficie o con la prueba de Porchet u otro método (Schoninsky, 2007), son utilizados para determinar la infiltración mensual y poder comparar con otros

parámetros para explicar la funcionalidad de las geoformaciones cóncavas, como parte de los objetivos de la presente investigación.

Para el cálculo de la infiltración pluvial mensual, se tiene en cuenta la ecuación 2.17, para calcular la retención mensual de lluvia por el follaje.

$$Ri = Px Cf \quad (2.17)$$

Donde:

Ri = Retención de lluvia en el follaje (mm/mes)

P = precipitación mensual del mes (mm/mes)

Cf = Coeficiente de retención del follaje (adimensional).

Cuando la precipitación es menor a 5mm/mes, la $Ri = P$, dado que al menos 5mm son retenidos por el follaje, sin llegar al suelo (Schosinsky & Losilla, 2000; citado por Schosinsky, 2007). Además, se considera que la retención de lluvia por el follaje es del 12% de la precipitación mensual (Buther, 1957, citado por schosinsky, 2007) y en bosques muy densos, se considera el 20% de la precipitación (Linsley et al, 1958, citado por Schosinsky, 2007), expresado en tanto por 1.

Por otra parte, se debe encontrar el coeficiente de infiltración del suelo, el cual está dado por la ecuación 2.18.

$$Ci = Kp + Kv + Klb \quad (2.18)$$

Donde:

Ci = Coeficiente de infiltración (adimensional).

Kp = Fracción de la infiltración por efecto de la pendiente (adimensional).

Kv = Fracción de infiltración por efecto de cobertura vegetal (adimensional).

Klb = Fracción que infiltra por la textura del suelo (adimensional).

Solamente, cuando $Ci \geq 1$, toma el valor de 1.

K_p y K_v , son parámetros que se encuentran a partir de los cuadros N° 2.1 y 2.2, (Schosinsky, 2007) y para determinar K_{ib} , se utiliza la ecuación 2.19.

$$K_{ib} = 0.267 \ln I_b - 1.54 \times 10^{-4} I_b - 0.723 \quad (2.19)$$

Donde;

K_{ib} = Coeficiente de infiltración por la textura del suelo (adimensional).

I_b = Infiltración básica del suelo (mm/día).

Luego la infiltración pluvial está dado por la siguiente ecuación:

$$I_m = C_i x (P - R_i) \quad (2.20)$$

Cuadro N° 2.1: Componente pendiente del coeficiente de infiltración.

Denominación de pendiente	Porcentaje de Pendiente	K_p
Muy plana	0.02% - 0.06%	0.30
Plana	0.3% - 0.4%	0.30
Algo plana	1% - 2%	0.15
Promedio	2% - 7%	0.10
Fuerte	Más de 7%	0.06

Fuente: Schosinsky & Losilla, 2000, Citado por Schosinsky, 2007

Cuadro N° 2.2: Componente vegetal del coeficiente de infiltración

Cobertura vegetal	K_v
Cobertura con zacate menos del 50%	0.09
Terrenos cultivados	0.10
Cobertura con pastizal	0.18
Bosques	0.20
Cobertura con zacate más del 75%	0.21

Fuente: Schosinsky & Losilla, 2000, Citado por Schosinsky, 2007

2.2.3 Recargas

Según la lengua española, recarga significa volver a cargar (Diccionario Océano Uno, 1989), ampliando el significado hacia los recursos hídricos, es volver a cargar aguas.

Las recargas de aguas, resulta de los procesos del exceso de lluvias que ocurre en la superficie en áreas con características de suelos permeables. Esto ocurre en ambas direcciones en un medio difuso o en los espacios de los cursos de agua World Bank, (1999). Por lo cual es importante identificar estos espacios de recargas de agua; así mismo una importante recarga de aguas proviene de los canales y los campos de irrigación, para Vásquez (2012), las recargas en la parte alta también se pueden realizar mediante los sistemas de zanjas de infiltración.

Las aguas dentro del subsuelo, se convierten en aguas subterráneas. Las aguas subterráneas, tienen movimientos lentos desde las zonas de recargas, lugares que favorecen la filtración producto de las precipitaciones y/o escorrentía superficial, hasta las zonas de descarga siendo algunos de ellos los manantiales y percolaciones, a los cursos de agua, humedales y las zonas costeras (Zektser, 1999, citado por la UNESCO, 2003).

La recargas de aguas se realiza en forma estacional, dado las épocas húmedas, que para nuestro caso corresponde a los meses de octubre hasta abril aproximadamente, y espacialmente corresponden a los lugares donde se generan las lluvias y donde los suelos están acondicionados para este evento.

Foster y otros (2000), citado por la UNESCO (2003). Manifiestan, que los acuíferos no presentan necesariamente un parámetro constante, es más, están sujetos a considerable incertidumbre, puesto que varía con los cambios de usos de tierras y vegetación, cambios de regímenes de cursos de aguas superficiales, descenso de la capa freáticas por procesos de extracción, entre otros.

Por consiguiente, las cargas de agua, es el flujo unitario que penetra en cierto tiempo al medio saturado, ANA (2009); las recargas de agua, se encuentran relacionados con el aporte de agua hacia las aguas subterráneas, incrementando los acuíferos, quienes finalmente son explotados para diversos usos, básicamente en la parte baja de una cuenca.

2.3 EVENTOS EXTREMOS

Son fenómenos naturales, relacionados con la escasez o abundancia del recurso agua, estos fenómenos vienen acompañados por otro fenómeno natural que sucede durante miles de años, denominado cambio climático, el último de los cambios climáticos ocurridos, fue hace 250 000 años, eso significa que los cambios en el clima de nuestro planeta suceden paulatinamente de una manera imperceptible; sin embargo lo que preocupa, es la aceleración de este fenómeno natural , inducido por un conjunto de parámetros como: procesos de degradación de tierras, fenómenos de contaminación natural, movimientos geológicos, etc. Para Fernández, (2002) el cambio climático actual, se inició hace unos 200 años, debido a las nuevas actividades humanas, el acelerado proceso productivo, los cambios drásticos de la superficie, cambios de uso de la tierra, el agua, el mar, modificación de la biodiversidad autóctona, etc.

El cambio climático, incide sobre el ciclo hidrológico mundial, la cantidad y calidad del recurso hídrico (UNESCO, 2009), dado que los procesos de desglaciación van ocurriendo a una enorme rapidez, problema de preocupación mundial observado en los dos últimos decenios, lo que implica una disminución del flujo de agua superficial, debilitando los ecosistemas acuáticos y ecológicos, esto genera a su vez, otros eventos externos, tales como el aumento de las demandas de agua para los sectores poblacionales e industriales. Por otro lado, los trasvases, los cambios de curso de aguas y eliminación de caudal ecológico, también alteran el normal desarrollo ambiental del agua, dado que modifica el ciclo hidrológico.

Estos eventos extremos, estarían representados por: inundaciones y sequías; es decir con sequías de mayor duración y más prolongadas, y por otro lado lluvias más intensas de corta duración y en espacios puntuales, con la consiguiente variación en el régimen e incremento de las inundaciones.

2.3.1 Las inundaciones

Bediente, et al (2008, p.709), define a las inundaciones como “eventos generales y temporales que cubre superficies con lluvias que sobrepasan los niveles de los ríos y la inusual acumulación de agua en los cauces, las cuales pueden estar asociados con efectos desfavorables a la vida y la propiedad”.

Las inundaciones, son fenómenos naturales que han ocurrido continuamente durante temporadas discontinuas en el transcurso del proceso evolutivo e histórico de la tierra, siendo uno de los eventos más notorios en nuestro país la del fenómeno del Niño, un evento oceánico atmosférico del pacífico sur. Durante los años 1983 y 1998, se generaron precipitaciones extraordinaria de 1761mm en la Estación San Miguel; 2340 mm en la estación del Aeropuerto de Piura, 2957.7mm en la población costera de El Alto, y un record de 4167 mm en el distrito de Chulucanas (ANA, 2009), lo que significó en 1983 una lluvia de casi “50 años normales”, (diapositivas de Guerrero, 2010) lo que conllevó a serias inundaciones, sin embargo son fenómenos que ocurren en intervalos de tiempos casi constantes, empero, las actividades antrópicas están influyendo en los procesos climáticos y con ello en la frecuencia y magnitud de las inundaciones, tales como, inundaciones de mayor magnitud pero en cortos periodos de tiempo, lo cual genera altas consecuencias al ambiente y las actividades humanas básicamente rurales.

Estos procesos de cambios, no solamente son a nivel local, sino también son producto de eventos globales, dado los procesos de circulación atmosférica del agua. Según la UNESCO (2003) el cambio climático probablemente nos conducirá a un conjunto de anomalías del ciclo hidrológico, relacionado con inundaciones, sequías, en algunos lugares, para otros con tifones y ciclones; así en 1998 en monzón, en Bangladesh ocasionó la peor inundación de su historia; Venezuela en 1999, soportó una lluvia de dos días equivalente a dos años, y con ello los desastres ecológicos, pérdidas de vidas humanas y cuantiosas pérdidas económicas.

Las inundaciones, influyen en las actividades económicas, su frecuencia, genera un retraso a la agricultura, la pesca, la reproducción animal, las recargas de aguas subterráneas

o la conservación de la biodiversidad y bioproductividad (World Bank, 2003). Frente a ello, es importante evaluar la influencia de estos fenómenos en las cabeceras de cuenca donde no existen glaciares; más aún, debemos tener en cuenta que cuando se generan lluvias intensas en las cabeceras de cuenca, es predecible tener influencia de inundaciones aguas abajo, por lo que falta una gestión en la parte alta para evitar, controlar o manejar este tipo de eventos extremos.

2.3.2 Las sequías

Las sequías, son fenómenos complejos cuya ocurrencia está relacionada con la escasez prolongada de agua en un lugar, zona o región.

Las sequías están relacionadas con los periodos críticos de agua, periodos en las cuales los records históricos pueden ser críticos con respecto a los requerimientos de las demandas de agua en un sistema, (Millan y Yevjevich, 1971)

Las sequías son definidas como las diferencias entre los procesos de suministro de agua y las demandas, (Guerrero y Yevjevich, 1975), según los autores, las sequías son sucesiones de periodos en que la demanda de agua es insatisfecha, planteando un análisis entre las series cronológicas que representa la disponibilidad del recurso y las necesidades para definir sus propiedades de interés como: duración, intensidad, magnitud, inicio y término.

Teniendo en cuenta que la franja costera es normalmente árida, el estudio de sequías debe referirse a la parte alta y húmeda de la cuenca de donde proviene el agua (INADE, 2002), el cual está relacionado al mismo tiempo con la ausencia de precipitaciones en las épocas correspondiente a este fenómeno, lo que conlleva una cadena de sucesos en la parte media y baja de la cuenca.

Desde otro punto de vista, las sequías, tienen una definición de acuerdo al requerimiento, necesidad o tipo de actividad (Salas, 2010), así por ejemplo, se puede hablar de una sequía relacionada con la escases de caudales en los ríos, la escases de

lluvias, escases de agua poblacional, entre otros, ya que las actividades relacionadas con ellas están en función a diferentes parámetros de uso, calidad y cantidad del recurso hídrico. Para nuestro caso, también es importante evaluar la influencia de las sequías sobre las cabeceras de cuenca y el impacto en las aguas subterráneas.

2.4 CUENCAS

La cuenca, es un espacio físicamente delimitado por el divertium aquarium. Las aguas por precipitación que caen en un espacio, son derivadas por fenómenos geográficos y de gravedad hacia un colector común, el cual va a dar lugar al río principal, cuyo cauce termina en el océano o lago receptor.

Sin embargo, las cuencas han sido definidas de diferentes maneras, con frecuencia por especialistas que han destacado los factores que le son afines. Entre las primeras definiciones formuladas están la de los hidrólogos.

A continuación se presenta algunos conceptos citados por la Coordinadora de Ciencia y Tecnología en los Andes (CCTA, 1999); quien hace referencia a diversos autores, así: El área que recoge la lluvia que alimenta una corriente se conoce con el nombre de cuenca (Tamayo, 1949); también se puede definir como un área de escurrimiento, que incluye laderas, riachuelos, lagos, de los cuales todo el caudal sale a través de una desembocadura común de flujo. Es un área de escurrimiento, es un ecosistema de tamaño conveniente con fronteras definidas. (Odum, 1990)

Para Aparicio (1996), la cuenca es una zona de superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

Por su parte Villón (2011), la cuenca es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua, la cual está delimitado topográficamente por las partes más altas.

En este sentido, la cuenca es un espacio geográfico, donde cada una de las gotas de lluvia que caen en este espacio recorren en una dirección a favor de la gravedad, generando cursos de agua menores hasta su desembocadura en el curso de un río principal el cual generalmente toma el nombre de la cuenca. Para nuestro caso, la cuenca en la cual se está realizando el estudio es la cuenca del río Jequetepeque, cuyo río principal toma el mismo nombre.

2.4.1 Características de la cuenca

La cuenca, es el espacio determinante de un conjunto de factores de la cual dependen el conjunto de sistemas ecológicos; es en este espacio, donde el hombre ha encontrado un lugar adecuado donde realizar sus distintas actividades y satisfacer sus necesidades; así mismo, es importante resaltar que las necesidades humanas, han ido modificando los estados naturales de las cuencas, realizando un conjunto de derivaciones de aguas de un río hacia otro (trasvases), embalses, obstrucción de los cauces, modificaciones de sus cursos de agua, entre otros, cuyos efectos no han sido estudiados o muy pocos referenciados.

En la cuenca, ocurren diferentes fenómenos, entre ellos: el régimen de los cauces, la precipitación, la escorrentía, la infiltración y los demás elementos del ciclo hidrológico. En este sentido para Castany (1971), la circulación está determinada esencialmente por las características de la precipitación y de los factores secundarios o factores condicionales; donde los principales factores condicionales del régimen son:

- Las características geográficas y morfológicas.
- La geología y las características hidrogeológicas.
- La vegetación.
- El clima, entre otros.

Para una mejor comprensión funcional de la cuenca, en los últimos años, se ha desarrollado importantes avances, entre ellos, los modelos hidrogeológicos, cuyo objetivo es el análisis de sistemas hidrológicos, donde se analiza las entradas y salidas de agua en el

sistema hídrico (Chow, et al. 1994); por consiguiente se debe entender a la cuenca como un sistema altamente dinámico.

Cuadro N° 2.3: Partes de una cuenca.

Partes	Diferentes nombres que reciben		
Zona de recepción	Cuenca de recepción	Cuenca de captación	Cuenca alta
Zona de contracción	Canal de desagüe	Canal de escurrimiento	Cuenca media
Zona de depositación	Cono de deyección	Lecho de escurrimiento	Cuenca baja.

Fuente: CCTA, 1999.

Por otro lado, dentro de la división de las cuencas, se toma diferentes criterios para tal fin; se pueden dividir en función a las características fisiográficas, volumen de flujo, las actividades que desarrollan las pendientes, entre otros; en este caso para la CCTA, (1999), la cuenca, se divide de acuerdo al cuadro esquemático 2.3.

Razón de ello, mayormente se generaliza a la cuenca en tres partes clásicas: cuenca alta, cuenca media y cuenca baja.

Por otro lado, en el caso del Perú, las características geográficas, definen una densa red hidrográfica, donde la Cordillera de los Andes define hacia donde inclina el escurrimiento de las aguas de lluvia y deshielos, dividiéndose en tres vertientes: la vertiente del Océano Pacífico, la vertiente del Océano Atlántico y la del Lago Titicaca, con un total de 106 cuencas (ANA, 2009).

Sistemáticamente, la cuenca como un todo, no es un sistema homogéneo, cada uno de sus espacios cumple un rol muy especial, dado que está influenciada por un conjunto de características, entre ellos: el clima, la geografía, la geomorfología, la geología, la flora, la fauna, la altitud, entre otros; así por ejemplo en la cuenca alta, el recorrido del cauce de aguas es disperso, en forma de serpentin y bajos niveles de caudal; en la parte media, las corrientes son más pronunciadas, con elevados desniveles de pendientes y caudales torrentosos, finalmente en la parte baja, las aguas se concentran en ríos mayores, con recorridos direccionales pero con altos volúmenes de agua.

A nivel de cuenca alta, se identifica espacios donde netamente se originan las aguas tanto superficiales como subterráneas a las cuales se les denomina cabeceras de cuenca; para nuestro caso, nos interesa esta primera porción de cuenca (la cuenca alta), y en ella a los orígenes o partes más altas, las que en última instancia determinan la presencia de agua, el escurrimiento o la infiltración durante todas las épocas del año, denominadas “Cabeceras de cuenca”.

2.4.2 Red hidrográfica

Las cuencas se caracterizan por presentar una red hidrográfica, lugar por donde discurren las aguas en espacios lineales conocidos como quebradas y ríos.

Generalmente la red hidrográfica consta de quebradas, ríos secundarios y río principal, cada uno de ellos cumple un rol ecosistémico dentro de la cuenca. Monsalve, (2002), clasifica a los cursos de agua de acuerdo a la presencia de esorrentía como perennes, intermitentes y efímeros. En el caso de las partes altas, la red hidrográfica, es bastante difusa, pues en estos espacios se originan los primeros cauces con pequeñas cárcavas, y quebradas; en algunos casos la red hidrográfica se inicia en los lagos formando los primeros riachuelos.

La red hidrográfica se ha ido formando por procesos naturales teniendo en cuenta la cantidad de precipitación, las pendientes del terreno, la vegetación existente, el tipo de suelo, entre otros factores que han dado lugar a la existencia de este conjunto de ductos direccionales de las aguas desde las partes altas hacia las partes más bajas, desembocando en océanos o lagos receptores.

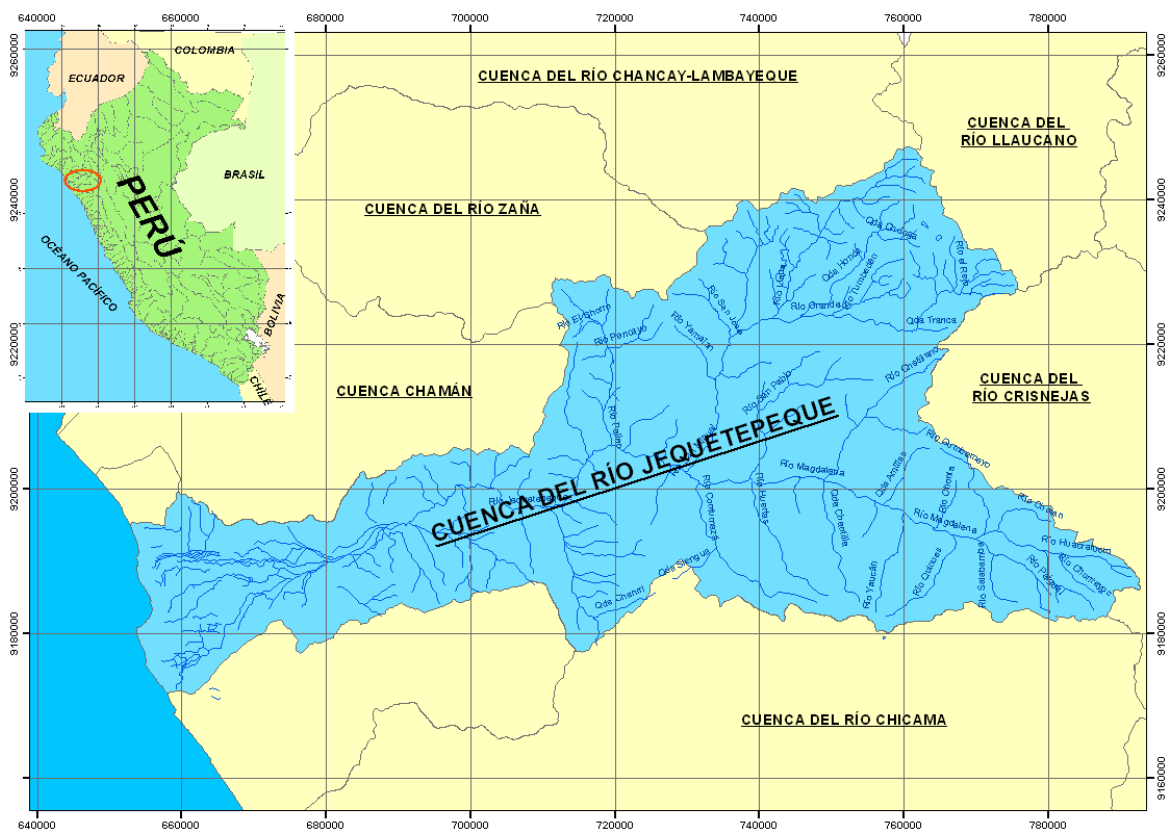
2.4.3 Cuenca del río Jequetepeque

La cuenca del río Jequetepeque, se encuentra ubicadas en la parte norte de la costa y sierra peruana. Abarca territorio de los departamentos de La Libertad y Cajamarca, pertenece a la vertiente hidrográfica del Pacífico. Limita por el Norte con las cuencas de los ríos Zaña y Chancay-Lambayeque, por el Sur con la cuenca del río Chicama y la

quebrada Cupisnique; por el Este con las cuencas de los ríos Cajamarca y Llaucano y por el Oeste con el Océano Pacífico (ver figura N° 2.2 Ubicación)

Tiene una extensión total de 5 941.70 km² de los cuales 4 372.50 km² corresponden a la cuenca Jequetepeque y 1 569.20 km² a la cuenca Chamán, que en la mayoría de proyectos, se encuentra incluida dentro de la cuenca del río Jequetepeque. La cuenca húmeda del Jequetepeque es de 3 564.80 km² (INADE, 2002). La cuenca comprende la región Costa y Sierra (Valle y Cuenca Media - Alta); se ha considerado como Valle a las provincias de Pacasmayo y Chepén, con una alta densidad de población, que según el Censo de 1993 ascendió a 140 471 habitantes, y el censo del año 2007 a 179 953 habitantes con una tasa de crecimiento de 1.3%.

Figura N° 2.2: Límites y Ubicación de la cuenca del río Jequetepeque



Fuente: Perú digital – adaptado.

El río Jequetepeque es el eje del drenaje de la cuenca del mismo nombre, con un recorrido de 150 km de longitud. En su desarrollo, recibe las descargas de más de 30 ríos

secundarios, numerosos riachuelos y quebradas menores de variado régimen hidrológico y pendientes variadas. La cuenca del río Chamán es de pequeña extensión y drena por el cauce del río Chamán hacia el mar con un desarrollo de 74 km de longitud. Existen además en el valle, dos cuencas pequeñas de escurrimiento esporádico, que son las de Pacasmayo – San Pedro – Pitura y San Idelfonso – Faclo, todos estos espacios forman parte del proyecto Jequetepeque-Zaña (Rojas, 2007).

En la parte alta de la cuenca, zona denominada jalca, existen áreas aisladas con bosques naturales y bosques desarrollados con plantaciones de eucaliptos y pinos; gran parte de esta zona está cubierta con pastizales nativos, el “ichu” (*stipa ichu*) de uso común al pastoreo.

En la parte alta, las áreas ocupadas por centros urbanos es de 850 ha; además, las actividades agrícolas, están formado por cultivos transitorios: maíz, arroz, trigo, papa, cebada, arveja, lenteja, frijol, camote, yuca, plátano, oca y olluco (16 050 ha); las praderas naturales permanentes están constituidas por pastizales, principalmente; terrenos con bosques naturales y terrenos sin uso constituidos por eriazos, lechos de río, zonas rocosas etc., (328 970 ha). (INADE, 2002).

La descarga media anual del río Jequetepeque es de 25.89 m³/s (816.49 MMC) con una descarga mínima de 2.79 m³/s (87.90 MMC) y una descarga máxima de 85.65 m³/s (2 701.10 MMC). El régimen hidrológico de la cuenca es variable; el 82.50 % de la escorrentía se produce en los meses de enero a marzo y el 17.50 %, en los meses de junio a diciembre (INADE, 2002).

Así mismo, según el INADE, los sistemas de cultivo predominante, son la producción de arroz y maíz amarillo principalmente entre otros cultivos menores de esparrago, ají panca, pimiento, marigold, flores, etc., existiendo en la parte baja de la cuenca, 13 120 beneficiarios con un área total inscrita de 47 037.12 ha aproximadamente, que entre los años 1987-2002, se instalaron y cosecharon hasta 41 500 ha.

En el estudio hidrogeológico, realizado por el INGEMMET, a cargo de Peña y Vargas (2005), sostienen que las aguas subterráneas se encuentran ligadas a las condiciones geológicas de la cuenca, entre ellas la naturaleza de la roca y sus características litológicas, denominadas acuíferos y roca almacén. Al respecto, mencionan que el acuífero fisurado chimú, está formado por areniscas cuarzosas intercaladas con lutitas delgadas, presentando una porosidad secundaria; el acuífero fisurado farrat, también está formado por areniscas cuarzosas, observándose fisuras abiertas, fracturas y fallas producto de la actividad tectónicas; y los acuíferos porosos no consolidados, formados por sedimentos aluviales, fluviales y eólicos, formando acuíferos del tipo confinado.

Según el INRENA (2004), citado por Peña y Vargas (2005), sobre los acuíferos porosos no consolidados, existen 1945 pozos cuyo volumen de explotación es de 15.07 MMC, cuyo caudal continuo es de 0.48 m³/s cuyo uso hídrico es agrícola y consumo humano.

2.5 CABECERAS DE CUENCA

Las cabeceras de cuenca constituyen un espacio muy importante para la Gestión Integral de los Recursos Hídricos, base de ello, la Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29338, considera importante la gestión sobre estos espacios mencionando en su art. 75, como zonas ambientalmente vulnerables donde se originan las aguas, (El peruano 31-03-2009); por su parte, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) dentro de las funciones en el Art. 15, parte 14, de la mencionada ley, sostiene: “Reforzar las acciones para una gestión integrada del agua en las cuencas menos favorecidas y la preservación del recurso en las cabeceras de cuenca”.

Así mismo, en el Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, en el art 177° parte 2, menciona que: “El valor de la retribución económica que se establezca en cada cuenca será destinada para... la conservación de las fuentes productoras de agua...y la preservación del recurso hídrico en las cabeceras de cuencas”, por lo que existe un interés especial en estos espacios mencionados desde la legislación peruana referente al recurso hídrico.

Desde un punto de vista estructural, las cabeceras de cuenca constituyen el elemento clave del soporte de los recursos hídricos, pues son los espacios donde se originan los ríos y se forman ecosistemas muy distintivos; la literatura, trata muy poco sobre el tema, generalmente se considera a la cuenca como un espacio homogéneo, sin embargo cada uno de los espacios constituyentes encierra un conjunto de particularidades inherentes en el funcionamiento de la cuenca. Por tal razón, es importante considerar un marco teórico profundo en la Cordillera de los Andes sobre el tema.

En algunas zonas de estos espacios, se desarrolla el pastoreo de auquénidos (llamas y alpacas), legado de costumbres ancestrales, dado la presencia de los pastizales, el ichu básicamente. En otras zonas como en Cajamarca, se observa la presencia de vacunos y lanar y la muy reducida agricultura, que junto con las condiciones climáticas establecen un ecosistema único para nuestro país.

La CCTA (1999), hace referencia a las microcuencas, que muchas de ellas están asentadas en las partes altas a lo que en el presente estudio se conoce como Cabeceras de Cuenca, así para la citada referencia, las altitudes en la que están asentadas las microcuencas van desde los 1000 hasta los 5000 msnm. Las altitudes, extensión y rasgos fisiográficos (pendiente, rugosidad, amplitud) que presentan, varían de microcuenca a microcuenca; sin embargo, por lo general, se puede identificar a cada una de estas partes como una zona agroecológica determinada: así la puna y la jalca se ubican en la parte alta, la quechua ocupa las partes medias, y la parte baja se vincula con el valle.

Las cabeceras de cuenca más altas y septentrionales, forman glaciares, las cuales son espacios donde ocurre fenómenos físicos transcendentales, así como el conjunto de parámetros climáticos juega un papel importante, unido a las condiciones geográficas, ocurre un fenómeno físico de solidificación del agua, formándose los nevados y donde el divertium aquarium juega un papel trascendental en la separación natural de las aguas hacia una vertiente u otra.

Para Alcántara Guevara (2010). Las cabeceras de cuenca, constituyen el eje central para infiltración de aguas, a través de la formación de colchones acuíferos, (cuencas sin

glaciares) determinado por la presencia de una vegetación especial en estas áreas, donde la capacidad de retención de los ichus permite drenar el agua paulatinamente dando origen a la infiltración del agua estacional.

Bajo este punto de vista, en la parte norte del país, existen cabeceras de cuenca donde no existen glaciares, empero, aguas abajo la escorrentía superficial forma parte del caudal de los ríos, estas cabeceras de cuenca, probablemente tengan una alimentación estacional y una geografía especial, capaz de formar parte del proceso.

Consecuencia de ello, en estas zonas, también es cotidiano observar la presencia de reservas de agua superficial almacenados en reservorios naturales denominados lagunas, las cuales a la par van conservando ecosistemas propios de este lugar y donde las especies de flora y fauna conviven en condiciones climáticas difíciles de encontrar en espacios medios y bajos de la cuenca.

Estos y otros fenómenos, tienen un nivel de estudio muy limitado, y la fragilidad de estos espacios influye directamente sobre los fenómenos de recargas aguas abajo, así como la calidad de los efluentes de aguas subterráneas que son la principal fuente de consumo humano.

2.6 GEOMORFOLOGÍA

El relieve externo que nos presenta la superficie de la tierra, está formado por un conjunto de pendientes, lomas, colinas, llanuras, entre otras a las cuales desde este punto de investigación la denominamos geomorfología. La geomorfología, es el estudio de las formas del relieve terrestre y sus procesos de formación. El nombre deriva de tres palabras griegas, geo (tierra), morfe (forma) y logos (estudio) (Gutiérrez, J. 2004); por lo tanto, es la estructura superficial que presenta la tierra, bajo la modelación de un conjunto de fenómenos que finalmente diseña geoformas distintivas por la acción intensa, directa e indirecta de los diferentes fenómenos externos e internos que actúan sobre la superficie terrestre.

Schumm (1999), citado por Gutiérrez (2008, p.2) define a la geomorfología como “la ciencia que estudia los fenómenos sobre y cerca de la superficie terrestre y se preocupará de las interacciones entre varios tipos de materiales y procesos implicando los sólidos, líquidos y gaseosos”; en consecuencia, hacer un estudio de la geomorfología superficial, implica hacer un análisis del espacio, así, geográficamente las cuencas están formadas por declives y pendientes que orientan el escurrimiento del agua hacia un lado u otro originando un sistema de corrientes de aguas superficiales. Dada las características topográficas y geográficas de nuestro territorio, siempre se concibe la geografía como un conjunto de elevaciones y depresiones, con sistemas de descargas direccionadas hacia un punto de desfogue, lo que implica un análisis del espacio al respecto.

En este sentido, la geomorfología, es un parámetro de gravedad influyente en el escurrimiento rápido o lento del agua superficial y la infiltración, Centeno & García, (2008), Weihua & Aubry (2008), Ayala et al (2005). Para lo cual, mediante el uso de los sistemas de información geográfica, se evaluará dicho parámetro mediante el método topográfico, a nivel de cabecera de cuenca, con la finalidad de relacionar el nivel de humedad en el suelo, la infiltración, la escorrentía y la pendiente con el recurso agua.

El INADE, (2002), respecto a la geomorfología en la parte alta, determina que la parte alta de la margen izquierda de la cuenca Jequetepeque, tiene un modelado controlado por la edificación estructural sedimentaria lineal; así mismo menciona que el modelamiento de la margen derecha de la cuenca, es resultado de los derrames lávicos a través de cuellos volcánicos; y, menciona además que, en la parte alta de la cuenca, los glaciares, han dejado de existir hace “decenas de años” por lo que presenta un panorama típico de glaciario en ciertas zonas de la parte alta de la cuenca (zona de Lagunas Compuerta). Al respecto, no presenta mediciones del grado de pendiente geomorfológica en esta parte de la cuenca, ni explicaciones respecto a la incidencia sobre los recursos hídricos en esta parte de la cuenca.

En este contexto, nuestro estudio de interés, son las geoformas que presenta la superficie terrestre básicamente en los espacios denominados cabeceras de cuenca, donde se conjugan una serie de elementos presentando una variabilidad de formas tendientes a

una función, así como también la variación e intensidad de los fenómenos de erosión que causa el agua y la escorrentía en los diferentes niveles de las cuencas; son entonces, en estos espacios que presentan geoformas especiales capaces de generar un proceso poco estudiado, que son las formaciones cóncavas u hondonadas las cuales muchas de ellas sirven como fuentes de acumulación de agua, con las formaciones de lagunas y/o lagos.

2.7 GEOLOGÍA

Estructuralmente, la geología, como soporte de la corteza superficial, tiene su influencia en las aguas subterráneas que pueden ser consideradas de origen meteórico la cual infiltra por los suelos y las fracturas de las rocas. Su efecto también está dado por las formaciones kársticas, teniendo un foco de atención las limolitas y dolomitas (Chorley, 1975).

La cuenca del Jequetepeque, se encuentra ubicado en el flanco occidental de la Cordillera de los Andes, y como tal su formación es resultado de la confluencia entre la Placa Sudamericana y la Placa de Nazca. Toda la estratigrafía, estructuras, magmatismo, mineralización sismicidad de la Cordillera de los Andes y del territorio peruano son resultado de la de la subducción de la Placa de Nazca por debajo de la denominada subducción andina, (Palacios, 1995, citado por Mejía, 2009).

La cuenca del Jequetepeque, específicamente la parte alta, se encuentra distribuida en cuatro cartas nacionales (hojas 14-e, 14-f, 15-f y 15-g). Del análisis de las cartas geológicas que se encuentran dentro de este espacio, se ha determinado la influencia de las siguientes formaciones geológicas.

Formación Chimú (Ki-chi), la formación Chimú, es una unidad estratigráfica, que pertenece al grupo goylloriquizga, cronológicamente es de la era del mesozoico, del cretáceo inferior. Litológicamente está formado por lutitas, limonitas, areniscas blancas y macizas y cuarcitas en bancos medianos y de grano fino.

En las capas de lutitas, se observa coloraciones oscuras, la cual constituyen restos de materia orgánica, siendo más abundante en la base de la formación, donde se observan algunos mantos de carbón.

Formación Farrat (Ki-f), la formación farrat, es una unidad estratigráfica, que pertenece al grupo goylloriquizga, de la serie inferior, sistema cretáceo de la era mesozoico.

Esta formación, esta constituidos por cuarciarenitas blanquecinas a gris amarillentas; en la parte superior se observa una mezcla de estos depósitos por la intensa meteorización superficial.

Grupo Goylloriquizga (Ki-g), correspondiente al piso Aptiano Neocomiano, del cretáceo inferior, de la era mesozoica.

Litológicamente consta de cuarcitas blancas masivas y areniscas de grano medio color blanquecino con intercalaciones delgadas de lutitas marrones a grises en su parte superior. Presentan una coloración grisácea a blanca ligeramente amarillenta que por meteorización toman colores amarillos, rojizos debido a los materiales ferrosos que contiene.

Formación Yumagual (Ks-yg), son depósitos de margas y calizas de colores grises a pardas, forman bancos más o menos uniformes. En algunas zonas las coloraciones se tornan amarillentos.

Depósitos fluvioglaciares (Qp-fg), pertenecientes al cuaternario de la era cenozoica. Estos depósitos, están formados por Gravas subredondeadas a subangulosas y arenas, formando los valles interandinos de altura.

Están constituidos por sedimentos finos de origen glaciar que han sido arrastrados por corrientes hídricas dominantes. A la altura de las quebradas se encuentran formando cuerpos hidromórficos conocido como bofedales, las cuales se han formado por acumulación de sedimentos muy finos y fangosos en medios hidromórficos formados por

afloramientos de agua subterránea, puquiales con presencia densa de vegetación acuática, donde se han ido acumulando las denominadas turberas con suelos negros.

Rocas intrusivas (T-di/to) dioritas, tonalitas, pertenecen al terciario inferior, era cenozoica. La tonalita presenta en los bordes una mezcla entre esquistos y gneis. Los minerales que la integran son plagioclasas, cuarzo, ortoclasa y biotita formando un conjunto de cristales diferenciados. En el caso de la diorita, es una roca fanerítica formado por plagioclasas de los tipos andesina-labradorita, también la integran la hornoblenda, la biotita y el cuarzo en menor proporción.

Volcánico Llama (Tm-vll), perteneciente el terciario inferior, de la era cenozoica. Está formado por andesitas, tobas, areniscas y calizas. En la mayoría de los casos este volcánico, es resistente a la erosión, constituye escarpas o farallones, en espacios medianamente húmedos, se observa la vegetación nativa dispersa.

Volcánico Porculla (Tm-vp), perteneciente al terciario medio de la era cenozoica.

Está compuesto por lavas y tobas andesíticas, presenta colores variados, siendo en la mayoría tendiente al grisáceo.

La formación Carhuaz (Ki-car), pertenece al grupo Goylloriquizga de la era del mesozoico, sistema cretáceo inferior.

Geológicamente está formado por lutitas, limolitas arcillosas y areniscas. Los procesos de intemperismo han generado coloraciones marrón a marrón amarillentas. Son materiales ligeramente plásticos.

Estructuralmente son rocas de consistencia fuerte, resultado de la acumulación de sedimentos, la cual forma el conjunto de pizarras, determinando una geomorfología con alta pendiente, son poco ideales para mantener la humedad, espacialmente se encuentran en el cinturón sur de la cabecera de cuenca.

Formación Pariatambo (Ks-p), perteneciente a la era del mesozoico del sistema del cretáceo inferior.

Geológicamente, se encuentra formado por dolomitas, margas y calizas grises oscuras bituminosas con limoarcillitas de igual coloración.

Granodiorita (Kti-gd). Estratigráficamente pertenece a la era del mesozoico del cretáceo superior.

Geológicamente está formado por rocas intrusivas del tipo granodioritas, sus colores son gris oscuro a gris blanquecino, en la cual se puede identificar la equigranularidad de los cristales de cuarzo, ortosa, biotita. La alta intemperización ha originado suelos de naturaleza arenosa, por ende son suelos con poca vegetación debido al poco desarrollo de materia orgánica.

La granodiorita, a menudo se encuentra asociado a minerales de Cu, Fe, Pb, Zn, entre otros, como relleno entre las fracturas.

Volcánico Chilete (Ti-vch). Perteneciente al grupo Calipuy a la era Cenozoica del terciario inferior.

Geológicamente está formado por andesitas, brechas y conglomerados.

Está constituido por intercalaciones tobaceas, areniscas, conglomerados lenticulares y materiales volcánicos retrabajados.

Volcánico San Pablo (Ti-vsp). Perteneciente a la era cenozoica, del terciario inferior.

Geológicamente está formado por un conjunto de areniscas de color rojizo, conformado por brechas y aglomerados volcánicos. Como rocas extrusivas, se pueden identificar la dacita y la andesita, con suelos de colores claros anaranjados predominantemente.

Volcánico Huambos (Ts-vh), perteneciente a la era del Cenozoico del terciario superior.

Geológicamente está conformado por andesitas y traquitas, sus coloraciones son claras. En el caso de los depósitos de andesita, generalmente se encuentra formado por plagioclasas, hornoblenda, la biotita, zircón, apatita como minerales opacos.

2.8 SEDIMENTACIÓN

Los sedimentos, son materiales que son transportados por agentes como las corrientes de agua superficial y subterráneo, los vientos, entre otros. Su estudio es de gran interés, debido a que los materiales que transporta, son depositados en las partes bajas o en pendientes muy suaves. En el caso particular de la cuenca del Jequetepeque, su cálculo es primordial, pues las corrientes de agua conllevan en épocas de alta precipitación y los deposita en el embalse del Gallito Ciego, disminuyendo su capacidad de vida útil (Rojas, 2007).

Los sedimentos forman la estructura del suelo, en la cual forman parte, los limos, arenas y arcillas, además de partículas más grandes que son los guijarros y cantos rodados. Uno de los métodos para determinar la textura del suelo es a través del tacto, para ello se puede ayudar de la siguiente tabla, propuesto por Jordán, (2005).

Cuadro N° 2.4. Forma de clasificar los suelos de acuerdo a la textura.

<i>Textura</i>	<i>Filamentos de 3 mm</i>		<i>Filamentos de 1 mm</i>	
	<i>Se puede hacer</i>	<i>Se puede doblar</i>	<i>Se puede hacer</i>	<i>Se puede doblar</i>
Arenosa.	No	No	No	No
Areno-limosa	Sí	No	No	No
Limo-arenosa	Sí	Se resquebraja	No	No
Franca	Sí	No	Sí	No
Limo-arcillosa	Sí	Sí	Sí	No
Arcillosa	Sí	Sí	Sí	Sí

Fuente: Jordán, 2005.

El procedimiento para analizar la cantidad de sedimentación que ocurre en un espacio, conlleva trabajos de campo y cálculos respectivos, por consiguiente el cálculo de la lámina de erosión hídrica y/o de la sedimentación se realiza mediante diferentes métodos, para el caso concreto de la siguientes investigación, se ha utilizado el método de las varillas (varillas de hierro de 3/8), para lo cual se seguirá los siguientes pasos:

a. Erosión o sedimentación promedio (E).

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{48} X_i}{N} \quad (2.21)$$

Dónde:

E = altura media del suelo erosionado (E) o sedimentado (S) (mm)

X_i = sumatoria de todas las mediciones de la erosión o sedimentación de cada parcela de medición (mm).

N = Cantidad de varillas de cada parcela de medición.

b. Erosión Neta (En).

$$En = S - E = Ep \quad (2.22)$$

Donde

En = erosión neta (mm) o erosión promedio Ep.

S = sedimentación del suelo (mm).

E = erosión del suelo (mm).

c. Cálculo de la erosión o sedimentación del suelo (ton/ha).

$$Ers = Ep \cdot Dap \cdot 10 \quad (2.23)$$

Donde.

Ers = suelo erosionado o sedimentado (ton/ha).

Ep = erosión promedio (mm).

Dap = densidad aparente (g/cm^3).

2.9 ACTIVIDADES ANTRÓPICAS

Las actividades antrópicas, son las actividades relacionadas con el hombre, quien hace uso de su medio natural para satisfacer sus necesidades. Hace uso de los recursos naturales mediante una modificación en baja o alta intensidad de su medio, así mismo el desarrollo de la tecnología ha favorecido el incremento de la industria la cual es una de las principales actividades que incide negativamente en el medio ambiente. A través del tiempo ha ido modificando su ambiente, mediante el desvío de sistemas de agua, el proceso de embalsamiento de cuerpos de agua, movimientos de enormes cantidades de tierra, la extinción de lagos, cambio y modificaciones de paisaje: procesos de reforestación de zonas que nunca antes han tenido tal cantidad de cobertura vegetal, entre otros.

En términos de la FCIHS, (2009), la explotación y gestión del agua, se refieren a la actuación del hombre sobre el sistema, lo cual está referido a los procesos de bombeos, caudales derivados de los ríos, extracciones industriales, extracciones agrícolas, etc., los cuales tienen incidencia en el comportamiento natural del agua en un cuenca.

Las actividades que se realizan a nivel de cuenca, son numerosas y variadas; desde su origen hasta su desembocadura. Las mayores actividades predominantes y de mayor demanda de agua se efectúa a nivel de cuenca baja, lugar donde están asentadas las grandes urbes, el sector industrial y el agrícola. A nivel de cuenca media se desarrolla las actividades agrícolas, pecuarias y poblaciones; y a nivel de cuenca alta el desarrollo de la agricultura, ganadería y principalmente las actividades mineras.

Las actividades a nivel de cuenca se desarrolla en base al crecimiento poblacional y la importancia de las ciudades. Las actividades en las cuencas costeras o de la vertiente del pacífico, predominan el sector industrial y agrícola, en las cuencas de la región sierra predomina las actividades mineras, agrícolas y pecuarias; y en las cuencas de la selva, se desarrollan las actividades agrícolas, mineras artesanales y petroleras.

Dado la importancia del recurso hídrico en todas las actividades antrópicas y naturales, es importante evaluar la cantidad y calidad de ella, la oferta y demanda para asegurar la permanencia de estos, es importante los sistema de entendimiento de los procesos que sigue el agua junto con la geografía, los procesos de escurrimiento, infiltración y evaporación, el comportamiento de las aguas superficiales y básicamente las aguas subterráneas a la cual está enfocado la presente investigación.

2.10 MODELAMIENTO

2.10.1 Definiciones y conceptos fundamentales

Los modelos son una representación simplificada de la realidad manipulable para mejorar la visión que de esta se tiene (Fernández, et al. 1999). Basándose en este principio, establecemos el uso de los diferentes tipos de modelos; los matemáticos, con el uso de expresiones matemáticas; los modelos físicos, mediante la reproducción a escala de los prototipos, y los analógicos, ya en desuso, basado en parecidos de ecuaciones en dos sistemas distintos.

Los modelos matemáticos, utilizan relaciones operacionales y funcionales de fenómenos, hechos, variables, parámetros o entidades, los que se realizan con la finalidad de estudiar el comportamiento de un sistema complejo en situaciones difíciles de observar en la realidad, en este caso del agua.

Por lo tanto, una vez traducido o representado cierto fenómeno en forma de un modelo matemático, se puede aplicar los cálculos respectivos para deducir el comportamiento del sistema.

En este sentido, las formaciones cóncavas, (objeto de estudio de la presente investigación) implica un estudio complejo debido a la interacción de un conjunto de variables que participan para el modelamiento, el estudio geomorfológico y geológico, la interacción de la precipitación, y con ella la evaporación, seguido del proceso de infiltración, lo cual implica el pronóstico de situaciones inobservables en el sistema, este

modelamiento hidrológico, se pretende aplicar en los primeros espacios de la cuenca, como es las cabeceras de cuenca, donde implica un conjunto de relaciones funcionales en los sistemas de recargas de aguas subterráneas, la adecuación de espacios útiles con estos propósitos frente a la ocurrencia de los eventos extremos y la correlación de variables espaciotemporales.

2.10.2 Software

Los avances de los hardware en computación y los software a comienzos de los años de 1970 han combinado específicamente una larga y extensiva data hidrológica y los esfuerzos de monitoreo para el desarrollo y aplicación de los modelos hidrológicos (Bediente, et al, 2008). Así mismo, sostiene que los SIG, incluyen atributos de información de database, la localización de la información entre otros atributos en forma espacial.

En la actualidad, los medios informáticos, son una alternativa rápida para la explicación de un determinado fenómeno, la obtención de datos de manera más simple y rápida, así como el modelamiento de los espacios con el uso de determinados instrumentos de investigación como son los software; los programas informáticos, muchos de ellos, nos permiten simular determinadas variables que de otra manera no la podríamos aplicar, las cuales utilizan un conjunto de algoritmos y lenguajes con la finalidad de expresar un determinado aspecto de la realidad y expresarlo en términos gráficos, matemáticos o lingüísticos; tal es el caso de: ArcGIS y GR2M.

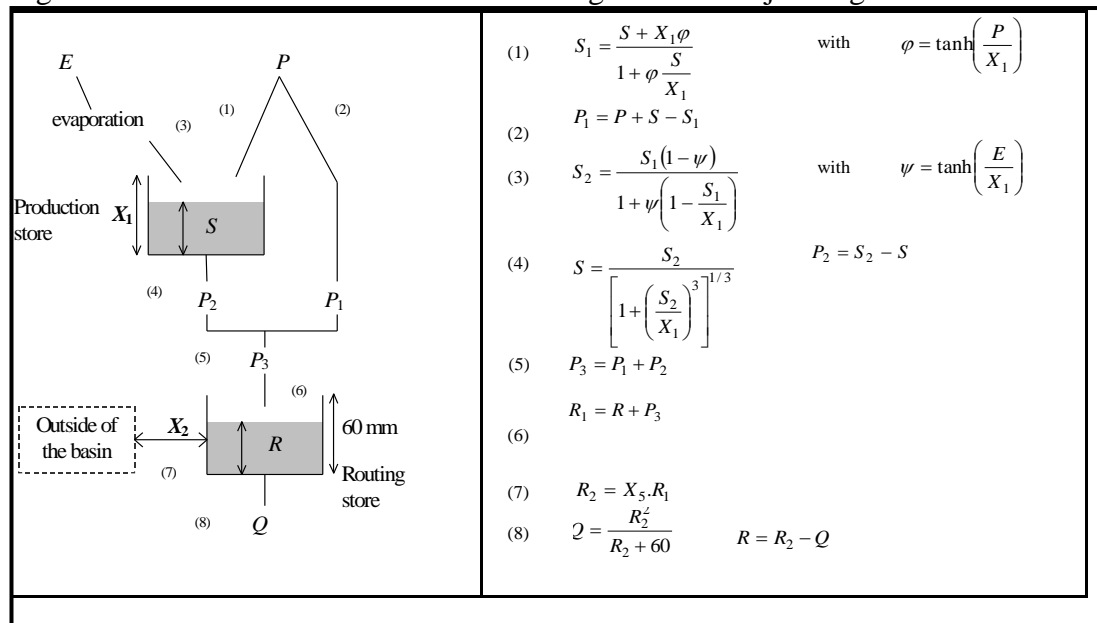
El ArcGIS, el cual es un programa para delimitar información geográfica a través de mapas y gráficos; para ello utiliza por un lado un sistema de triangulación denominado “The triangulated irregular network” (TIN), en la cual representa la variación de la superficies del terreno, identificando con mayor precisión los fenómenos espaciales de la geomorfología, los drenajes de la hidrografía, la formación de lomas, pendientes y cordilleras a través de picos. Por el método de triangulación, es necesario contar con una data cuyos datos (x, y, z) distribuidos espacialmente a través de puntos, líneas y polígonos o áreas nos generan una secuencia triangular conectados en forma algorítmica; finalmente

esta base triangular, lo que nos genera son la corrida de modelamientos, representando la geomorfología del terreno en su representación más original.

Por otra parte los DEM (Digitalitation Elevation Model), como parte de los Sistemas de Información Geográfica, son los que nos rediseñan la geomorfología y altitudes, mediante tonalidades de coloraciones o representaciones esquemáticas del relieve de un determinado espacio, en tal sentido; tanto los DEM como los TIN, van a mejorar una visión panorámica de la geomorfología del terreno básicamente en la parte alta de la cuenca del Jequetepeque.

El GR2M, que es un paquete estadístico de simulación de los caudales a partir de datos de precipitación y evapotranspiración. Es un modelo hidrológico de aplicación de lluvia - escorrentía, en la cual se simula la cantidad de escorrentía superficial, a partir de la cantidad de lluvia caída en un determinado espacio. Es una versión planteada por Mouelhi (2003), quien propuso un modelo bastante simple con la finalidad de conocer los caudales a partir de datos con los que se cuenta en la mayoría de estaciones meteorológicas, como son: precipitación, temperatura, humedad atmosférica, insolación, etc.

Figura N° 2.3: Desarrollo del modelo hidrológico de bandeja de agua.



Fuente: Mouelhi, et al. (2006). Excel.

Este modelo (figura 2.3) nos indica la utilización de dos parámetros: la Precipitación y la Evapotranspiración mensual a través del uso de un conjunto de ecuaciones según el modelo. El modelo GR2M, funciona a tiempo mensual, todas las entradas y salidas están expresadas en mm. En las ecuaciones P y E, representan la precipitación y evaporación potencial en la cuenca.

Debido a la precipitación, el almacenamiento en el tanque de producción, S , se convierte en S_1 , obtenido por medio de la siguiente expresión:

$$S_1 = \frac{S + X_1 \operatorname{Tanh}\left(\frac{P}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \operatorname{Tanh}\left(\frac{P}{X_1}\right)} \quad (2.24)$$

Donde X_1 representa la máxima capacidad del tanque de producción. El exceso de precipitación, P_1 , se calcula como:

$$P_1 = P + S - S_1 \quad (2.25)$$

Debido a la evaporación (el cálculo de la evaporación real, depende del valor de E), S_1 se convierte en S_2 :

$$S_2 = \frac{S_1 \left(1 - \operatorname{Tanh}\left(\frac{E}{X_1}\right)\right)}{1 + \left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right) \operatorname{Tanh}\left(\frac{E}{X_1}\right)} \quad (2.26)$$

Posteriormente, una cantidad de agua P_2 es liberada del tanque de producción como percolación. De esta manera S_2 , toma un nuevo valor S , el cual representa el almacenamiento inicial en el siguiente mes:

$$S = \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right]^{\frac{1}{3}}} \quad (2.27)$$

$$P_2 = S_2 - S \quad (2.28)$$

La suma de P_1 y P_2 es la cantidad de agua que entra en el tanque de tránsito:

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (2.29)$$

El nivel inicial en tanque de tránsito R , se actualiza como:

$$R_1 = R + P_3 \quad (2.30)$$

Luego se calcula el término de intercambio de agua F :

$$F = (X_5 - 1)R_1 \quad (2.31)$$

Donde X_5 es un parámetro adimensional. Si X_5 es mayor que 1, F representa una ganancia de agua para la cuenca, y si es menor que 1 representa una pérdida. El nuevo nivel en el tanque de tránsito es:

$$R_2 = X_5 * R_1 \quad (2.32)$$

La descarga a la salida de la cuenca de interés se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + X_4} \quad (2.33)$$

Donde X_4 es la máxima capacidad del tanque de tránsito y tiene un valor de 60 mm. Finalmente, el nivel en el tanque de tránsito al inicio del siguiente mes se calcula como:

$$R = R_2 - Q \quad (2.34)$$

Los parámetros que deben ser calibrados en el modelo GR2M son X_1 y X_5 .

Este modelo se ha aplicado en varias estaciones, cuyos resultados han sido satisfactorios. Para la evaluación de la calidad del modelo, se puede realizar mediante una

evaluación cuantitativa y cualitativa, para el segundo caso se basa en una comparación gráfica entre valores calculados y observados y en forma cuantitativa, se expresa en las cantidades de caudales generados a partir de las dos variables en mención; para la obtención de caudales, se tiene en consideración la aplicación del conjunto de ecuaciones que nos plantea el modelo en una hoja de Excel, junto con la ecuación del Nash, Nash (1979).

2.10.3 El modelo geoespecial

El análisis geoespacial, es la evaluación del espacio mediante un conjunto de herramientas capaces de determinar las características y particularidades que presenta nuestra superficie a través del uso básicamente de programas que superponen capas con una determinada característica del terreno.

Para nuestro caso, el análisis geoespacial, es el elemento clave de evaluación geomorfológica, pues a través de él vamos a determinar las características influyentes en las formaciones cóncavas, evaluadas desde el espacio.

En tal sentido, el análisis geoespacial está determinado por los programas de Sistemas de Información Geográfica, los cuales nos ayudan a determinar el estudio detallado de los aspectos físicos del espacio en estudio, resaltando y adecuando aspectos que el investigador quiere obtener.

A partir de la explicación anterior, el análisis geoespacial, genera un sistema altamente complejo, regido por el uso de herramientas que permiten la evaluación del territorio desde el espacio, entre estas herramientas, tenemos: los Sensores Remotos (SR), los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS). La información obtenida a partir de estas herramientas, genera un conjunto de datos de la superficie terrestre en forma general, las cuales se relacionan con el recurso hídrico, el sistema de pendientes, el recorrido y desviaciones del cauce, ubicación de algunas infraestructuras, canales de derivación y uso del recurso en los espacios agrícolas, entre otros.

Al respecto, para Marizza (2003), el SIG, es una herramienta analítica, y su mayor ventaja es que permite identificar las relaciones espaciales entre las características que están presente en un mapa y el terreno físico, vincula los datos espaciales con la información geográfica de una característica y sus atributos que se almacenan en una base de datos; consta de un modelo vectorial que representa el espacio como una serie de entidades discretas definidas como unidades de puntos, líneas o polígonos donde son geográficamente referenciados a través de coordenadas cartesianas y un modelo de datos raster que representa el dominio espacial mediante una superficie continua formada por una malla de celdas regulares. Una variable en análisis, definida por un modelo de datos raster, es representada con un valor de la variable para cada celda de malla.

En el análisis geoespacial de la superficie terrestre, implica combinar el conocimiento geofísico del terreno y la tecnología que no ayude a explicar los fenómenos que ocurren sobre ella, entendiendo en primera instancia que las formas que presenta nuestro territorio nacional, es el resultado de fuerzas endógenas o procesos tectónicos y las fuerzas exógenas o procesos erosivos de modelado del relieve, por lo que esta estructura física se encuentra muy estrechamente relacionada con los fenómenos meteorológicos, los cuales han ido moldeando y ejerciendo una influencia directa sobre éste en el proceso evolutivo de la tierra, tal es el caso del agua, uno de los principales agentes modeladores exógenos que genera sus espacios y paisajes delimitando territorios a los cuales la denominamos cuencas.

2.11 RESUMEN TEÓRICO

La geomorfología que presenta las cabeceras de cuenca, son características muy particulares, que funcionalmente cumplen aspectos poco considerados en la teoría. Además es importante resaltar que las cabeceras de cuenca es diferente a la tradicional clasificación que se realizaba sobre la cuenca: cuenca alta, cuenca media y cuenca baja.

En este sentido los recursos hídricos que engloba a las aguas atmosféricas, aguas superficiales y subterráneas, cumplen un rol sistémico. Los glaciares, forman parte de este ciclo hidrológico y como tal van a generar las primeras escorrentías de agua subterránea. En la mayoría de la Cordillera de los Andes, se observa la presencia de glaciares, excepto en la parte norte Cajamarca y Lambayeque. A partir de la Libertad hasta Puno, se observa la presencia de nevados, las cuales particularmente también presentan un tipo de geomorfología y las características edafológicas también son diferentes. A diferencia de la parte norte (Cajamarca y Lambayeque), no existen glaciares, pero sí se observa escorrentías de agua superficial, la cual vamos a explicar como resultados de la presente investigación.

Por otro lado, las aguas subterráneas ya sea en forma de acuíferos o en forma de escorrentía, desempeñan y cumplen un rol importante en la vertiente del pacífico, dado que en esta parte del territorio las precipitaciones son muy bajas y el agua superficial no es constante. La utilización de las aguas subterráneas forma parte del uso primario, productivo e industrial, la cual se explota mediante pozos, que para la ciudad de Lima esta administrado por SEDAPAL. En otras ciudades, donde el recurso es aún más escaso, existe una sobre explotación de las aguas subterráneas tal es el caso de las zonas de Ica, Mala, Cañete, donde la producción agrícola se ha desarrollado en base a las aguas subterráneas. Por consiguiente, es necesario reparar la explotación de estas aguas subterráneas mediante sistemas de recargas de agua como parte del ciclo hidrológico, que según el INADE, las recargas de agua se realizan en la parte alta y en los cursos de agua superficial, pero no se detalla cual es la parte alta y como se realiza este proceso, la cual también será explicado en la presente investigación.

El ciclo hidrológico, es altamente sensible a los parámetros atmosféricos, las variables que se encuentran íntimamente relacionadas son la temperatura y los cambios de vientos, en tal sentido existe abundante información sobre el cambio climático que afecta a nuestro planeta en general, y como consecuencia también tiene efectos en el proceso cíclico del recurso hídrico. Este problema, posiblemente va a generar problemas en la generación de intensas precipitaciones en cortos periodos de tiempo y prolongados espacios de tiempo sin precipitaciones (sequías), a las cuales se denomina eventos extremos. En tal sentido es necesario generar herramientas para enfrentar este problema que ya es observable en diferentes partes del mundo como los tifones, eventos del niño, etc.

En el sistema cuenca, diferenciamos un conjunto de elementos interrelacionados, que por lo general se ha diferenciado entre cuenca alta, cuenca media y cuenca baja, sin embargo no existe un parámetro establecido para identificar límites de cada una de estas partes de la cuenca, dado que a nivel de la vertiente del Pacífico, encontramos la cuenca baja hasta 0msnm, en la vertiente del Atlántico, la cuenca baja es variada y a nivel de la vertiente del lago Titicaca, la cuenca baja es el nivel del espejo de agua de dicho lago. El problema sobre la identificación de límites en las partes de la cuenca, es más interesante cuando en la presente investigación determinamos la cabecera de cuenca, la cual no es la cuenca alta, sino la parte más alta de la cuenca alta, una terminología poco utilizada que en la presente investigación también resaltaremos la delimitación de la cabecera de cuenca.

Por otro lado, la superficie terrestre no es uniforme, y como tal su diseño obedece a un conjunto de elementos que interactúan a nivel de superficie, entre ellos la temperatura, el viento, la precipitación, la humedad atmosférica, entre otros. Estos elementos van modificando y moldeando la superficie terrestre; y a nivel de la cuenca se puede identificar un conjunto de geofomas de pendientes bajas a altas, colinas, lomas y cordilleras, las cuales también se comportan de acuerdo al tipo de geología que presenta un determinado espacio, dado que el macizo rocoso es una mezcla de compuestos que finalmente originan las rocas. Estas interacciones con el ambiente, ayudan a descomponerlo y/o modificarlo diseñando la topografía de un determinado espacio, producto de ello ocurre el traslado de

las rocas menudas o material particulado de la roca generando los sedimentos, los cuales son transportados mediante corrientes de agua en favor de la gravedad.

Así mismo, en las partes altas no solamente interviene los parámetros atmosféricos, sino también las actividades antrópicas que se van desarrollando en busca de satisfacer las necesidades humana, siendo la más antigua el pastoreo de ganado y en los últimos tiempos las actividades mineras en mayor intensidad. Estos inciden en la configuración y alteración natural de la superficie terrestre modificando parámetros naturales de calidad del agua y la escorrentía, tanto superficial como subterránea.

En la presente investigación también se ha considerado el uso de diversos software y modelos que nos permitan identificar y estudiar los parámetros de la cabecera de cuenca y cumplir con los objetivos para la presente investigación; entre ellos tenemos el uso del ArcGIS, para estudiar espacialmente las formaciones cóncavas, así como el GR2M para determinar la simulación de caudales a partir de la precipitación, para poder explicar las escorrentías que se generan en épocas de estiaje sabiendo que la cuenca no cuenta con glaciares.

2.12 CONTRIBUCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

La contribución de la presente investigación, es la explicación del proceso y los parámetros que intervienen en la formación y funcionamiento de las geoformaciones cóncavas (FC). Describir la importancia de las FC ubicadas en cabeceras de cuenca y las características de éstas como: el acolchonamiento de agua en forma de agua subsuperficial y subterránea.

Explicar el control que se puede hacer de los recursos hídricos a partir de la gestión integral sobre el recurso agua desde la parte inicial, lugar donde ocurren las primeras escorrentías, tratado de almacenar o recargar aguas, evitando que se vaya perdiendo en el océano y evitando que se genere el transporte de sedimentos.

Explicar las características de la infiltración de agua y la conservación de la humedad, así como las características geomorfológicas que influyen en la infiltración y el mantenimiento de la humedad del suelo; este proceso, asociado al fenómeno del intemperismo que ocurren en las cabeceras de cuenca, las cuales favorecen a un mejor alimentación de aguas subterráneas y la acumulación temporal como aguas subsuperficiales.

Explicar el proceso de la generación de suelos capaces de cumplir un rol muy importante en la retención del agua y aflorar en épocas de estiaje así como la explicación del proceso de la formación geomorfológica muy particular a diferencia de ambientes en las cuales existe glaciares, donde son ambientes desnudos de rocas, con menor capacidad de retener e infiltrar el agua para épocas en las cuales no existe precipitación; así como explicar los procesos de generación de escorrentías aún en épocas de estiaje, sabiendo que en otras cuenca son los glaciares los cuales alimentan a la escorrentía de agua. Conocer las posibles consecuencias frente a un efecto de cambio climático, con la desaparición de glaciares, y donde las cuencas que son alimentados por estos fenómenos serían los menos favorecidos, en consecuencia dejar abierta posibles investigaciones a nivel de cabecera de cuenca con o sin glaciares.

Así mismo, cuantificar los parámetros que contribuyen a la humedad, escorrentía e infiltración en cabeceras de cuenca y cuantificar la cantidad de recarga de aguas en forma natural, así como demostrar la capacidad de recargas artificiales, mediante sistemas de conducción y la utilización de las geoformaciones cóncavas sin necesidad de generar ningún tipo de construcciones, amortiguando posibles inundaciones y crecidas de los ríos; por consiguiente, interviniendo en los planes de gestión y desarrollo de cuencas, desde las partes más altas.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

3.1.1 Zona de estudio

La zona de estudio, es la cabecera de cuenca del río Jequetepeque, donde se encuentran los espacios de formaciones cóncavas. Éstas, se encuentran distribuidas en la parte alta de los distritos de San Miguel, San Pablo, Cajamarca y Contumazá, todas ellas pertenecientes a la región Cajamarca. La zona de estudio, abarca un espacio superficial de 1 113 Km², la cual forma parte de la Cordillera occidental de los Andes Peruanos en la parte norte del país.

La zona de estudio tiene influencia en la parte baja de la cuenca, pues al respecto el INADE (2002), sostiene, que la aptitud hídrica de la cuenca, comprende la cuenca húmeda, en la que las precipitaciones en años normales superan los 300 mm/año y producen escurrimientos formando riachuelos y ríos y la infiltración formando los acuíferos subterráneos andinos y los puquiales. Así mismo, el área de influencia en la parte baja, forma el valle del Jequetepeque con 48 000 ha aproximadamente, sin tener en cuenta las 18 000 ha que se encuentran en el valle de Zaña con influencia de la zona en estudio, la cual depende del cauce del río Jequetepeque y los acuíferos costeros.

Así mismo, para Peña y Vargas (2005), los parámetros hidrogeológicos están relacionados con las propiedades hidráulicas de las unidades geológicas, en particular a la porosidad eficaz, permeabilidad y transmisividad. Al mismo tiempo, sostienen que; la sostenibilidad hidrogeológica de la cuenca ha permitido identificar tres tipos de acuíferos: la primera corresponde a los acuíferos fisurados de las formaciones cretáceas ubicadas en la parte alta de la cuenca, constituidas por areniscas cuarzosas altamente fracturadas y fisuradas. El segundo formado por sedimentaos cuaternarios recientes ubicados en la parte baja de la cuenca con 1945 pozos de explotación como se menciona en el marco teórico de la presente tesis; y el tercer grupo denominado los acuitardos las cuales se comportan como medios de circulación de las aguas subterráneas en la parte media y alta de la cuenca.

3.1.2 Caracterización de la cuenca

La cuenca se caracteriza de las demás cuencas, porque no cuenta con un sistema de glaciares en la parte alta como es característico en las demás cuencas de la vertiente del pacífico, básicamente a partir de la región de La Libertad hacia el sur.

En esta cuenca, las cabeceras de cuenca del río Jequetepeque, se caracterizan por pertenecer a las partes más altas, lugares donde generalmente ocurren fenómenos de precipitaciones y fuertes tormentas como parte del sistema, así como el registro de temperaturas muy bajas durante la noche y la continua presencia de neblina. Son los lugares donde se originan las primeras escorrentías a través de cárcavas y quebradas continuas o estacionales.

3.1.3 Materiales utilizados

A. Cartografía

- Carta Nacional escala 1/100000; entre ellas, se tiene a: 14e, Chongoyape; 14f, Chota; 15f, Cajamarca y 15g, San Marcos.

La carta nacional, se utilizó para la descripción geomorfológica a través de uso de curvas de nivel, así mismo la validación de los cauces de ríos secundarios, riachuelos y quebradas en las partes más altas, como sistema de origen de las primeras escorrentías para determinar la cabecera de cuenca. La cartografía, también nos permitió determinar el grado de pendiente a lo largo de toda la cabecera de cuenca y relacionar su influencia en la conservación de humedad, la escorrentía e infiltración.

- Mapa Geológico del Perú. 1/100000, las cartas geológicas nacionales: 14e, 14f, 15f y 15g.

Las cuatro hojas del mapa geológico, se utilizó, para determinar la distribución espacial de la geología a lo largo de la cabecera de cuenca, y si ésta distribución tenía influencia en la generación de geoformaciones cóncavas,

dado que determinados tipos de material geológico, sufren procesos de descomposición de la roca por efectos del agua y el gas carbónico y como tal en la generación de hundimientos del terreno, formando espacios cuyo interés es de la presente tesis.

B. Equipos

- Gps 72
- Eclímetros
- Balanza
- Computador
- Cronometro
- Impresora
- Equipo para aforo volumétrico.

C. Materiales

- Varillas de fierro corrugado
- Wincha
- Pita
- Clavos de 2 pulgadas
- Pintura
- Brocha
- Comba
- Cordel
- Balde de plástico.
- Cuaderno de campo
- Software
- Sierra metálica
- Papel bond.

D. Información Meteorológica

Para el análisis de los caudales y la simulación, se ha recopilado información de estaciones meteorológicas proporcionadas por el SENAMHI (cuadro 3.1), cuyos datos han sido analizados con 30 años de validación.

Las estaciones en análisis son:

- Estación Lives, en el distrito de Agua Blanca.
- Estación Llapa, en el distrito de Llapa.
- Estación Porcón, en el distrito de Cajamarca.
- Estación Magdalena, en el distrito de Magdalena.
- Estación Asunción, en el distrito de Asunción.
- Estación Contumazá, en el distrito de Contumazá.

Cuadro N° 3.1: Estaciones meteorológicas en la cuenca del río Jequetepeque.

Orden	Estación	Provincia	Distrito	Coordenadas UTM		Altitud msnm
				Norte	Este	
1	Live	San Miguel	Agua Blanca	9216570	717242	1800
2	Llapa	San Miguel	Llapa	9227526	741240	2900
3	Porcón	Cajamarca	Cajamarca	9224380	760235	3261
4	Magdalena	Cajamarca	Magdalena	9196109	755825	1257
5	Asunción	Cajamarca	Asunción	9190478	774212	2194
6	Contumazá	Contumazá	Contumazá	9186963	741047	2610

Fuente: SENAMHI, 2012.

3.2 MÉTODOS

La metodología para el estudio de formaciones cóncavas para el almacenamiento y recargas de agua, se fijó bajo los siguientes procedimientos.

3.2.1 Delimitación del área de estudio

La delimitación de la cabecera de cuenca, se determinó mediante la interpolación de tres procesos: Primero: la delimitación de las nacientes de las aguas y los primeros cauces de los ríos, Segundo: las curvas de nivel superiores y tercero: los espacios de mayor precipitación. Todo este proceso se ha realizado con los sistemas de información geográfica, lo cual nos arrojó un área de 1 113 Km².

3.2.2 Fase de planteamiento y coordinación

En esta fase se consideró la preparación de los planes de trabajo a lo largo de las cabeceras de cuenca en los afluentes al río Jequetepeque, lugar donde se van a llevar a cabo los trabajos tanto en campo como en gabinete. Durante este proceso se trazaron los objetivos y rutas de trabajo, así como la presentación de solicitudes a las municipalidades provinciales, municipalidades distritales, alcaldes de centros poblados y rondas campesinas. También se realizaron las coordinaciones para las salidas y visitas de campo hacia la parte alta, las rutas de desplazamiento y movilidad.

Las municipalidades a las cuales se planteó el trabajo de investigación son:

- Municipalidad distrital de El Prado.
- Municipalidad provincial de San Miguel.
- Municipalidad distrital de Calquis.
- Municipalidad distrital de Llapa.
- Alcaldía del Centro Poblado de Llapa.
- Municipalidad distrital de Cochán.
- Municipalidad distrital de Magdalena.
- Municipalidad distrital de San Juan.
- Municipalidad distrital de Contumazá
- Municipalidad distrital de Santa Cruz de Toledo.
- Ronda campesina de El Progreso, distrito de Asunción.

3.2.3 Fase de campo

A. Actividades de coordinación y sensibilización

En principio, se coordinó con las municipalidades distritales que comprende las cabeceras de cuenca del río Jequetepeque, algunas de las cuales nos ofrecieron el apoyo para el desarrollo de estudio. Así mismo, en consideración a la amplitud del área de trabajo, se planteó las salidas antes, durante y después de lluvias 2012 y 2013, por lo cual se tuvo que programar diversos viajes a las zonas de estudio. En los procesos de sensibilización se planteó el trabajo con los Gerentes de las Municipalidades en mención, así como algunas de las poblaciones involucradas y asociaciones de rondas campesinas.

B. Identificación y selección de las formaciones cóncavas

Para identificar las geoformaciones cóncavas, se determinó que tuvieran la forma de hondonadas, es decir espacios cerrados, sin salidas de agua, donde las precipitaciones y la circulación de las aguas se concentre en este espacio y pueda generar infiltración difusa y/o escorrentía superficial que alimente directamente al acuífero. Para ello se realizó el recorrido a lo largo de las cabeceras de cuenca con equipos de georeferenciación y se registró estas geoformaciones cóncavas en el río en estudio.

De acuerdo a la evaluación geomorfológica de las cabeceras de cuenca del río Jequetepeque, para su selección, se estableció que deberían contar con algunos criterios.

- Que los espacios se encuentren dentro del área de estudio, (Cabeceras de cuenca del río Jequetepeque).
- Que los espacios cuenten con geoformaciones cóncavas.
- Aprobación de los propietarios de acceso a las zonas en estudio.

3.2.4 Muestreo

El método de muestreo, fue probabilístico, se determinó nueve puntos de evaluación, lugares en las cueles se realizaron las diferentes pruebas que se indican en la metodología.

A. Puntos de medición de la infiltración

Se estableció en función a la ubicación de las geoformaciones cóncavas. Para determinar los niveles de infiltración se realizó mediante la elaboración de pozos en:

- Calicatas de 1,20 m y
- Hoyos de 45 cm de profundidad.

Para las pruebas de infiltración, se llenó de agua dichos pozos midiendo a intervalos de tiempo el proceso de infiltración registrando las variaciones de altura (ΔH) en función del tiempo (ΔT); para ello se utilizó la ecuación 3.1. Luego, los resultados se correlacionaron con las ecuaciones de Green y Ampt para determinar la conductividad hidráulica.

$$V_{inf} = \frac{\Delta H}{\Delta T} \quad (3.1)$$

Donde V_{inf} es la velocidad de infiltración, ΔH es la variación de altura (m) y ΔT , es el registro del tiempo (s).

Para el modelo de Green y Ampt, se utilizó la ecuación 2.12, de acuerdo a los tiempos medidos en campo. Para ello se realizó el respectivo calibrado y ajuste, encontrándose los valores de grado de succión (ψ) y conductividad hidráulica (k), como se explica en el siguiente ejemplo.

Así, para el caso de EP-01, en 60 minutos, se obtiene $Kt = 0.11$, $\psi = 532$; $\Delta\theta = 0.35$; reemplazando al inicio $Kt = F(t)$

$$F(t) = 0.11 + 188 \ln \left(\frac{188}{0.11} + 1 \right)$$

Luego de varias iteraciones, $F(t)$ confluye en la constante 6.29; para encontrar la tasa de infiltración, se reemplaza en la ecuación 2.7.

$$f = 0.11 \left(\frac{188}{6.29} + 1 \right)$$

Por lo que la tasa de infiltración al cabo de una hora es 3.39 cm/h.

B. Medición de la humedad del suelo

Para el caso de la humedad del suelo, se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\% \theta = \frac{W_h - W_s}{W_t} \times 100 \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde:

$\% \theta$ = porcentaje de humedad (adimensional)

W_h = peso húmedo (g)

W_s = peso seco (g)

W_t = peso total (g)

Para calcular el peso húmedo, se realizó inmediatamente en el lugar (insitu). Para determinar el peso seco, se tuvo que secar la muestra en una estufa y luego se volvió a pesar (Zavaleta, 1992).

C. Puntos de medición de caudales

La evaluación de los caudales se determinó mediante dos tipos de métodos: el método del flotador (ecuación 3.3) para los que presentaban un elevado caudal ejm: M-08, EP-05, y el método volumétrico (ecuación 3.4) para los de bajo caudal como LI-01 y A-01. Las fórmulas, se presentan a continuación.

Método del flotador.

$$Q = V \times A \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde:

Q = caudal (L/s)

V = velocidad (m/s)

A = área (m²)

Método volumétrico.

$$Q = \frac{V}{T} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Donde:

Q = caudal (L/s)

V = volumen (L)

T = tiempo (s)

D. Variaciones de volúmenes de agua

Las variaciones de volúmenes de agua, se determinó midiendo la longitud, el ancho y la profundidad de la acumulación de agua utilizando la wincha. Dicha evaluación, se realizó en la geoformación cóncava Ch-01 en diferentes tiempos.

E. Puntos de medición de erosión y sedimentación.

Este parámetro se evaluó en áreas aledañas a las formaciones cóncavas utilizando el método de las varillas desarrollado por Yactayo, (2006) y Tapia, (2011), además, complementando con los niveles de formación de:

- Plantas.
- Observación de suelos.
- Medición de cárcavas.

- Niveles de sedimentación.

Respecto a las varillas, se utilizó varillas de 3/8 y 37.5 cm de longitud. Se pintó el extremo externo con esmalte amarillo (10 cm de longitud) para registrar con mayor exactitud la acumulación de sedimentos o la erosión de suelos. En cada una de las 10 geoformaciones cóncavas, para el muestreo, se colocaron 12 varillas. El número de varillas se distribuyó en tres espacios diferentes con la finalidad de medir la cantidad de erosión y/o sedimentación que ocurren en función de la pendiente y dirección de las corrientes.

En estos espacios, también se determinó el cálculo de densidad y humedad del suelo como parte en la resolución de las ecuaciones de sedimentación.

Para el caso de la densidad del suelo, se determinó mediante el método volumétrico, sacando un poco de suelo con una espátula y formando un cubo de 10 cm de largo por 10 cm de ancho y 5 cm de profundidad. El espacio vacío se llenó con agua sobre un impermeable, determinando el volumen que ocupa el suelo. El suelo sacado se pesó para determinar su masa. Usando la fórmula de densidad (ecuación 3.5), se determinó la densidad del suelo.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Donde:

ρ = densidad del suelo (g/ml)

m= masa del suelo (g)

V= volumen del suelo (ml)

F. Evaluación geológica

Respecto a la evaluación de la geología en la cabecera de cuenca del río Jequetepeque, se utilizó las cartas geológicas elaboradas por el INGEMMET; para ello se utilizó el programa ArcGIS.

G. Simulación de caudales

Para la simulación de los caudales en las estaciones que tienen influencia en la cabecera de cuenca, se utilizó el programa GR2M, el cual es un programa de simulación de lluvia-escorrentía. El programa, necesita dos datos básicos (input), los datos de precipitación (mm) y la evapotranspiración (mm) y como datos de salida (output) son los caudales (mm/mes). Este programa utiliza un formato Excel donde están descritos las fórmulas de aplicación propuesta por Mouelhi (2003).

Como condición, es necesario delimitar el área de influencia, para el cual se usó el método de polígonos de Thiessen (Jacquin & Soto-Sandoval, 2013); luego, se establece el tiempo para determinar el almacenamiento del tanque (cuenca), así mismo, también se evalúa que el Nash (parámetro) debe tener una eficiencia por encima del 85%.

H. Evaluación geomorfológica

En la evaluación geomorfológica, es decir la evaluación de pendientes, se realizó mediante el método topográfico, utilizando la tangente del ángulo de inclinación entre la diferencia de cotas y la distancia horizontal, para ello se utilizó las curvas de nivel y el programa ArcGis.

La evaluación de las geoformaciones cóncavas, son el punto central de estudio y su caracterización, por lo cual se evaluó:

- Los niveles de pendiente. Para ello se utilizó el método topográfico, con la utilización del programa ArcGIS, las curvas de nivel y distancias horizontales.
- Tipos de suelo. Para ello, se evaluó la textura y estructura de los suelos, utilizando la tabla 2.4.
- Tipos de vegetación.
- Diámetros y profundidad de las formaciones cóncavas.

3.2.5 Análisis de la información

En esta fase, se analizó el conjunto de la información tanto bibliográfica como la obtenida en campo, mediante la utilización de programas básicos de Word, Excel, el uso de programas informáticos (ArcGIS, GR2M), el uso de un sistema de ecuaciones y la redacción del documento; este análisis de la información, se planteó de la siguiente manera:

A. Consolidación y sistematización de la información

El análisis de la información, tiene varias etapas de sistematización. Los datos obtenidos en campo, tanto de infiltración, humedad del suelo, caudales y sedimentación, así como el registro de las geoformaciones cóncavas, su profundidad, amplitud y anchura se tomó con las herramientas adecuadas y metodologías propuestas para cada parámetro, para luego trabajarlas en programas de cálculo y realizar su análisis adecuado.

B. Utilización de programas informáticos

Los programas informáticos, entre ellos el ArcGIS 10.0 y el GR2M, han sido parte importante para el análisis del modelamiento. Para el ArcGIS, se tomó como base el mapa digital del Perú, a partir del cual se realizó la delimitación de la cabecera de cuenca en estudio. Con este programa también se determinó la evaluación geomorfológica a través de pendientes mediante el método topográfico (distancia entre dos puntos extremos de la cabecera de cuenca y la diferencia de cotas entre estos dos puntos). El programa GR2M, ha permitido generar la simulación de escorrentías de las aguas, a partir de la precipitación y evapotranspiración a nivel de cabeceras de cuenca, dato importante para evaluar la cantidad de agua que se encuentra relacionada con las recargas de agua en forma subsuperficial o profunda, así como la cuantificación de la cantidad de agua que puede soportar una formación cóncava en precipitaciones de alta intensidad.

C. Interpretación de cartas Nacionales

La interpretación de las cartas nacionales se realizó utilizando el programa ArcGis, para la evaluación de la geomorfología, el sistema de la red hídrica, la pendiente y la delimitación de la cabecera de cuenca, así como su delimitación e influencia política.

Respecto a las cartas geológicas del INGENMET, nos permitió complementar los estudios de campo, planteamiento básico para la caracterización del tipo de material parental en las formaciones cóncavas.

D. Análisis e interpretación del funcionamiento de las geoformaciones cóncavas

Resultado del trabajo de campo y el recorrido por las cabeceras de cuenca del río Jequetepeque, permitió la identificación de las geoformaciones cóncavas y el posterior traslape entre la carta nacional y la carta geológica. Con el uso del programa ArcGis y la observación en campo, ha permitido la obtención de resultados hidrogeológicos como se describe en el acápite 4.3.1. Los estudios en campo de la geomorfología, el desarrollo del intemperismo y las pruebas de infiltración base, han servido para plantear un modelo de recarga de aguas subterráneas en estas geoformaciones cóncavas ubicadas en cabeceras de cuenca.

Los datos en gabinete, son producto de la comparación de la actividad meteorológica sobre la superficie terrestre, los tipos de geología y la medición de la actividad erosiva del agua. Determinar el área de influencia y la importancia que desempeñaran estas formaciones cóncavas serán clave en un futuro de necesidad de agua para la acumulación y conducción de aguas hacia los acuíferos como reservas de agua. Evaluando el proceso de formación, su influencia en las recargas de agua, su influencia en la cantidad de agua que la escurren a través de ductos de sumersión, son elementos claves para explicar la funcionalidad de la geomorfología en las cabeceras de cuenca, lugar donde las precipitaciones alcanzan su mayor magnitud y concentración.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 IDENTIFICACION Y UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE GEOFORMACIONES CÓNCAVAS

Después de generar la cartografía básica para el área de estudio, como se explica en la metodología. En las cabeceras de cuencas del río Jequetepeque, se han identificado un total de 37 formaciones cóncavas, a los cuales se registró su ubicación, cota y coordenadas UTM, como se presentan en el cuadro N° 4.1.

Cuadro N° 4.1: Identificación de formaciones cóncavas, en la cabecera de cuenca del río Jequetepeque.

GEOFORMACIONES CONCAVAS								
ID	CODIFIC	UBIC_LUG	DISTRITO	MEDIDAS	COORD_X	COORD_Y	ALTITUD	TIPO_FC
1	EP – 01	Alto Prado	El Prado	Grande	721923	9225273	3438	Encajonamiento
2	EP – 02	Alto Prado	El Prado	Pequeña	722164	9225190	3450	Encajonamiento
3	EP – 03	Alto Prado	El Prado	Pequeño	722134	9225461	3518	Pozo Natural
4	EP – 04	Alto Prado	El Prado	Pequeño	722050	9225533	3550	Encajonamiento
5	EP – 05	Huanchilla	El Prado	Grande	719236	9227986	3255	Encajonamiento
6	C – 01	La Totora	Calquis	Grande	732378	9231104	3669	Encajonamiento
7	C – 02	La Totora	Calquis	Mediano	732289	9230993	3711	Planicie
8	C – 03	La Totora	Calquis	Pequeño	732346	9231190	3675	Planicie
9	C – 04	Parte Alta	Calquis	Pequeño	732666	9235305	3719	Planicie
10	C – 05	Parte Alta	Calquis	Pequeño	736755	9239908	3671	Planicie
11	C – 06	Parte Alta	Calquis	Pequeño	736990	9239773	3667	Planicie
12	C – 07	Parte Alta	Calquis	Pequeño	737108	9239635	3664	Planicie
13	C – 08	Gordillos	Calquis	Pequeño	738717	9238741	3535	Planicie
14	C – 09	Gordillos	Calquis	Grande	738911	9238042	3522	Encajonamiento
15	C – 10	Gordillos	Calquis	Pequeño	738188	9238696	3551	Hondonada
16	C – 11	Gordillos	Calquis	Mediano	737926	9239432	3581	Encajonamiento
17	Cz – 01	Cascabamba	Contumazá	Pequeña	751153	9184449	3407	Hondonada
18	Cz – 02	Contumazá	Contumazá	Pequeña	751724	9183924	3436	Hondonada
19	Cz – 03	Contumazá	Contumazá	Pequeña	757287	9183706	3702	Hondonada

Continuación del cuadro 4.1								
20	M – 01	Ventanilla	Magdalena	Grande	767653	9202222	3425	Hondonada
21	M – 02	Ventanillas	Magdalena	Mediana	767585	9202271	3423	Hondonada
22	M – 03	Acshupata	Magdalena	Mediana	768175	9202307	3454	Laguna
23	M – 04	Las cavernas	Magdalena	Grande	767605	9202794	3441	Hondonada
24	M – 05	Las cavernas	Magdalena	Grande	767496	9202890	3442	Hondonada
25	M – 06	Las Cavernas	Magdalena	Grande	767480	9202901	3431	Hondonada
26	M – 07	Las Cavernas	Magdalena	Grande	767442	9202897	3422	Hondonada
27	M – 08	El Tingo	Magdalena	Grande	765758	9204029	3548	Hondonada
28	M – 09	El Tingo	Magdalena	Pequeños	765897	9203896	3554	Hondonada
29	M – 10	Las Cavernas	Magdalena	Pequeño	767579	9202583	3554	Hondonada
30	M – 11	Las Cavernas	Magdalena	Grande	767565	9202571	3465	Hondonada
31	M - 12	Acshupata	Magdalena	Grande	768814	9203382	3436	Hondonada
32	A – 01	Agua Tapada	Asunción	Grande	776197	9185855	3558	Hondonada
33	LI – 01	Empalme	Llapa	Mediano	758377	9245066	3669	Encajonamiento
34	Ch – 01	Alto Cochán	Cochán	Mediano	756579	9238683	3635	Hondonada
35	C h- 02	Pampa Larga	Cochán	Mediano	756264	9238342	3634	Hondonada
36	SM – 01	La Arangra	San Miguel	Grande	731699	9229771	3728	Encajonamiento
37	SJ – 01	San Juan	San Juan	Pequeña	777844	9193501	2449	Hondonada

Fuente: Elaboración propia.

Las geoformaciones cóncavas, están localizadas geográfica y políticamente en la región de Cajamarca, San Miguel y Contumazá:

En San Miguel, distritos: El Prado, Calquis, Llapa, Cochán y San Miguel

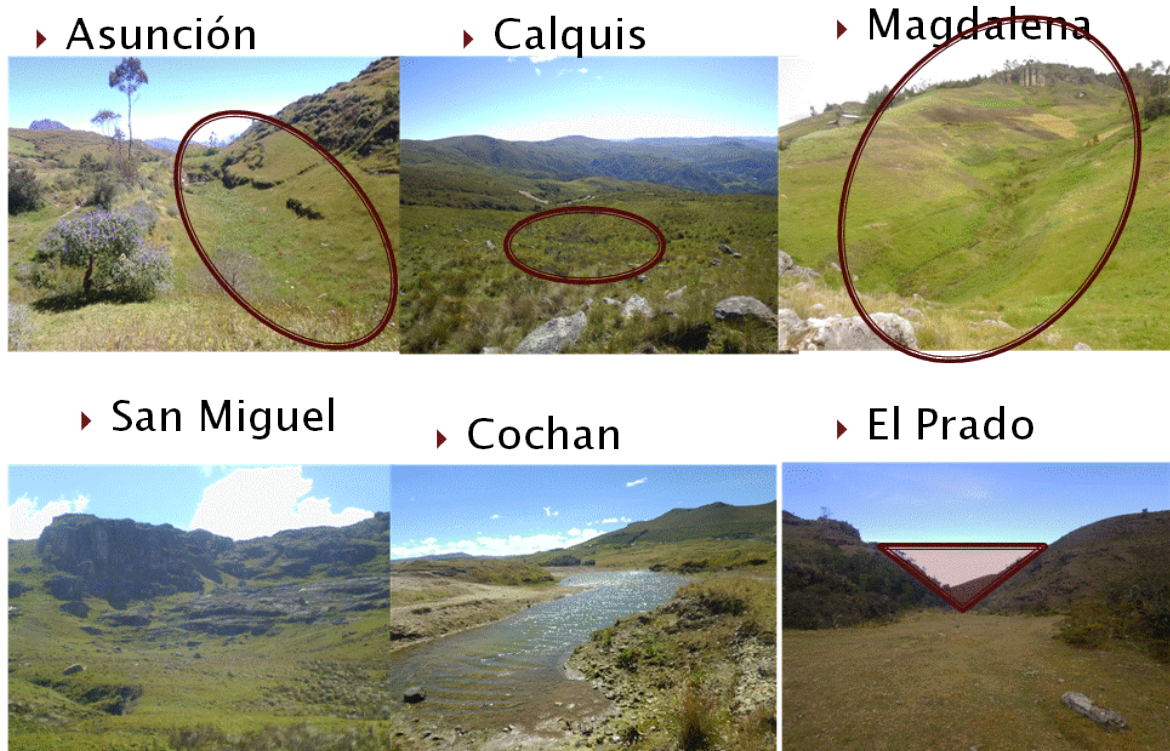
En Cajamarca, los distritos de San Juan, Magdalena y Asunción y

En Contumazá, distrito de Contumazá.

Los tipos de encajonamiento, pertenecen en su mayoría a las provincias de San Miguel y Contumazá; las formaciones de hondonadas, pertenecen a los distritos de Magdalena y Asunción, y las planicies que conforman pocas hondonadas, se encuentran en los distritos de Cochán, San Juan y Contumazá.

A continuación en la figura 4.1, se muestra algunos tipos de formaciones cóncavas, y la característica de cada una de ellas, en la cual se resalta el espacio de influencia a evaluar.

Figura N° 4.1: Fotos de formaciones cóncavas en las cabeceras de cuenca.

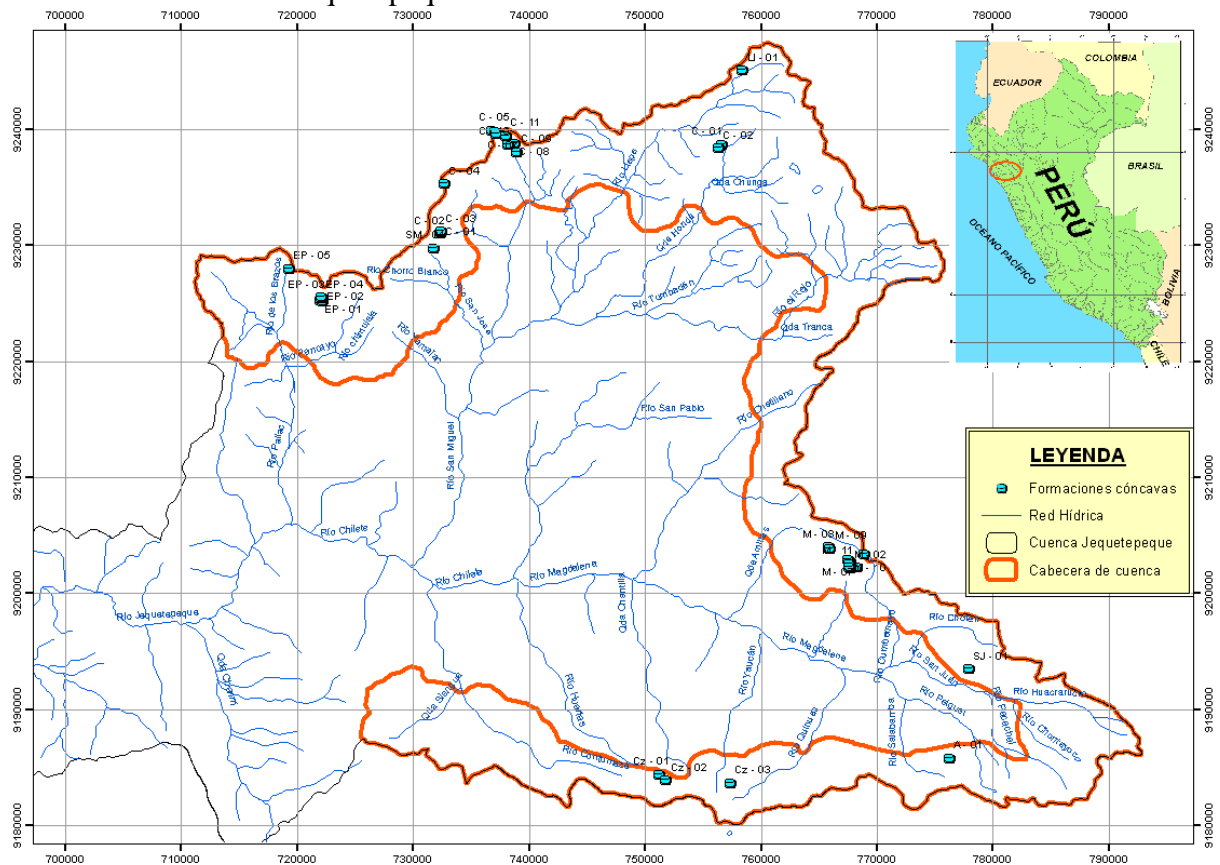


Fuente: Elaboración propia.

La distribución espacial de estas formaciones cóncavas y su ubicación geográfica se observa en la figura 4.2, algunas de las formaciones cóncavas tienen un largo proceso evolutivo, por lo que las recargas de agua es un fenómeno geológico que ocurre a lo largo de la formación de la tierra. La gran mayoría de ellos se encuentra en las partes más altas, muchas de ellas son parte inicial de las primeras corrientes de agua. Debajo de ellas, el relieve presenta pendientes muy pronunciadas y abruptas (cuadro 4.10), consecuencia de ello existen menores posibilidades para la infiltración del agua, pues ésta, se encuentra sometido a un rápido escurrimiento, con una tendencia lineal y con un espacio delimitado llamado cauce. En estas condiciones disminuye las posibilidades para que el agua busque caminos a su proceso de infiltración. La ubicación y distribución de las formaciones cóncavas, se encuentran asociado a espacios planos o con bajas pendientes, espacios que

abarcan la delimitación en las cabeceras de la cuenca del río Jequetepeque, las cuales con el desarrollo de un poco de tecnología, se obtendrían mejores resultados en la infiltración y almacenamientos de aguas.

Figura N° 4.2: Distribución espacial de formaciones cóncavas en la cuenca del Jequetepeque



Fuente: Mapa digital del Perú. Elaborado.

4.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN FORMACIONES CÓNCAVAS

4.2.1 Infiltración del suelo

Las medidas de infiltración, constituyen un elemento esencial de medición, el cual ayuda y contribuye en la escorrentía subterránea de agua, producto de la precipitación durante las épocas de lluvia hacia el conjunto de acuíferos, libres, confinados y semiconfinados, así como también contribuye a mantener la humedad del suelo y las

característica de éste, para el mantenimiento de la vegetación, Sorman, et al (2009), Aoki & Sereno (2006), Porta, López y Roquero (2003).

Como parte de los trabajos de campo, que contribuyan a plantear el sustento teórico de las recargas de agua subterránea, las medidas de infiltración, son uno de los elementos sustentatorios de la importancia de estos depósitos, cuyos resultado contribuyen a explicar entre otros elementos las funciones intrínsecas de las cabeceras de cuenca en el río Jequetepeque.

Los resultados que se obtuvieron de los trabajos de campo, se procesaron y se utilizó la ecuación 3.1, para obtener la infiltración directa. Con los datos de humedad y tipos de suelo, se procedió a generar información, utilizando las ecuaciones 2.12 y 2.7; con lo cual se obtuvo el cuadro 4.2, donde se muestran los parámetros ajustados y calibrados con el método de Green y Ampt para la cabecera de cuenca del río Jequetepeque.

Cuadro N° 4.2: Parámetros ajustados y calibrados para la zona de estudio.

Formación Cónca	Fuerza de succión $\Psi(\text{cm})$	Variación de humedad $\Delta\theta$	Conductividad hidráulica K(cm/h)
EP-01	532	0.35	0.11
EP-03	1845	0.38	0.17
EP-05	198	0.36	0.05
LL-01	756	0.47	0.07
C-02	390	0.43	0.07
M-02	269	0.44	0.06
M-08	115	0.20	0.04
A-01	415	0.49	0.13
Cz-01	485	0.38	0.04

El grado de succión, es un parámetro que se encuentra en función del tipo de suelo y la rapidez con la que el agua se infiltra en el suelo. Como se observa en el cuadro 4.2, el mayor de ellos, se encuentra en el prado (EP-03), su explicación se sujeta a la intensa meteorización de la roca y el suelo poroso, así mismo, el menor de ellos se encuentra en Magdalena (M-08), donde los suelos son argilúvicos. Respecto a la variación de la humedad, no existe mucha dispersión, siendo el mayor de ellos de 0.49, ubicado en Asunción, el cual es más susceptible a las variaciones climáticas estacionales.

Por otro lado la conductividad hidráulica (cuadro 4.2) presenta valores entre 0.17 a 0.04 cm/h, el cual se encuentra en relación directa a la fuerza de succión, el grado de intemperismo y los tipos de macizo rocoso como se explicó anteriormente; según Pérez (2003) pertenecen a suelos limosos orgánicos con mezclas de arena y arcilla, cuyo grado de permeabilidad es baja.

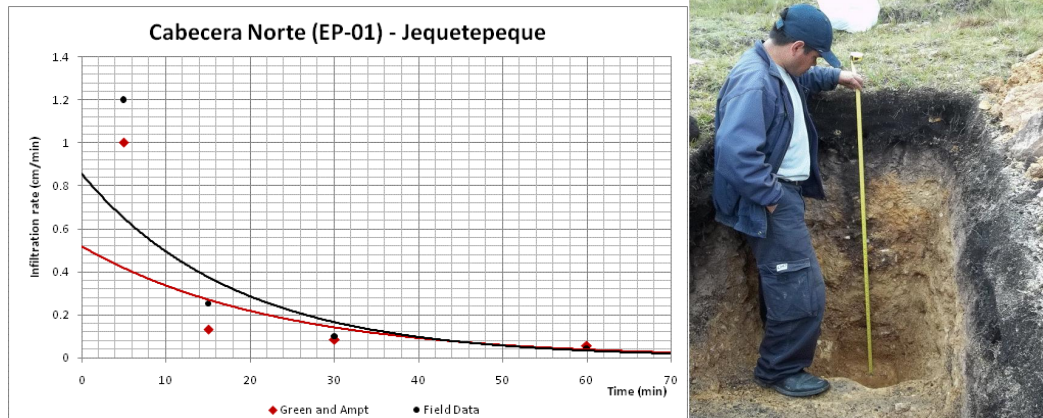
A. En el distrito El Prado

Distrito en el cual se han encontrado cinco formaciones cóncavas, en las cuales se han realizado tres pruebas de infiltración en tres espacios de formaciones cóncavas.

En el Alto Prado, en la FC: EP-01, los tipos de suelo son de textura franco arcillo-arenosos con predominante vegetación herbácea. La estructura observada en la capa superficial es granular con alta cantidad de materia orgánica y alta porosidad; en la subsiguiente capa se observa de color amarillo anaranjado, que forman agregados bloquiformes con alta humedad; las velocidades de infiltración promedio en este punto es de 4.0×10^{-2} cm/min, valor que corresponde a suelos semipermeables. La conductividad hidráulica es de 0.11 cm/h. Estadísticamente la ecuación de regresión para los datos de campo, tiene un coeficiente de 0.8, por lo tanto existe una alta correlación positiva entre los datos tomados en campo y los datos encontrados con la ecuación de Green y Ampt.

En la figura 4.3, en los primeros minutos de muestreo se observa una amplia variación entre el método con datos de campo y el método de Green y Ampt, que luego confluyen después de alcanzar la infiltración básica. Los valores de campo, dependen de las variaciones de humedad del suelo, la textura y estructura por consiguiente sus valores en un inicio presentan amplia dispersión; por el contrario, el método de Green y Ampt, son valores que se rigen a la aplicación de una fórmula, sobre la cual se debe calibrar, por consiguiente, la curva que presenta es más uniforme. Este mismo principio explica las demás gráficas de infiltración.

Figura N° 4.3: Tendencia de la infiltración FC: EP-01, El Prado.

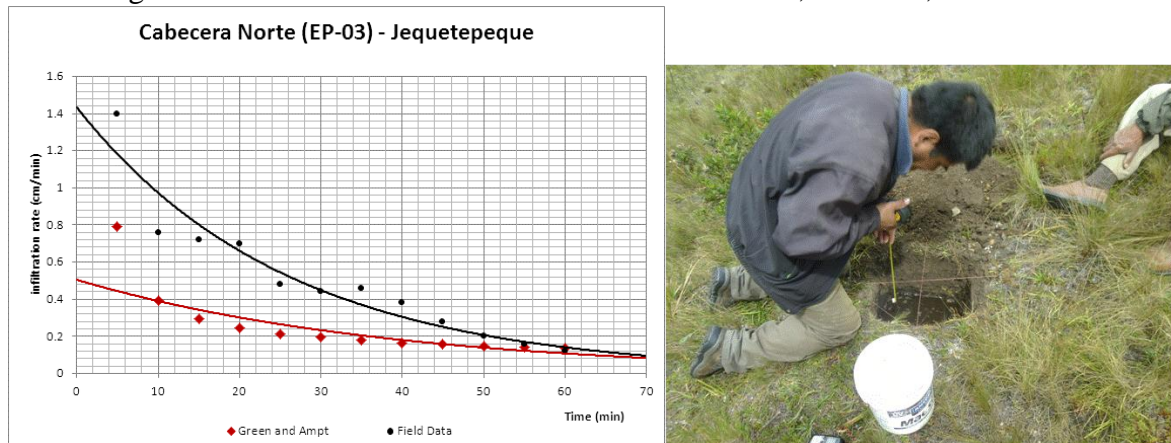


Fuente: elaboración propia.

En la FC: EP-03, perteneciente también al distrito El Prado, se ha encontrado un valor promedio de infiltración de $1.2 \times 10^{-1} \text{ cm/min}$, lo que constituye un tipo de suelo semipermeable, estos valores nos permiten determinar la alta capacidad de infiltración del agua en el suelo, cuyo indicador es valorable como zonas de recarga natural durante las temporadas de lluvia en estas partes altas de la cuenca. Así mismo la presencia de la vegetación herbácea y la existencia de roca meteorizada, ayudan en gran medida este proceso de infiltración coadyudando a la acumulación en aguas subterráneas subsuperficiales y otras a mayores profundidades. Estadísticamente, el coeficiente de determinación r es de 0.9, lo cual existe una alta correlación entre los datos de campo y el método de Green y Ampt

En la figura 4.4, se observa en los primeros minutos una alta variación en la tendencia de la infiltración en campo, lo cual está explicado por el grado de sequedad, porosidad e intemperismo que existe en el espacio de evaluación, debajo de la lámina de suelo.

Figura N° 4.4: Mediciones de infiltración en el distrito, El Prado, FC: EP-03.

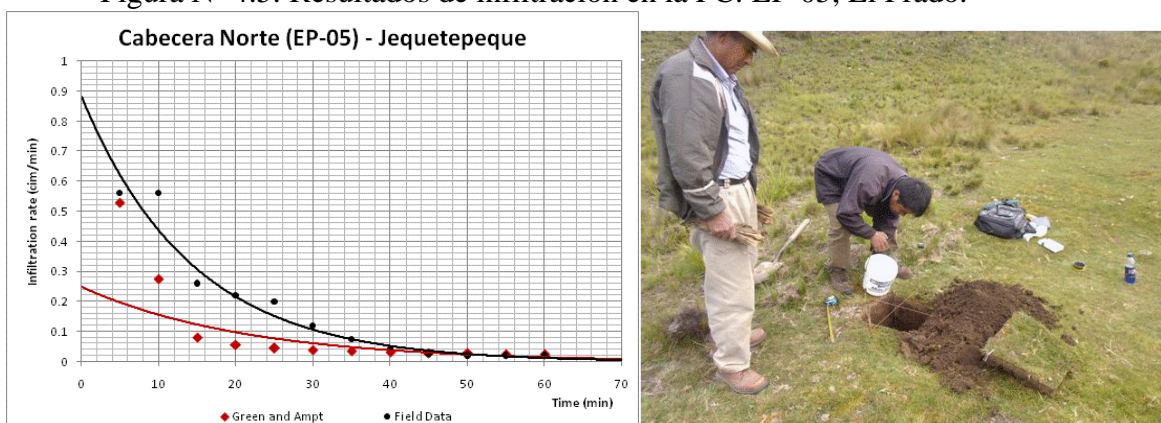


Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de medición de la infiltración, en la microcuenca Pallac, perteneciente políticamente al distrito de El Prado (EP-05), se muestran en la figura 4.5. El tipo de suelo predominante en esta parte de la cuenca, es del tipo franco, con poco contenido de factor húmico. En la primera capa u horizonte A, presente una estructura granular, seguida de un horizonte B de color pálido amarillo, producto de la meteorización de las rocas volcánicas como la Andesita, formando una estructura de agregados en forma de bloques.

Las pruebas de infiltración, se realizaron a una profundidad de 45 cm, cuyos resultados se muestran en la figura 4.5, por lo que la línea de tendencia, de la velocidad de infiltración, versus el tiempo, determina la presencia de un suelo semipermeable, con velocidades promedios de infiltración de 2.0×10^{-2} cm/min. Las pruebas de infiltración, se realizaron en el lugar denominado La Huanchilla. Mediante las ecuaciones de Green y Ampt, se ha determinado un grado de succión $\Psi = 198$ cm, y una conductividad hidráulica $K = 0.05$ cm/h, como se muestra en el cuadro 4.2.

Figura N° 4.5: Resultados de infiltración en la FC: EP-05, El Prado.

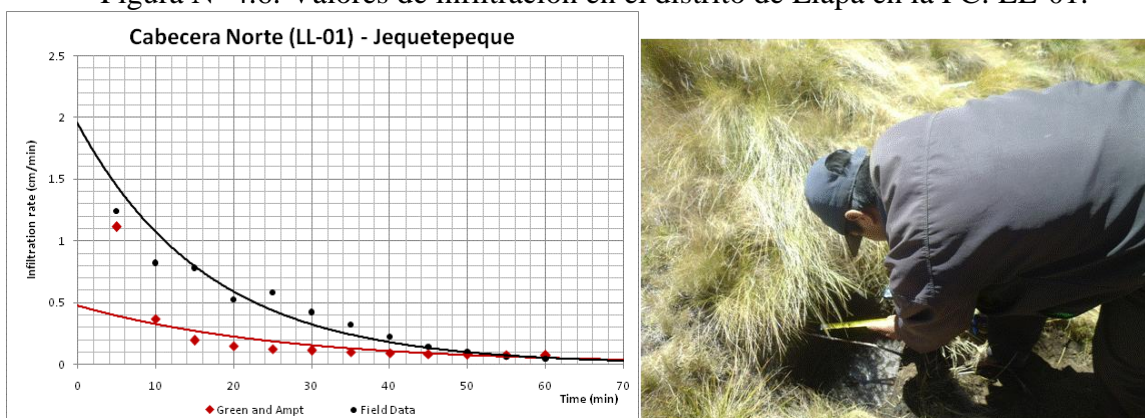


Fuente: Elaboración Propia.

B. En el distrito de Llapa

En el distrito de Llapa, en la FC: LL-01. Los valores de infiltración en esta parte norte de la cuenca, tienen una capacidad semipermeable, debido a la estructura granular del suelo por encima de 40 cm. Así mismo las condiciones de suelo húmico, son producto de capas oscuras de ceniza volcánica que ayudan a propagar una alta vegetación herbácea, especialmente el ichu. Las pruebas de infiltración realizado en esta formación cóncava, alcanzan velocidades promedios de 4.0×10^{-2} cm/min. Las medidas se realizaron en formación cóncava de tipo encajonada, perteneciente a la microcuenca del río Llapa, distrito de Llapa, Provincia de San Miguel, Cajamarca.

Figura N° 4.6: Valores de infiltración en el distrito de Llapa en la FC: LL-01.



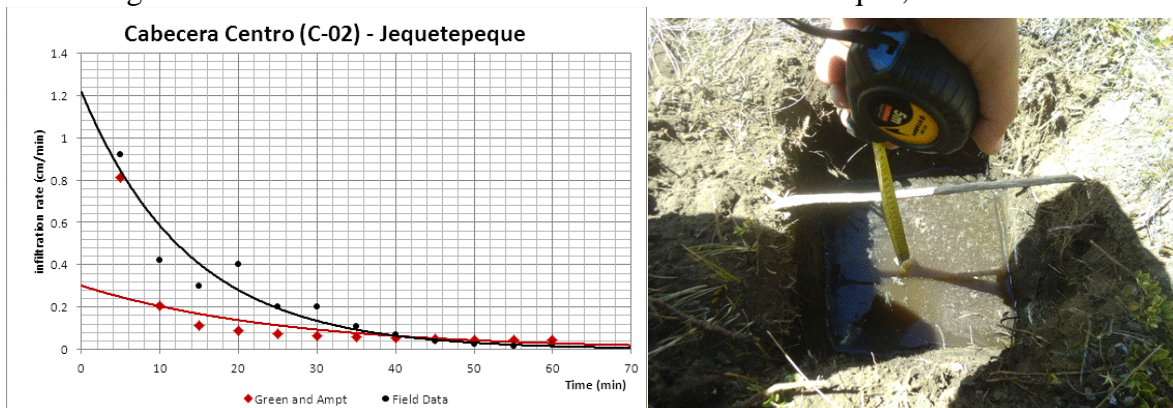
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.6, en los primeros minutos se observa una amplia variación entre los datos tomados en campo sobre la infiltración y el método de Green y Ampt, que luego de 55 minutos aproximadamente, confluyen hacia la infiltración básica; esto se explica por el tipo de suelo granular en los primeros cm del suelo.

C. En el distrito de Calquis

En el distrito de Calquis, en la FC: C-02. El suelo tiene textura franco limoso. La vegetación es de tipo herbácea que retiene la humedad alrededor de 16.9%. Con respecto a estructura, la primera capa es de tipo granular. El segundo horizonte por debajo de los 45 cm, presenta estructura bloquiforme. El promedio de la velocidad de infiltración alcanzada, es de 2.0×10^{-2} cm/min. Por consiguiente, se trata de suelos con capacidad semipermeable. La vegetación predominante es el ichu, juntamente con otras herbáceas de menor tamaño.

Figura N° 4.7: Medidas de infiltración en el distrito de Calquis, FC: C-02

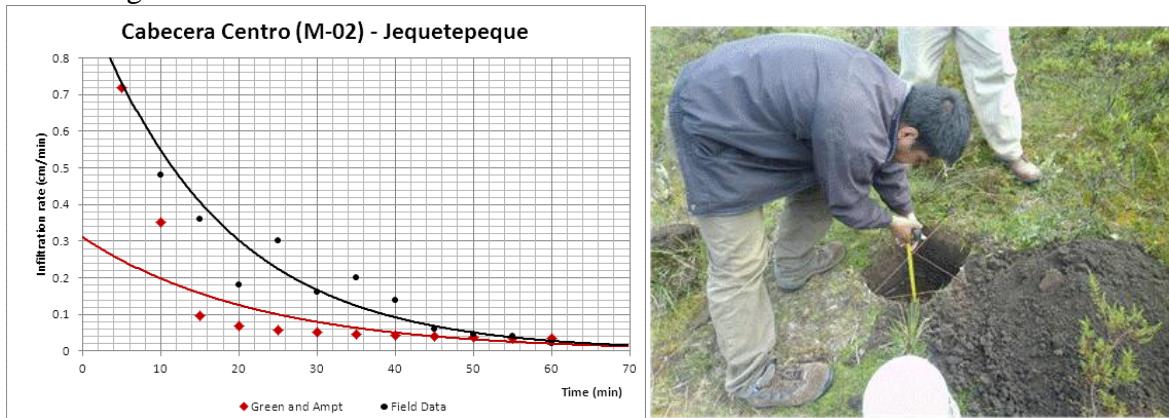


Fuente: Elaboración propia.

D. En el distrito de Magdalena

Las pruebas de infiltración, realizadas en la parte alta del distrito de Magdalena, corresponde a la FC: M-02. Los depósitos son de naturaleza caliza. Este tipo de formación cóncava, presenta esorrentía de recarga directa. Las pruebas de infiltración, se han realizado a inmediaciones de estos espacios, cuyos resultados se encuentran en la figura 4.8, donde el promedio de infiltración, es de 2.05×10^{-2} cm/min. El tipo de suelo que se observa en los 30 primeros centímetros es de color oscuro con una estructura granular, característico de los horizontes A.

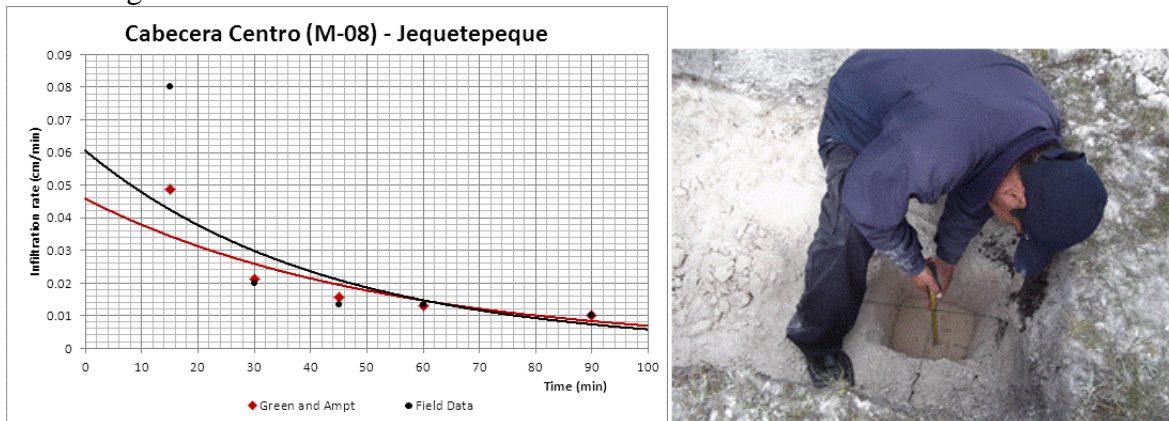
Figura N° 4.8: Medidas de infiltración en la FC: M-02.



Fuente: elaboración propia.

Otras pruebas de infiltración, también realizados en el distrito de Magdalena, en la FC: M-08, arrojan resultados bastante importantes, dados que la característica geológica, que presenta (naturaleza calcárea), lo que ha dado lugar a la formación de procesos kársticos, los mismos, que forman un conjunto de formaciones cóncavas importantes de evaluación.

Figura N° 4.9: Medidas de infiltración en la FC: M-08.



Fuente: propia.

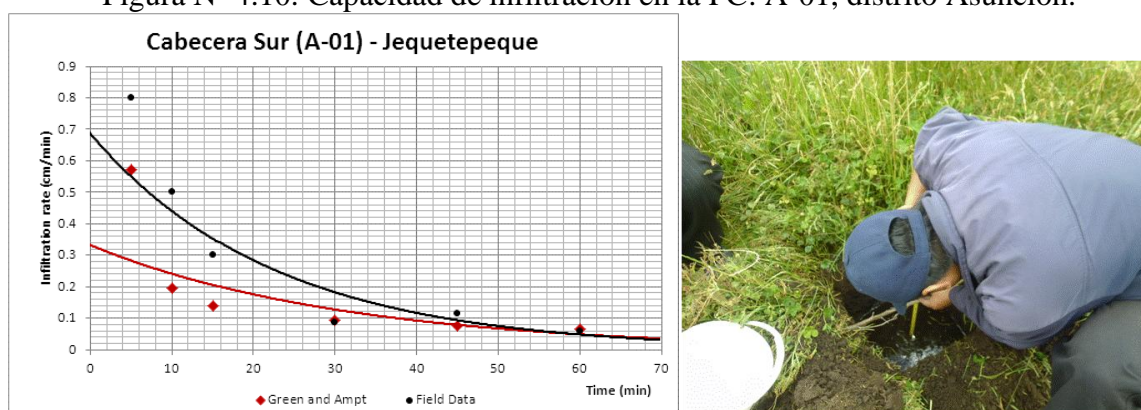
Las características del suelo en los primeros 15 cm, es de consistencia húmica, color oscuro y poroso; subsiguientemente en el horizonte B, se observa la presencia de la caliza altamente compactada. Las pruebas de infiltración, se realizaron en un espacio aledaño a esta formación cóncava, donde se observa que las velocidades de infiltración alcanzan 1.0×10^{-2} cm/min, por lo que se caracteriza a este espacio, como impermeable.

E. En el distrito de la Asunción

En el distrito de la Asunción, en la parte sur de las cabeceras de cuenca del río Jequetepeque, perteneciente a la microcuenca del río Paigual, las pruebas de infiltración, se realizaron en la FC: A-01.

Las características que presenta el suelo, en esta parte de la cuenca, es: en cuanto a su textura es un suelo franco limo-arcilloso; en cuanto a su estructura es de naturaleza granular, subsiguientemente presenta un horizonte B con naturaleza bloquiforme de color marrón pálido (figura 4.10); estas características edafológicas coadyudan a la existencia de porosidad, que según las pruebas de infiltración arrojan un promedio de velocidad de infiltración en campo alcanza 5.9×10^{-2} cm/min, por lo que indica un suelo de tipo semipermeable.

Figura N° 4.10: Capacidad de infiltración en la FC: A-01, distrito Asunción.



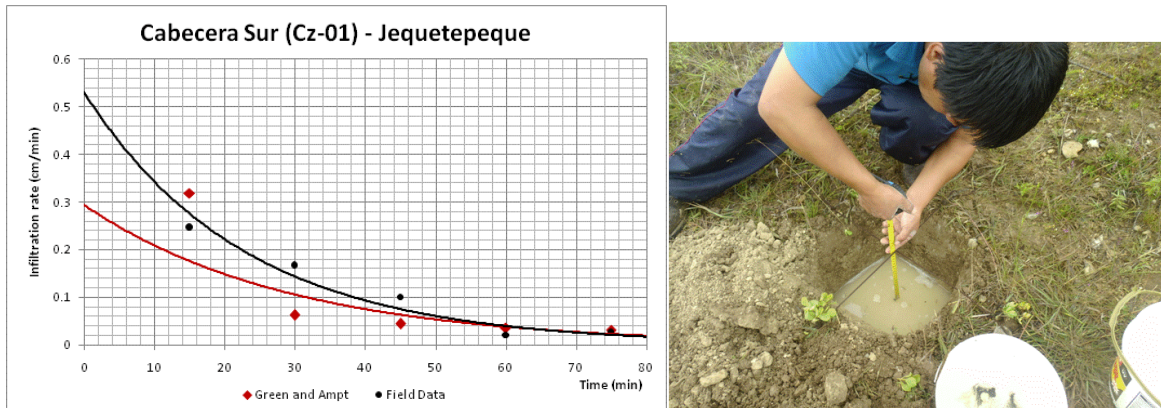
Fuente: Elaboración propia.

F. En el distrito de Contumazá

En este distrito se realizó las medidas de infiltración en la FC: Cz-01, en las cuales se observó un suelo de textura limo-arcilloso de color blanquecino, con una estructura ligeramente granular; la vegetación es medianamente escasa, representado por gramas nativas, plantas arbustivas y la paja andina.

Las pruebas de infiltración (figura 4.11), pertenecen a la microcuenca del río Contumazá, las cuales alcanzan velocidades de 2.67×10^{-2} cm/min, lo que caracteriza a este suelo con una capacidad de permeabilidad media.

Figura N° 4.11: Capacidad de infiltración en la FC: Cz-01



Fuente: Elaboración propia.

La zona sur, hidrográficamente corresponde a las microcuencas de los ríos Paigual, Quinuas, Yaucán, Huertas y Contumazá. Políticamente se encuentran dentro de las provincias de Cajamarca y Contumazá. Las tasas de infiltración de Green y Ampt presentan grados de succión entre 415 y 485 y la conductividad hidráulica es 0.13 y 0.04 cm/h. (cuadro 4.2)

En esta parte de la cabecera de cuenca, el suelo presenta textura franco arenoso y franco arenoso arcilloso; su color varía del rojo y marrón a claro. La flora, es de tipo herbáceo y gramíneo. La geomorfología forma pendientes muy abruptas y la poca intemperización del macizo rocoso disminuyen la capacidad de infiltración. En el distrito de Asunción, la infiltración alcanza alrededor de 6×10^{-2} cm/min, con suelos semipermeable (Pérez, G. 2003), asociado a formaciones cóncavas incrementan los proceso de infiltración y recargas de aguas.

La estructura del suelo, es granular en el primer horizonte, con abundante porosidad y alta infiltración en los primeros minutos; el segundo horizonte forma agregados bloquiformes. En otras zonas los suelos se encuentran en proceso de formación, Alcántara

(2013) y en otros, los suelos son inexistentes, donde se observa un elevado afloramiento rocoso.

Cuadro N° 4.3: Tasas de infiltración en la cabecera de cuenca.

Formación Cónca	Green y Ampt (cm/min)	Campo (cm/min)
EP-01	0.06	0.04
EP-03	0.15	0.12
EP-05	0.02	0.02
LL-01	0.07	0.04
C-02	0.04	0.02
M-02	0.03	0.02
M-08	0.01	0.01
A-01	0.06	0.06
Cz-01	0.03	0.03

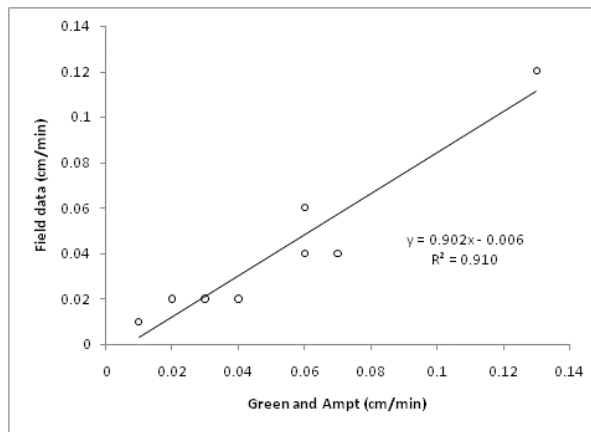
Del cuadro 4.3 y figura 4.12, se observa que a nivel de cabecera de cuenca del río Jequetepeque, la tasa de infiltración tomadas en campo, respecto al método analítico de Green y Ampt, estadísticamente, mantienen una alta correlación durante los primeros 60 minutos de lluvia, con un $r= 0.934$. Se observa que las cabeceras de cuenca cumplen un rol importante en las tasas de infiltración. Estas tasas de infiltración, forman parte del proceso de recargas de agua a nivel subsuperficial, profundo y conservación de humedad del suelo, con una vegetación permanente en la mayor parte de la zona de estudio.

En consecuencia, se observa que el flujo subsuperficial, es el común denominador de las partes altas, básicamente de la cabecera norte de la cuenca (Provincias de San Miguel y San Pablo). La humedad alimenta la escorrentía de los ríos, aun durante las épocas de estiaje. Este tipo de aguas subterráneas, permiten la formación de bosques de altura, siendo los Alisos (*Alnus Glutinosa ssp*) el principal árbol silvestre entre los distritos de El Prado, Calquis y Cochán, vegetación que va desapareciendo en los demás distritos.

Parte de la infiltración de la cabecera de cuenca, que no se pierde por evapotranspiración ni por manantiales, se presume que tiene largos recorridos, hasta alcanzar los acuíferos costeros. Los ojos de agua son escasos en la parte media de la cuenca, pero se observan pozos artificiales en centros poblados de San Miguel, Magdalena,

San Juan y Contumazá. Los acuíferos profundos, (Asim, Docter, Nitzche, Winegar and Echstein, 2004), se manifiestan en la cuenca baja del río Jequetepeque (distritos de Jequetepeque, Pacasmayo, San José, Guadalupe y San Pedro de Lloc); aquí, la explotación de aguas subterráneas satisface necesidades productivas y de consumo.

Figura N° 4.12: Correlación “r” al cabo de una hora de lluvia en cabecera de cuenca del Jequetepeque.



Respecto al método analítico propuesto por Green y Ampt, se observa que es aplicable para el análisis de la infiltración, para la cabecera de cuenca como el del río Jequetepeque. Presenta parámetros de succión altos y las tasas de infiltración medianamente bajas, el cual está asociado a la porosidad y textura de suelos, sin embargo hay que tener en cuenta que las características que presenta las cabeceras de cuenca a diferencia del resto de la cuenca son diferentes, por consiguiente es necesario calibrar los parámetros de ajuste por el método de Green y Ampt, cuyos resultados se obtienen en el cuadro 4.2.

Las tasas de infiltración por el método de Green y Ampt, se puede determinar a partir de dos parámetros básico: el contenido de humedad y la identificación de la textura de los suelos, los cuales se pueden ajustar en función a la vegetación, la pendiente y la intemperización del medio edáfico. Pero es importante resaltar otros parámetros que no se tiene en cuenta como: el intemperismo que favorece la porosidad primaria y secundaria al mismo tiempo y por otro lado la geomorfología característica de estos espacios.

4.2.2 Humedad del suelo

Las medidas de humedad del suelo, se realizaron teniendo en cuenta la cantidad de agua presente en los espacios porosos del suelo, los cuales teóricamente representan el 25% en un suelo ideal; esta evaluación, permitirá contribuir a determinar la capacidad de retención e infiltración del agua en los suelos, así como el aporte de este fluido hacia las plantas. La metodología que se usó para evaluar la cantidad de agua presente en el suelo, estaba determinado por la medida en peso del suelo húmedo, que luego secado mediante una estufa, se realizó una segunda medida del suelo seco, encontrándose su porcentaje de humedad referente del suelo.

Para las medidas de humedad, se utilizó la ecuación 3.2, las que se realizaron en cuatro espacios, como se detalla a continuación.

A. En el distrito El Prado

Las medidas de humedad llevadas a cabo en el distrito de El Prado, en la microcuenca del río Pallac, corresponden a suelos de textura marga a limo arcillosos y de naturaleza húmica, cuyo color característico es marrón oscuro. Las muestras tomadas, corresponde a 30 cm de profundidad en el horizonte A, cuyos resultados se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro N° 4.4: Medidas de humedad del suelo, en la microcuenca del río Pallac.

FC: EP-05 El Prado		
Material	Peso (g)	Porcentaje
Suelo húmedo	49.3	100
Suelo seco	32.6	66.13
Agua	16.7	33.87
Total	49.3	100

Fuente: Elaboración propia.

Las medidas de humedad del suelo para la cuenca del río Pallac, es bastante alto, lo cual alcanza más de la tercera parte de agua contenida en el suelo, esto se complementa

con la presencia de una vegetación del tipo herbáceo abundante. En la cabecera de cuenca, a menor altitud se observa espesa vegetación básicamente arbórea (alisos).

Figura N° 4.13: Medidas de humedad del suelo en el distrito de El Prado. EP-05



Fuente: El autor, 04/07/12.

B. En el distrito de Llapa

Las pruebas de humedad, realizados en este distrito, corresponden a la microcuenca del río Llapa, espacio en la cual existe la presencia de suelo con factor húmico, y textura franco limoso, cuyo color característicos es oscuro. Los resultados de humedad del suelo, alcanza el 16.9%, como se presentan a continuación en el presente cuadro.

Cuadro N° 4.5: Medidas de humedad de suelo en la micro cuenca Llapa.

FC: LL-01 – Llapa

Material	Peso (g)	Porcentaje
Suelo húmedo	57.4	100
Suelo seco	47.7	83.1
Agua	9.7	16.9
Total	57.4	100

Fuente: Elaboración propia.

Del cuadro 4.5, podemos argumentar que, los resultados de las pruebas de humedad realizados en el distrito de Llapa, provincia de San Miguel – Cajamarca, alcanza el 17%, suficiente cantidad de agua para mantener un tipo de vegetación herbácea permanente en esta parte de la cuenca.

Figura N° 4.14: Medida de humedad del suelo. FC: L1-01.



Fuente: El autor, 18/07/12.

C. En el distrito de Asunción

En esta parte de la cabecera de cuenca que corresponde al río Paigual, las condiciones de humedad, son un reflejo indirecto de la presencia de vegetación nativa, las características del suelo presenta una textura limo arenoso, ligeramente oscuro; las pruebas de humedad, se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro N° 4.6: Medidas de humedad del suelo en FC: A-01.

FC: A-01 La Asunción		
Material	Peso (g)	Porcentaje
Suelo húmedo	70.3	100
Suelo seco	60.9	86.63
Agua	9.4	13.37
Total	70.3	100

Fuente: Elaboración propia.

Del cuadro 4.6, se observa que la humedad alcanza el 13.4% en esta parte de la cuenca alta del río Jequetepeque, la cual reflejan una humedad medianamente suficiente para mantener la existencia de vegetación en temporadas de ausencia de aguas; este parámetro está relacionado con las limitadas profundidades del suelo, la compactación y la pendiente.

Figura N° 4.15: Medidas de humedad de suelo en el distrito Asunción.



Fuente: El autor. Junio 2012.

La humedad que mantiene el suelo, es un referente importante del nivel de saturación que tiene este medio. Indica el contenido de agua ya sea hacia los acuíferos y/o hacia la vegetación. Esta humedad, si bien no es abundante, pero es suficiente para mantener la flora nativa básicamente herbácea. Las fuentes de humedad permanente, es la presencia de neblinas periódicas que observadas en campo, se forman en altitudes por encima de 3700 msnm aproximadamente.

El resumen de los resultados de contenido de humedad en porcentaje (θ) y la observación de la vegetación distribuida en zonas de cabecera de cuenca, se observa en el cuadro 4.7, del cual se puede discutir que existe una correlación entre la cantidad de humedad y la presencia de vegetación, condicionado por la presencia de aguas subsuperficiales.

Cuadro N° 4.7: Distribución de la vegetación nativa y la humedad del suelo.

Zonas	θ	Vegetación
Cabecera Norte	33.87	Herbácea, arbustiva y arbórea
Cabecera Centro	16.9	Herbácea y arbustiva
Cabecera Sur	13.37	Herbácea

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Caudales en espacios cóncavos

Es otro de los parámetros evaluados a nivel de cabecera de cuenca, su evaluación se llevó a cabo en las formaciones cóncavas durante los meses de mayor estiaje. Corresponden a medidas de caudal de los principales canales o quebradas, donde se encontraron las formaciones cóncavas, con la finalidad de evaluar la dotación de agua en épocas de ausencia de lluvias.

En la mayor parte de las geoformaciones cóncavas evaluadas, la ausencia de agua, es notoria, principalmente en la margen izquierda de la cuenca, por lo que los registros son prácticamente cero a nivel de cabecera de cuenca.

A. El Prado

Las medidas del caudal, se realizaron en la FC: EP-05. Formación cóncava que pertenece al centro poblado la Huanchilla, en el distrito El Prado, provincia de San Miguel, Cajamarca.

Figura N° 4.16: Canal de distribución de usos de agua. EP-05.



Fuente: El autor, 04/07/12.

Los resultados de la evaluación de los caudales se realizaron en un canal de regadío que transporta agua hacia los campos de cultivo y consumo como se muestra en la figura

4.16. En este espacio se calculó un caudal de 9,3 L/s. La presencia de esta cantidad de agua, refleja una zona con alta humedad. Las aguas también discurren por espacios que no existen formaciones cóncavas y se van concentrando a menor altitud (parte baja de la cabecera de cuenca), donde el caudal sigue incrementándose.

Las medidas de caudal se llevaron a cabo en la microcuenca del río Los Brazos, perteneciente al distrito de El Prado. El recurso, es utilizado por los pobladores para diferentes usos, sin embargo, aún sigue siendo insuficiente frente a la demanda agrícola, ganadera y poblacional del área que cubre esta microcuenca.

B. Calquis

Calquis, es uno de los distritos que se extiende y forma parte también de la cuenca del río Chancay-Lambayeque. La geomorfología que presenta en su mayoría como partes planas, lomas y colinas inclinadas, ayuda al proceso de retención pluvial, sumándose a ello la estructura foliar de la vegetación y el intemperismo, favorecen la acumulación de agua en forma de aguas subsuperficiales, que medidos en campo arrojan un resultado de 1.8 L/s en la FC: C-01.

C. Llapa

Figura N° 4.17: Registro de caudales en la quebrada Llapa.



Fuente: El autor. Julio 2012.

En este distrito, la evaluación de la cantidad del caudal, se realizó en la parte alta de la quebrada Llapa, la cual da origen al río del mismo nombre; la evaluación del caudal, se realizó mediante el método volumétrico, con la utilización de un recipiente de ocho litros, que luego de realizar tres medidas operativas, se llegó a encontrar un caudal de escurrimiento de 1.32 L/s, este caudal es resultado del escurrimiento paulatino en forma subsuperficial que va cediendo el terreno después de haberse acumulado en la temporada de lluvias.

D. Magdalena

El distrito de Magdalena se caracteriza por tener espacios de afloramientos diseminados de agua que la concentran en pequeños canales las cuales descargan en formaciones cóncavas.

Figura N° 4.18: Escorrentía de 3.7 L/s de agua. FC: M-07.



Fuente: El autor.

Los canales de descarga, son fuente receptora de agua de ambas pendiente de la geoformación cóncava. En este espacio de formaciones cóncavas se observan 12.3 L/s, 3.7 L/s y 3.2 L/s dependiendo de la extensión, llevan el agua en forma de escorrentía superficial hacia estos ductos de succión. En las demás formaciones cóncavas se observa

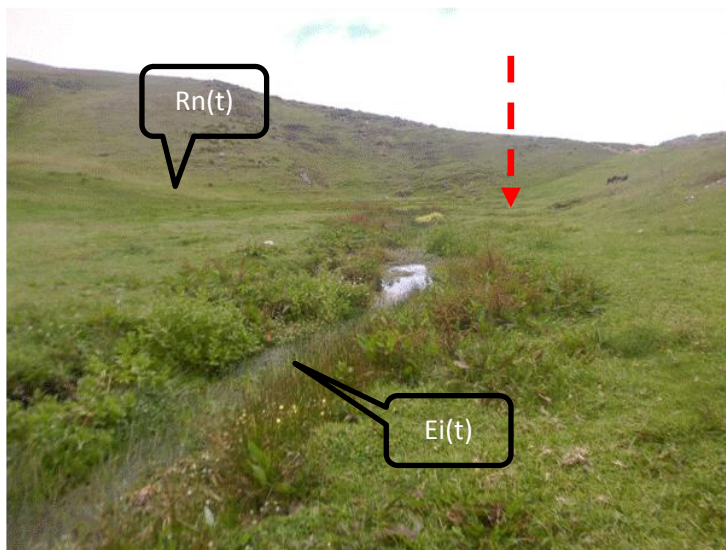
alta humedad con la permanencia de gramíneas básicamente, parámetro característico a los largo de la cabecera de cuenca.

Las evaluaciones del caudal, se realizaron en los meses de julio-agosto, meses más secos para esta parte alta de la Cordillera de los Andes.

La figura 4.18, muestra la formación cóncava con una formación profunda que alcanza unos 10 m de profundidad, la cual canaliza aguas desde recorridos que alcanza un kilómetro aproximadamente.

En la figura 4.19, se observa el recojo de agua a través de un canal, en la cual la formación cóncava está en proceso de formación. Su recorrido es aproximadamente 700 metros de longitud, la cual va canalizando y filtrando por espacio de sumersión natural en forma de pozo, así mismo se observa espacialmente la $R_n(t)$ y $E_i(t)$ (ecuación 4.1).

Figura N° 4.19: Escorrentía de 12.3 L/s de agua. FC: M-08.



Fuente: El autor.

En la figura 4.20, se observa que la formación cóncava tiene una profundidad que sobrepasa los 50 metros de altura y por la cual recarga aproximadamente 29.68 L/s, sus recorridos son bastante largos, tiene una hoya de formación que alcanza entre 500 m de ancho aproximadamente, lo cual le ayuda a acumular buenos caudales en épocas de lluvias.

Figura N° 4.20: Escorrentía de 29.69 l/s de agua. FC: M-12.



Fuente: El autor.

El material geológico circundante, lo forman los afloramientos calizos; por su amplitud, es una de las geoformaciones más antiguas a nivel de cabecera de cuenca del río Jequetepeque.

E. Asunción

Figura N° 4.21: Medidas de caudal en el río Los Zarcos. FC: A-01.



Fuente: el autor. Visita 27/06/12

En el distrito de la Asunción, la evaluación de las medidas de caudal, se realizaron en la parte alta que conecta al río Salabamba y Paigual. Esta zona se encuentra por sobre los 3500 msnm.

La evaluación sobre escorrentía superficial, se realizó en la formación cóncava A-01, en los inicios de la quebrada Los Zarcos (lugar denominado El Progreso) figura 4.21, cuyo caudal arroja un resultado de 0.17 L/s, a lo largo de su cauce se va perdiendo por infiltración profunda. Las medidas se llevaron a cabo en una quebrada endorreica, cuyas aguas van a dar a tragaderos, lo que constituye netamente recargas de agua subterránea.

La presencia de caudal en los demás distritos hacia el suroeste de la cuenca del río Jequetepeque, solamente se observa en las partes bajas, en las partes más altas no se han registrado medida alguna de caudales. A nivel de esta parte de cabecera de cuenca, también se puede observar algunos bofedales con muy pequeña cantidad de agua, pero que no han desarrollado hondonadas.

4.2.4 Variaciones de volúmenes de pérdidas de agua

Para la evaluación de las variaciones de volúmenes de agua, se estableció puntos especiales de observación como referencia del nivel de infiltración y el nivel de evaporación de la cantidad de agua en esta parte alta de la cuenca del Jequetepeque. La variación, está determinada por los desniveles de los espejos de agua en puntos de acumulación del recurso y la ausencia de agua en otros, como se los detalla a continuación.

Uno de los puntos de control es el lugar denominado FC: C-01 Cochán, a una altitud de 3635 msnm, lugar donde se registró una variación importante de agua, como se muestra en el cuadro 4.8.

Cuadro N° 4.8: Medidas de variación de volumen respecto al tiempo.

FC: Ch 01- Cochán					
Codificación	Tiempo	Medidas	Volumen	Δ tiempo	Δ Volumen
C – 01	12 Junio 2012	60x15x0.5	150m ³		
	5 Julio 2012	54x12x0.25	54 m ³	23 días	96 m ³

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando las ecuaciones de infiltración mensual (ecuaciones 2.17 - 2.20), propuesto por Schoninsky (2007), se determinó que existe una infiltración mensual de 8.8 m³. Aplicando las ecuaciones de Thornthwaite, el 50,14% correspondería a la evapotranspiración, por lo que existe un 40.66% de pérdidas de agua, la cual estaría explicado por la presencia de fracturas (porosidad secundaria), lugar donde se presentan condiciones climáticas de altura regidas por bajas temperaturas y altas variaciones de viento (figura 4.22).

Figura N° 4.22: Variaciones de volúmenes de agua. Junio-julio respectivamente.
FC: C-01.



Fuente: El autor, 03/07/12.

En otros espacios, evaluados a nivel del distrito de Calquis, entre la totora y gordillos, se observó la ausencia del recurso hídrico y la formación usual de arcillas del tipo vermiculitas, cuya contracción genera rajaduras en la base de estas pequeñas lagunas estacionales, por la pérdida total del recurso hídrico.

4.2.5 Niveles de sedimentación

La sedimentación en esta parte de la cuenca, está en función a la intensidad de las primeras lluvias. Sin embargo, en la parte alta de la cuenca del río Jequetepeque, existen ciertos parámetros de control: las condiciones de humedad continua, la permanencia de la vegetación, la ausencia de actividades agrícolas, (algunas excepcionales, con sembríos de papa, oca y olluco), disminuyen notablemente la erosión. Solamente en algunos lugares se observan caminos de herradura y en otros la ausencia de vegetación al término de las estaciones secas, lo que conlleva a la presencia de suelos desnudos, los cuales en menor intensidad generarían el traslado de sedimentos.

Utilizando el método descrito en el capítulo III y las ecuaciones 2.21-2.23, se obtuvo el cuadro 4.9, en donde se observa variaciones de alturas de sedimento y en otros, la erosión ocasionada en estos espacios.

Cuadro N° 4.9: Análisis de la sedimentación y erosión en varillas.

Varillas AH (mm)	Puntos de Muestreo								
	EP - 01	EP - 03	EP - 05	LI - 01	C - 02	M - 02	M - 08	A - 01	Cz - 01
1	1	0	1	1	0	0	0	-1	1
2	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	0	-1	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
7	-1	0	-1	0	0	0	0	-1	0
8	0	1	0	0	0	0	0	-1	-1
9	0	0	0	0	0	0	0	1	0
10	0	0	0	1	0	0	0	1	0
Σ	0	0	0	2	0	0	0	-1	0
N	10	10	10	10	10	10	10	10	10
E	1	1	1	2	0	0	0	3	3
S	1	1	1	0	0	0	0	4	3
En	0	0	0	-2	0	0	0	1	0
En=Ep	0	0	0	-2	0	0	0	1	0
Dap	1.9	1.87	2.05	2.07	2.14	2.59	2.12	2.62	2.57
Ers	0	0	0	-41.4	0	0	0	26.2	0

Del cuadro anterior, se observa que ocurre una sedimentación (Ers) alrededor de 40 toneladas/ha anuales y una erosión de 26 toneladas /ha anuales; los cuales están localizados básicamente en la localidad de Ilapa y asunción. Estos valores relativamente bajos, se sustentan en la vegetación perenne básicamente herbácea y arbustiva.

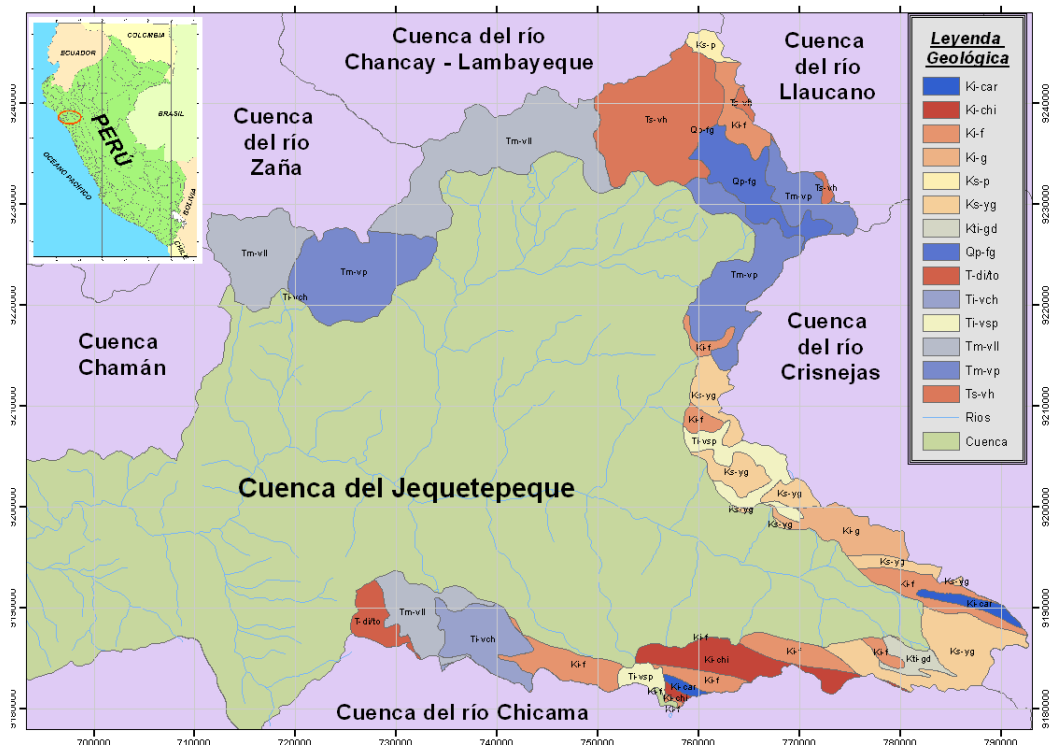
Según este método, por ser bastante puntual, solamente detecta las partículas arenosas y limos grandes, pues no toma en cuenta las pequeñas partículas, montículos o materia orgánica que flota sobre el agua, los cuales son transportados en suspensión.

4.3 GÉNESIS DE GEOFORMACIONES CÓNCAVAS

4.3.1 Carácter geológico en las formaciones cóncavas en la cabecera de cuenca

A nivel de la cabecera de cuenca del Jequetepeque, según la figura 4.23, se observa un total de 15 formaciones geológicas, las cuales están relacionadas en distintas eras y sistemas de formación. Su distribución se presenta en la figura siguiente:

Figura N° 4.23: Geología de la cabecera de cuenca.



Fuente: Mapa Digital del Perú- adaptado

En concordancia con la información publicada por el INGEMMET, y las observaciones en campo durante el recorrido en la cabecera de cuenca, los afloramientos pertenecen a las eras cenozoica y mesozoica, con las unidades estratigráficas como se muestra en la gráfica N° 4.23.

La cabecera de cuenca conformada por un cinturón de un ancho promedio de 5 700 m, se encuentra formado por un conjunto de formaciones estratigráficas, afloramientos plutónicos y volcánicos y depósitos sedimentarios las cuales han ido generando un modelamiento geomorfológico producto del intemperismo.

La acción de los agentes ambientales, tales como la temperatura y básicamente el agua, han generado las geoformaciones cóncavas, espacios importantes de filtración que tienen que ver con el tipo de geología encontrados en el lugar, las cuales se pueden observar en las figuras 4.24 – 4.26.

Este tipo de geoformación, tiene relación con el proceso de la formación de formaciones cársticas y con ello las geoformaciones cóncavas. Los procesos que ocurren son: carbonatación e hidrólisis de calizas, margas y dolomitas (calizas magnésicas), que entran en proceso de descomposición modificando la corteza terrestre y generando vacíos en el interior, en la cual el sustrato al no tener un basamento, va cediendo y formando hondonadas.

El proceso de hundimiento es puntual al cual convergen las pendientes de influencia que en el futuro generan corrientes de agua convergentes a un punto de filtración alimentando las aguas subterráneas profundas.

Figura N° 4.24: Proceso de succionamiento circular de la superficie.



Fuente: El autor.

La superficie terrestre, debido a los procesos de masa y peso, tiende su gravedad hacia el centro de la tierra, en este sentido en la figura 4.25, se observa que los hundimientos ocurrieron aproximadamente en los últimos 200 años, teniendo en consideración la vida media de los pinos y los eucaliptos (plantas que se encuentran en el centro de gravedad), son parte de los procesos de succionamiento, cuya tendencia es la búsqueda de agua debajo de la superficie.

Figura N° 4.25: Proceso de succionamiento amorfo de la superficie.



Fuente: El autor.

En la figura 4.26, se observan procesos de succionamientos recientes, con un periodo aproximado de 30 años (en función de la profundidad y la mezcla de horizontes

del suelo), en donde las características del suelo, en un solo plano, tienden a ceder frente a las fuerzas de succión interna, producto de la alteración del macizo rocoso metros más adentro. Este proceso es mucho más intenso cuando se ha generado un rompimiento y deslizamiento de masas de suelo, formando una hondonada, la misma que cederá con mayor velocidad de acuerdo a la intensidad de lluvia y la acumulación de la misma, que, posteriormente en unos cuantos cientos de años, generarían geoformaciones cóncavas ayudando al proceso de importantes recargas de agua.

Figura N° 4.26: Proceso de succionamiento ovoide de la superficie.



Fuente: El autor.

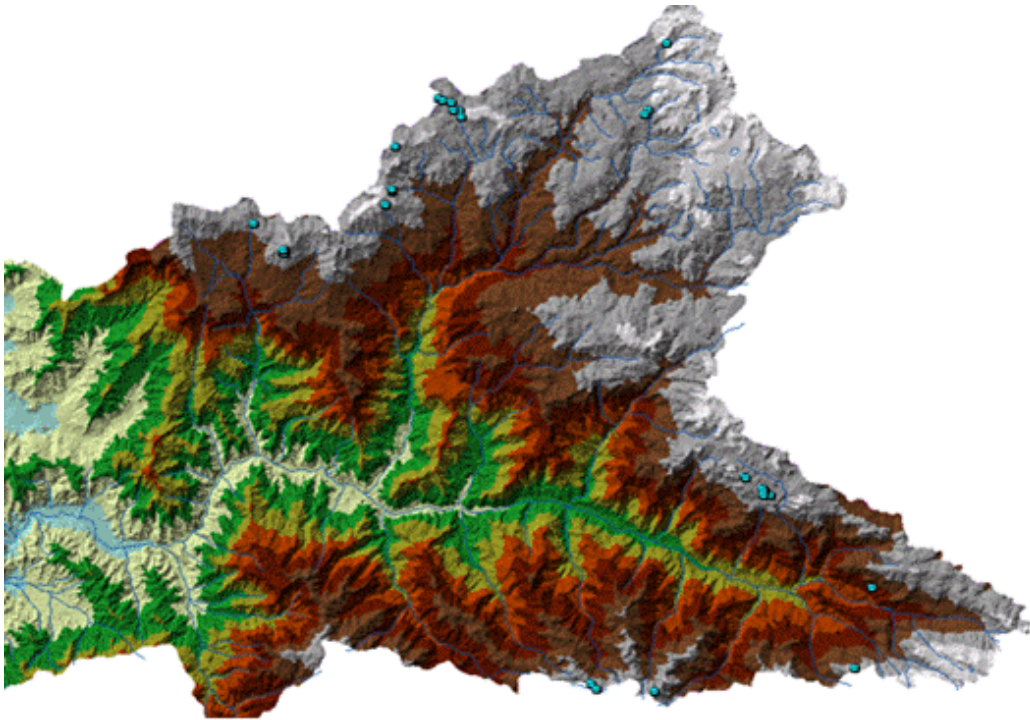
4.3.2 Identificación geomorfológica de la cabecera de cuenca

El uso de los sistemas de información geográfica, es una de las herramientas utilizadas para este propósito. Los resultados del relieve en la cuenca, se ilustran en función de tonalidades, en la cual los matices de plomo a blanco, corresponden a los espacios de mayor altitud, que, políticamente corresponden a las provincias de San Miguel, San Pablo y Cajamarca; además como se ilustra en la figura 4.27, la ubicación de las formaciones cóncavas, corresponden a los espacios más altos, muchos de ellos se encuentran cercanos los límites del Divertium Aquarium,

En campo, las evaluaciones que se realizó respecto a la geomorfología, no es uniforme a lo largo de toda la cuenca. En la parte norte de la cabecera de cuenca, predomina una geomorfología de lomas, colinas y formación de hondonadas, así como la

presencia de pendientes leves a medianamente inclinadas, hasta la formación de pequeñas planicies. Este tipo de superficie, ha generado un relieve isomórfico en la que se observa formaciones cóncavas y convexas de amplia base.

Figura N° 4.27: Uso del TIN, para el procesamiento geomorfológico en ArcGIS.



Fuente: Base digital del Perú, adecuado.

El análisis de las características geomorfológicas de la cabecera de cuenca del río Jequetepeque, se realizó mediante el método topográfico, utilizando los tipos de descripción de pendiente propuesto por la FAO (2006), cuyos resultados se muestran en el cuadro de la gradiente de pendiente.

Del cuadro 4.10, se observa que, en la parte norte de la cabecera de cuenca en estudio (El Prado, San Miguel, Llapa, Calquis y Cochán), el 67% de los espacios se encuentra formado por lomas y colinas, con pendientes leves y la formación de pequeñas planicies. En ella se encuentran el 46% de geoformaciones cóncavas (figura 4.28). 1/3 de las superficies son planas a ligeramente inclinadas, más del 30 por ciento oscila entre 5–

10% de pendiente, generalizando como pendientes ligeramente inclinadas, FAO (2006); sin embargo, a menor altitud la pendiente va aumentando.

Cuadro N° 4.10: Gradiente de la pendiente.

FAO		Cabecera de cuenca		
Rango (%)	Descripción	Norte %	Centro %	Sur %
0 - 0.2	Plano	6.67	0	0
0.2 - 0.5	Nivel	0	0	0
0.5 - 1	Cercano al nivel	0	9.09	0
1 - 2	Muy ligeramente inclinado	6.67	9.09	0
2 - 5	Ligeramente inclinado	20.00	0	15.38
5 - 10	Inclinado	33.33	27.27	30.77
10 - 15	Fuertemente inclinado	26.67	36.36	7.69
15 - 30	Moderadamente escarpado	6.67	9.09	38.46
30 - 60	Escarpado	0	9.09	7.69
> 60	Muy escarpado	0	0	0
Total		100	100	100

Fuente: FAO, con resultados propios.

En la parte media del cinturón de la cabecera de cuenca (distritos de Magdalena y Cajamarca), la geomorfología se va modificando levemente, se observa colinas, valles de altura y pendientes medias a fuertes.

Figura N° 4.28: Variación de la Geomorfología (parte norte y sur de la cabecera de cuenca).



Fuente: Propia.

Con dirección al sur, se observan la aparición de cerros y cordilleras, (figura 4.28). Las pendientes son fuertemente inclinadas a abruptas alcanzando posición vertical. Se observan afloramientos rocosos con vegetación estacional. Los cambios paisajísticos son notorios, verde en épocas de invierno y amarilla en épocas de verano, lo que no ocurre en la parte norte.

Además, se observa que los procesos de meteorización y tipos de material geológico, han generado formaciones cóncavas, donde las recargas de agua subterránea es total, producto de la infiltración difusa o puntual. Las formaciones cóncavas, se encuentran en los distritos de Magdalena y Asunción principalmente, los pobladores la denominan “tragaderos”.

La geomorfología, no es homogénea a lo largo del cinturón de las cabeceras de cuenca del río Jequetepeque. La geomorfología es influyente en los procesos de infiltración y acumulación de agua superficial y profunda. A pendientes bajas y medias, el agua se retiene mayor tiempo. En pendientes pronunciadas, por gravedad, el agua se desplaza con mayor rapidez, disminuyendo la capacidad de infiltración e incrementando el potencial de transporte de sedimentos; siendo más perjudicial el suelos con menor vegetación.

En la cabecera norte, donde existe menor pendiente, se observa mayor concentración de humedad y vegetación permanente de herbáceas, arbustivas y arbóreas. En la parte sur la vegetación es más dispersa y escasa.

Las aguas subsuperficiales, es un evento importante que se observa en parte alta de la cuenca, influenciado por los tipos de textura y estructura del suelo, altos índices de fisuras del macizo rocoso, la geomorfología superficial y altos niveles de infiltración, consecuentemente se evidencia en la escorrentía de agua por los ríos durante la mayor parte del año.

En el análisis geomorfológico, la pendiente del terreno, es uno de los elementos de mayor consideración en el traslado de las partículas del suelo en dirección de la gravedad,

la pendiente ayuda o dificulta que las partículas se rueden o deslicen por la incidencia de agentes externos, con la consiguiente formación de sedimentos y modificación del medio.

Las observaciones en campo sobre la geomorfología, indican que son el resultado de una fuerte intemperización por un lado y acción de las plantas por otro, tal es el caso que en la mayor cantidad de espacio de las cabeceras de cuenca, se ha encontrado el predominio de lomas con pendientes predominantemente bajas. En la zona de San Miguel las pendientes en las partes más altas oscila entre 5° y 45° a lo largo de 200 a 300 m en dirección a la formación de quebradas; luego la topografía, se va tornando más agreste con pendientes que alcanzan los 75°. En Magdalena, las zonas más altas, son relativamente planas, que debido a la presencia de carbonatos de calcio (caliza), lo que ha originado, son formaciones cóncavas importantes, observándose infiltración puntual como agua de escurrimiento. En Contumazá, el panorama es más agreste, debido a las pocas cantidades de vegetación que no han ayudado a modelar el paisaje de manera uniforme, tal es así que existen espacios abruptos de pendientes muy pronunciadas y donde es difícil la acumulación de aguas en forma de aguas subterráneas subsuperficiales.

4.3.3 Factores Endógenos

En el grupo de los factores endógenos influyentes en la génesis de las geoformaciones cóncavas, se puede mencionar:

A. La actividad física del agua

El agua, en su proceso de infiltración y escurrimiento por canales subterráneos, genera un roce en contacto (abrasión), lo que conlleva un desprendimiento de las partículas que se encuentran inestables hacia profundidades inmediatas de su posición inicial.

En la parte alta de las cuencas, es usual encontrar a la andesita, como la principal roca volcánica en estos lugares; sin embargo un 33.6 % de las cabeceras de cuenca del río en estudio, lo constituyen las calizas, las mismas que se encuentran disponibles a procesos de meteorización física y química endógena.

La temperatura, es otro parámetro físico. A nivel de la cuenca alta, presenta grandes variaciones durante el día y durante las noches; así, el promedio de temperaturas máximas registradas en la Estación Porcón, se encuentra entre 16.9 °C y la temperatura mínima llega a 3.3 °C, esta variación de temperatura superficial, influye sobre los diferentes materiales expuestas a la intemperie, específicamente de los macizos rocosos (termoclastia y gelifración), quienes sufren las consecuencias de dilatación y compresión, cuya consecuencia final es el rompimiento o fracturamiento de los cristales originando fracturas que ayudarán posteriormente al proceso de infiltración secundaria y con ello la capacidad de almacenamiento de agua subsuperficial.

Estos procesos de dilatación y contracción son fortalecidos también por la intensidad de los vientos, quienes ayudan a mejorar el diferencial de temperatura y generando un intercambio de gases a unos cuantos centímetros por debajo de la superficie del suelo, lo cual ayudan en menor manera a ampliar el foco de dilatación y contracción de los materiales rocosos.

Así mismo, otro de los procesos físicos a nivel de cabecera de cuenca, se tiene los procesos de variación geotérmica interna, el cual también influye en el comportamiento de la geomorfología. Los fenómenos de contracción y dilatación terrestre, generan vacíos y rupturas o modificaciones volumétricas que son aprovechadas por las masas de suelo superficial en pos de su proceso de acomodación.

El gradiente geotérmico, oscila en 1 °C por cada 33 m (Rivera, 2011), sin embargo, este valor como promedio, es dependiente de muchos factores como: la altitud, el clima, los tipos de rocas, entre otros quienes varían este gradiente. Las observaciones realizadas en el estudio de campo en la cuenca del río Jequetepeque, en los 30 primeros centímetros litosféricos de las cabeceras de cuenca, se mantienen medianamente a temperatura ambiental, en este sentido, el clima externo tiene una influencia muy directa, pues, tiende a tener una influencia más profunda a medida que el nivel de fracturamiento alcanza mayor amplitud, este fenómeno geológico, es usual en la presencia de los macizos rocosos por lo

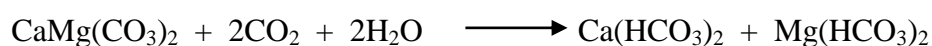
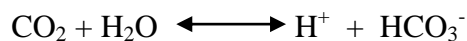
que ayudaría en la difusión de aire frío metros más abajo, lo cual también ayuda a los procesos de infiltración y almacenamiento de agua.

Otro de los eventos que ayuda a transmitir el nivel de calor centímetros debajo de la superficie, es el flujo de agua fría, en razón de sus bajas temperaturas a nivel superficial, son transmitidas secuencialmente en todas direcciones a medida que avanza hacia las profundidades del suelo; este conjunto de fenómenos poco estudiados, ayuda a aumentar el nivel de porosidad y fracturamiento de la litosfera en estas partes altas de la cuenca, que como consecuencia favorable, se tiene mayor porcentaje de almacenamiento de agua tanto subterráneo profundo como subterráneo subsuperficial

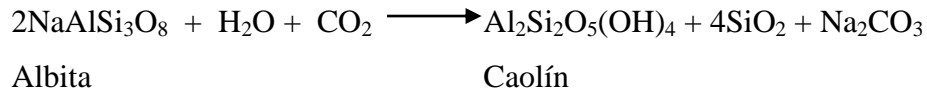
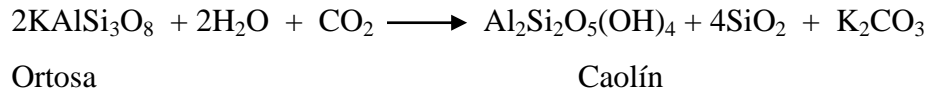
B. Actividad química del agua

Uno de los agente que mejor contribuye a la modificación de la litosfera interna, es el poder disolvente del agua, el cual va incorporando partículas hacia su masa fluida, lo que genera a través del tiempo un conjunto de espacios forados; estos espacios forados, son rellenados por las masas superiores las cuales se van asentando y posterior modificación de la geomorfología superficial y la posterior existencia de formaciones cóncavas.

Por otro lado, los procesos de disolución y carbonatación (Rojas & Paredes, 2008; Rivera, 2011), que generan las aguas en su escorrentía subterránea al unirse al gas carbónico, forman el ácido carbónico, los cuales tienen incidencia importante en la descomposición de las calizas y margas básicamente, que tienen un efecto importante en el modelamiento interno de la corteza terrestre.



Dolomita



En tal sentido, el agua actúa en todos los procesos químicos de intemperización superficial de la litosfera; debajo del suelo, actúa como un factor disolvente principalmente de los compuestos fácilmente solubles, entre ellos el carbonato de calcio, formando carbonato ácido de calcio, lo que implica que, a través de cientos y miles de años coadyuda a la generación de geoformaciones cóncavas; este tipo de modelado subterráneo, conlleva a la sumersión paulatina de la superficie terrestre, debido a los espacios que el agua va dejando a su paso y con ello generando un conjunto de forados de diversas dimensiones, como: lagunas subterráneas, cuevas, ductos, galerías y otros, los que favorecen el libre tránsito de corrientes de agua subterránea.

C. Niveles de meteorización

Los procesos de meteorización, es un evento geológico al cual no es ajeno este tipo de espacios; consiste en la ruptura o desintegración física y descomposición química de los materiales terrestres por procesos físicos, químicos y biológicos (López; Rubio & Cuadrat. 1992); (Gutiérrez, 2008). Eventos como la termoclastia, gelifracción, hidrólisis y otros, han generado transformaciones importantes en la formación de los primeros centímetros y metros de la estructura del suelo, donde la presencia de vegetación básicamente por gramíneas, el ichu y vegetación nativa cumplen un rol importante en los procesos retención e infiltración de las aguas producto de las precipitaciones estacionales y la transformación de las geoformaciones.

Los procesos de meteorización en esta parte alta de la cuenca, han modificado la morfología superficial, transformando el paisaje nativo pétreo en la generación de partículas minerales elementales (arenas, limos y arcillas) que junto con la materia orgánica han transformado un paisaje con abundante flora y fauna. Independientemente la vegetación que

ha logrado adaptarse a estos medios, ha desarrollado capacidades para el atrapamiento de niebla y gotas de lluvia para inmediatamente conducirlos hacia el fondo del suelo, evitando la escorrentía inmediata y mediata.

Respecto a la formación del suelo, en algunos espacios se observa que la profundidad de la meteorización ha alcanzado unos pocos centímetros, lo que ha dado lugar a la formación de suelos zonales, donde, debajo del primer horizonte (A), se observa como segundo horizonte en formación, el horizonte C; estas formaciones, traen consigo que las aguas producto de la precipitación que contactan la superficie, inmediatamente encuentran espacios para la escorrentía subterránea, lo que conlleva la alimentación de los acuíferos subsuperficiales y profundos.

Figura N° 4.29: Intemperismo y formación de horizontes del suelo.



Fuente: El autor.

Producto de la meteorización (figura 4.29), las aguas subsuperficiales son el común denominador de las partes altas, básicamente del extremo norte de la cuenca (Provincias de San Miguel y San Pablo), dado que se observa una escorrentía continua, aun durante las épocas de estiaje y con ello la presencia de vegetación verde durante toda la temporada anual. Este tipo de acuíferos, también genera espacios más abajo, los inicios de formación de bosques de altura, siendo los alisos el principal árbol silvestre entre los distritos de El Prado, Calquis y Cochán, vegetación que va desapareciendo en los demás distritos.

Por otro lado, los acuíferos profundos, generan largos recorridos, pues la ausencia de manantiales en la parte media de la cuenca son poco usuales, pero sí la presencia de agua en pozos artificiales en los centros poblados de los distritos de San Miguel, Magdalena, San Juan y Contumazá. Los acuíferos profundos respecto a las cabeceras de cuenca, se encuentran a nivel de cuenca baja, distritos de Jequetepeque, Pacasmayo y San José, y parte de Guadalupe y San Pedro de Lloc, donde la explotación de aguas subterráneas es notoria.

En otros espacios, los procesos de meteorización y los tipos de material geológico, han generado la formación de hondonadas, en donde la totalidad de la precipitación que se genera en los espacios de influencia de la formación cóncava, genera las recargas totales de agua subterránea a través infiltración difusa o puntual, este tipo de geomorfología se encuentra ampliamente distribuido en el distrito de Magdalena y parte del distrito de Asunción; este evento estaría reflejado con las recargas de agua hacia la parte baja, dado que todos los eventos de lluvia, finalmente son absorbidos por la superficie terrestre motivo de la presencia de geoformaciones cóncavas.

A nivel del distrito de San Juan y Jesús, debido a las características del macizo rocoso, los procesos de meteorización han originado la formación de suelos poco profundos y donde las características topográficas, no han dado lugar a la suficiente acumulación de material edáfico, capaz de mantener la humedad más allá de los periodos húmedos. En lugares con pendientes medias a bajas, los minerales arcillosos y la predominancia de suelos silicatados, han determinado el poco desarrollo de la vegetación o vegetación muy pobre, por consiguiente los deficientes índices de humedad ha conllevado a la presencia de suelos eriazos; estos fenómenos de poca vegetación, pendientes medias a altas y suelos con poca materia orgánica, han generado ambientes con poca capacidad de infiltración y deficiente humedad (cuadro 4.7), por lo que en épocas de estiaje la vegetación existente, tiende a la sequedad y denudación de los suelos, lo que conlleva a otro de los problema que es el transporte de sedimentos (cuadro 4.9).

A nivel del distrito de la Asunción, las pendientes medias a altas, son mucho más notorias, pero con la existencia de algunas geoformaciones cóncavas, evento que conlleva

al escurrimiento rápido de las precipitaciones hacia las recargas de aguas profundas, y donde la acumulación de aguas subsuperficiales son muy escasas, dado que la formación de suelos son de pocos centímetros con una deficiente formación del horizonte C, estos fenómenos generan el aprovechamiento del agua estacional y la ausencia de agua en temporada seca.

A nivel de Contumazá, la deficiente meteorización y la presencia de pendientes altas a abruptas, ha generado el acarreo del material hacia las partes más bajas. La deficiente formación de material edáfico, conlleva a concentrar menor cantidad de humedad (13.37%). Por lo tanto, la denudación de las rocas, la presencia de escasa vegetación y las inadecuadas prácticas forestales (siembra de eucalipto), ha generado que las aguas producto de la precipitación no tenga el tiempo suficiencia de encontrar espacios para su escorrentía media ni profunda, y con ello las deficiencias de agua en épocas de estiaje y el rápido escurrimiento superficial con alto potencial de erodabilidad de suelos.

En términos generales, los niveles de meteorización son mucho más notorios en la parte norte del cinturón de la cabecera de cuenca, con la consiguiente formación de dos a más horizontes en formación lo que disminuye hacia la parte sur donde predomina un horizonte R, debajo de un horizonte A.

4.3.4 Factores Exógenos

Con respecto a las variables exógenas, que tienen incidencia en la formación de geoformaciones cóncavas, se menciona a las siguientes:

A. La acción erosiva del agua

El agua por naturaleza, va generando un proceso de carcavamiento a lo largo de su recorrido, lo cual genera el traslado de las partículas sueltas superficialmente, esto se produce por dos procesos; el primero, está relacionado directamente con la pendiente de escurrimiento, y en segundo lugar, la cantidad de agua, lo que genera el desarrollo de una enorme fuerza en su proceso de escurrimiento.

La intensidad de erosión del agua depende de la cantidad de masas del fluido y la falta de protección del suelo; en principio el humedecimiento del suelo juega un papel importante. Se ha observado que las precipitaciones empiezan de manera pausada y temporal en los primeros meses de lluvia (octubre-noviembre). Estas primeras lluvias, sirven de asentamiento del polvo y humedecimiento inicial y posterior crecimiento de plantas herbáceas. Este evento disminuye de capacidad erosiva que podría generarse en el resto de temporadas de lluvia, es decir lluvias muy intensas, periodo en el cual, solamente encuentran vegetación, por lo que los suelos ya se encuentran altamente protegidos evitando la pérdida de suelos y el transporte de sedimentos (cuadro 4.9). Este evento de sucesión de lluvias, ayuda en la generación de acolchonamiento del suelo para que el agua se retenga mayor cantidad de tiempo y con ello mayor capacidad de infiltración, evento que va a favorecer la percolación, donde el agua discurre por los poros de los suelos, ayudado por la presencia de raíces, evitando desgastes importantes de la calidad de suelo y evitando su alteración química, lo que posteriormente originaría las aguas subterráneas subsuperficiales.

Otro evento importante a nivel superficial, simultáneamente es la actividad química del agua, actuando de manera considerable en el modelado de las rocas superficiales, dando lugar a la formación de lapiaces y desnudamiento de las rocas con la posterior formación de columnas erguidas conocidas como chimeneas de hadas o el bosque de piedras encontradas en varios puntos a lo largo del recorrido de las cabeceras de cuenca del río Jequetepeque; este proceso de actividad del agua sobre las rocas, ayuda indirectamente con la acumulación de material suelto a inmediaciones lo que contribuye favorablemente a la acumulación temporal del agua, ayudando a la humedad característica de la parte alta de las cuencas.

B. La calidad del material superficial

La consistencia y compactación del material superficial a nivel de cabecera de cuenca, va a determinar la generación de traslado de las partículas de un lugar a otro por

diferentes agentes y fenómenos existentes en el medio, tal es el caso de la pendiente, la gravedad, la acción del viento, el agua, agentes de tránsito y movimientos geológicos.

El material superficial observado en las partes altas de la cuenca del Jequetepeque, durante los estudios de campo, se ha podido establecer que en los últimos cientos o miles de años, ha sufrido una fuerte intemperización producto de los agentes atmosféricos básicamente, siendo los fenómenos preponderantes en esta acción la temperatura y las precipitaciones, resultado del cual se ha generado acumulaciones de material ayudados por la actividad biológica de las plantas y microorganismos en la formación de suelos especialmente andisoles. En los primeros centímetros del suelo, existe una alta actividad de las raíces que ayudan en el proceso de permeabilidad de los suelos, formando estructuras granulares que alcanzan los 80 cm de profundidad en lugares de deposición más o menos plana. Otro factor de la calidad del material del suelo, son la formación de diaclasas, cuyo fracturamiento alcanza a varios metros de profundidad observado especialmente en los macizos calcáreos (figura 4.29), estos elementos son influyentes en la acumulación de agua subterránea a nivel subsuperficial que posteriormente originará los manantiales y/o bofedales, los cuales son una fuente muy importante de agua y humedad en la parte alta de la cuenca y con ello la presencia de flujos de agua mediana durante la estación seca.

La incidente y continua alteración de la superficie, ha generado en la parte alta, una geomorfología particular, principalmente en la formación de lomas y colinas (figura 4.28). Gran parte de las cabeceras de cuenca presenta esta topografía, favoreciendo la humedad y la vegetación característica para estos espacios. La grama andina y el ichu principalmente, son elementos que van a ayudar a disminuir la velocidad y el rápido escurrimiento del agua, favoreciendo positivamente a la retención de humedad temporal y disminuyendo o minimizando la erosión de suelos y el traslado de sedimentos.

C. La incidencia de la temperatura

La temperatura dilata los cuerpos sometidos a periodos prolongados de acción del calor y la acción del frío por procesos de contracción. Las rocas, son una mezcla de cristales de diferente estructura molecular y como tal tienen diferente grado de dilatación

que sufren el proceso denominado meteorización generando un resquebrajamiento (figura 4.18) y su posterior traslado hacia otros espacios por agentes externos, lo que modifica y diseña considerablemente la geomorfología.

Uno de los eventos de importancia en el modelado de la parte alta de la cuenca en estudio, es el fenómeno de la temperatura, cuyo efecto principal reside en la insolación hacia los cuerpos desnudos básicamente como es el caso de las rocas aflorantes, quienes sufren las mayores consecuencias en la dilatación y contracción; esta constante interacción del aumento y disminución de la temperatura (anexos), ha dado lugar al resquebrajamiento y fracturamiento de las rocas, sumándose a ello la actividad de las raíces lo que finalmente ha dado lugar a la formación de materiales finos como gravillas, arenas, limos y arcillas, los que han ido modelando la geomorfología de las cabeceras de cuenca.

D. La incidencia del viento

La fuerza del viento, también es un elemento incidente en la formación y modificación del paisaje y la geomorfología en la parte alta. En estos espacios, se suscita ventiscas temporales de intensidad, lo que conlleva al traslado del material edáfico a lugares más estables.

Se ha podido registrar en forma práctica que la mayor intensidad de vientos, es predominante en la parte alta de Llapa; los vientos alcanzan 1.2 m/s, cuyos horarios coinciden entre las 3 pm a 10 pm.

Los vientos predominantes en la zona alta de la cuenca, son vientos fríos que alcanzan el ras de la superficie, ayudando al intercambio del flujo de aire contenido en la porosidad del suelo. Su efecto es la variación de temperatura del suelo, ayudando también a los procesos de dilatación y contracción de los materiales a varios centímetros de profundidad. Paralelamente la intensidad de los vientos genera el traslado de diversas partículas, ayudando a la acumulación de material fino en lugares apropiados, acondicionando áreas con posibilidades agrícolas.

El desprendimiento de partículas, intensifica el modelado de los materiales rocosos. Su efecto es la construcción de los bosques de piedra característica de las alturas de varias zonas que forman la parte alta de la cuenca en estudio.

E. La presencia de la vegetación

La vegetación tiene una incidencia en la modificación de la geomorfología, la incorporación organógena de la planta, altera y modifica sectores del suelo y parte del macizo rocoso durante su proceso de germinación, crecimiento y desarrollo. La vegetación tiene un efecto erosivo en el resquebrajamiento y partitura de las rocas, ayudan a la incorporación de humedad en del desarrollo evolutivo del suelo.

A lo largo de la cuenca, podemos distinguir dos espacios bastante diferenciados, la margen derecha de la cabecera de cuenca y la margen izquierda; en la primera, predomina mayor cantidad de humedad, la cual ayuda a la permanencia de vegetación y con ello la capacidad de aumentar y/o retener cantidades de agua importante. En la margen izquierda, se observa la influencia de la variación estacional y una relación directa con la ausencia de agua en épocas secas.

La vegetación es muy variada, desde la presencia de plantas herbáceas, representadas por el ichu, hasta plantas arbustivas como la zarzamora, y las plantas arbóreas como el eucalipto, el pino y el quenuel (figura 4.1); cada uno de ellos cumple un rol importante en la captación, retención y distribución del agua, cuando éste está presente.

La vegetación herbácea, es la más abundante, y sirve como acolchonamiento de la velocidad con que impacta las gotas de agua en el suelo, al mismo tiempo que la retiene y la dirige en dirección del tallo y raíces, con ello ayuda a retener el agua por más tiempo y por ende aumenta la capacidad de infiltración hasta su saturación si la intensidad de lluvia continua, caso contrario, las aguas infiltradas van percolando y originando acuíferos profundos o aguas subsuperficiales.

F. La incidencia humana

Las actividades antrópicas, ya sea de forma ancestral o contemporánea, incide en la modificación de la geomorfología, desde las actividades de pastoreo y el tránsito por los espacios, genera el traslado de las partículas de un espacio hacia otro. En mayor medida las actividades extractivas, son agentes modificadores de la geomorfología aún con una deficiente regulación alteran la topografía superficial y debajo de ella.

El hombre andino, ha tratado de utilizar todos los espacios con el fin de generar actividades productivas, extractivas o transformativas, la parte alta de la cuenca del Jequetepeque, no es ajeno a estas actividades del hombre, dado que la actividad más importante y ancestral de estos espacios, es el pastoreo de ganado vacuno, ovino y caballar.

Sin embargo la actividad más incidente en las geofORMACIONES cóncavas, se sujeta a la actividad agrícola (figura 4.25). La utilización del suelo para la producción de productos agrícolas, tales como la papa, la oca y el olluco, ha ido modificando el relieve en su tendencia de convertirlo en un espacio plano, así mismo, en el proceso del movimiento de tierras ha generado el flujo de fluidos y aumentando la porosidad por lo que estos espacios son un elemento importante de infiltración y alimentación de agua subterránea.

G. La incidencia faunística

A nivel de cabecera de cuenca, el traslado de la fauna, tanto nativa como doméstica, en su libre tránsito y jaloneo de los pastizales, establece zonas de modificación de la consistencia del suelo y el traslado de los elementos finos en dirección de la gravedad, lo que posteriormente ayuda a los agentes externos al traslado mayoritario del material particulado.

Los animales combinan elementos esenciales en la modificación de la vegetación, alterando la frondosidad de la yerba, aumentando la disposición del tallo en la recepción del agua. En el jaloneo de la yerba, modifica la estructura del suelo, aumentando la

capacidad de aireación y porosidad, disponible para un aporte de agua en procesos de infiltración (figura 4.24).

Los restos que se genera durante el pastoreo (hojarasca, ramas, tallos, deposiciones), ayudan el incremento de la materia orgánica y el incremento de organismos descomponedores. Consecuentemente incrementan la porosidad y disminución de la densidad aparente; con ello el incremento de espacios porosos, los que también ayudan en los procesos de infiltración.

El peso y tránsito del ganado, cuando las capas del suelo, no tienen soporte de resistencia metros más abajo, ayuda, indirectamente en los posteriores traslados de masas del suelo por hundimiento y con ello originando las hondonadas.

4.4 ESCORRENTIAS Y RECARGAS DE AGUA EN CABECERA DE CUENCA

La cuenca del Jequetepeque, es una cuenca que se alimenta de los procesos de escurrimiento e infiltración estacional del agua, Al pertenecer a una cuenca de la parte norte del país, no está sujeta a los procesos de deshielo porque no existen este tipo de fenómenos en esta latitud del país, en tal sentido las descargas y recargas de agua, son procesos estacionales que forman parte del ciclo hidrológico de las cuencas de latitudes bajas.

4.4.1 Simulación de caudales en las cabeceras de cuenca

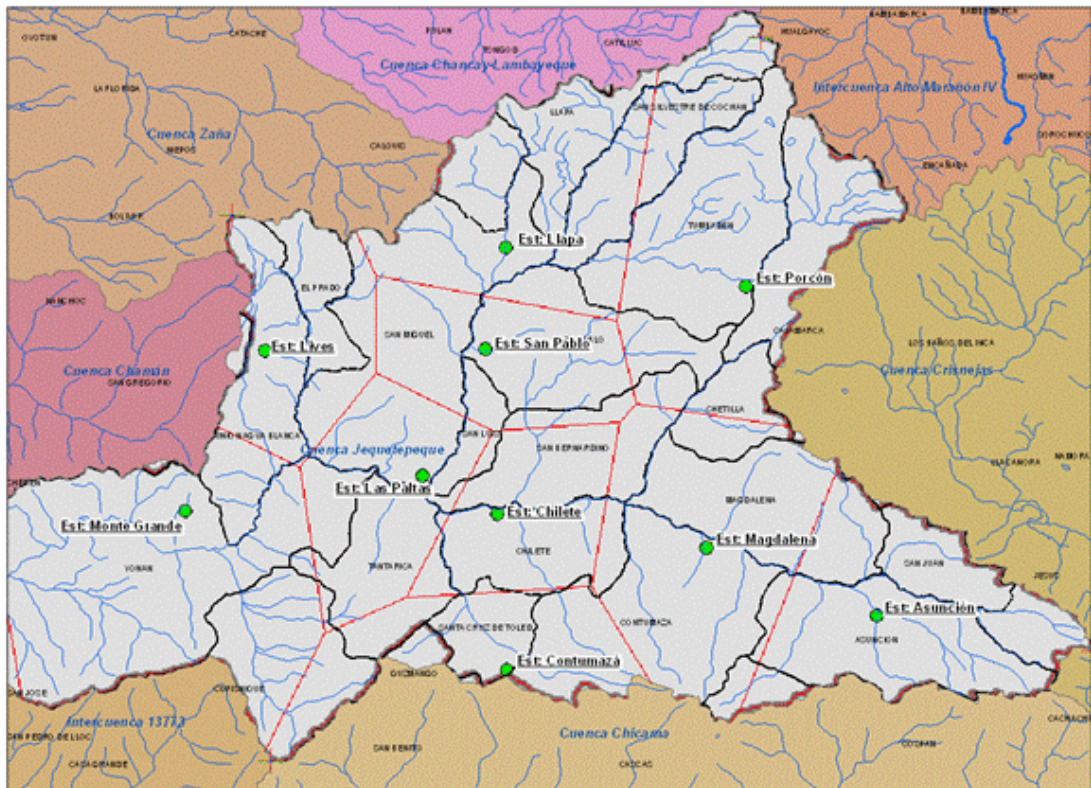
Los espacios de influencia de cada una de las estaciones en la cuenca del río Jequetepeque, se ha determinado mediante el método de los polígonos de Thiessen, identificando el aporte de precipitación que se realiza en cada espacio, correspondiente con los datos meteorológicos de una determinada estación.

Para nuestro caso, el programa GR2M, ha sido aplicando a las cabeceras de cuenca del río Jequetepeque, en función de la influencia de las estaciones meteorológicas, cuyos resultados se describen más adelante. El modelo GR2M, utiliza datos de precipitación y

evapotranspiración, para determinar caudales y los aportes que estos generarían a la acumulación y recargas de agua.

En la figura 4.30, se puede identificar que la estación Lives, tiene una influencia de los distritos de Agua Blanca, El Prado y parte de San Miguel. La estación Llapa, tiene influencia sobre los distritos de San Miguel, Calquis, parte de Llapa y parte de Cochán. La estación Porcón, tiene influencia sobre el distrito de Tumbadén, parte de los distritos de Llapa, Cochán, Cajamarca, San Pablo y Chetilla. La estación Magdalena, tiene influencia sobre parte del distrito de Chetilla, Magdalena, Contumazá y Cospán. La estación de Asunción tiene influencia sobre el distrito de San Juan, La Asunción y parte de los distritos de Magdalena, Jesús y Cospán. Finalmente la estación Contumazá, tiene influencia sobre el distrito de Toledo, parte de los distritos de Contumazá, Tantarica, Guzmano y Cuspique; bajo esa influencia determinaremos los caudales que generan cada uno de estos espacios hacia la cuenca del río en estudio.

Figura N° 4.30: Empalme de triángulos de Thiessen, estaciones e hidrografía.

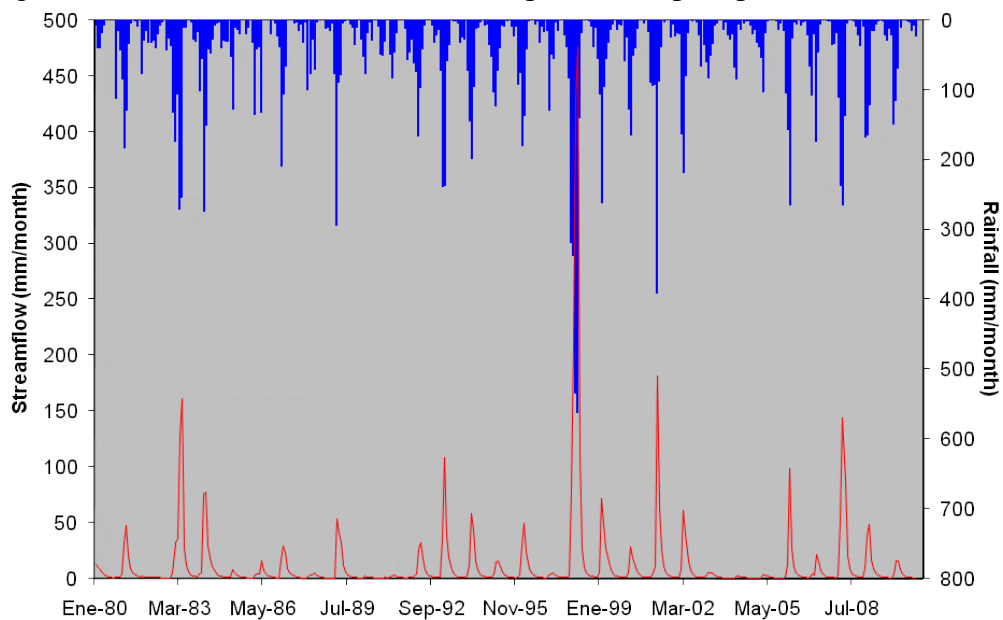


Fuente: Base digital del Perú, adecuado.

La estación Lives, cuenta con datos de precipitación de un periodo de 30 años. Esta precipitación simulada mediante el programa GR2M arroja resultados que tienen influencia para la microcuenca del río Pallac, las cuales se presentan en la figura 4.31.

La estación Lives, no cuenta con datos de temperatura, este parámetro climático se ha tomado de la estación San Benito (Contumazá), la cual se encuentra en la misma latitud con una diferencia de 19 minutos. Para determinar la evapotranspiración se ha tenido en cuenta el Excel trabajado con la fórmula de Thornthwaite, desarrollado por la Humboldt State University.

Figura N° 4.31: Simulación de caudales a partir de la precipitación. Est. Lives.

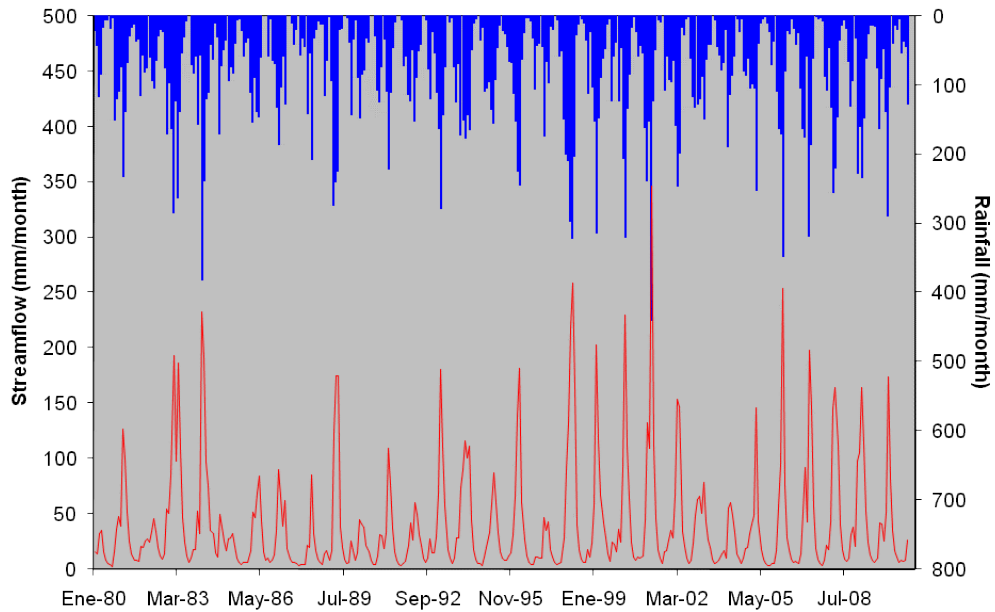


Fuente: Elaboración propia. Modelo GR2M, Datos SENAMHI.

Para la estación Llapa, las cuales abarcan un total de 11 hondonadas, se ha generado caudales simulación mediante el GR2M, con los datos de precipitación durante 30 años. De la figura 4.32, se observa que existen máxima generación de caudales en abril de 1983 y febrero del año 2002. Así mismo en todo este periodo se ha generado constantemente un caudal de escorrentía, lo que presupone que este caudal es alimentado por las aguas subsuperficiales.

Los datos de precipitación para la estación Llapa, corresponden a una data del año 1980 al 2010, con temperaturas promedio desde el año 1990, que para los años anteriores se ha completado datos de acuerdo a las temperaturas máximas y mínimas correspondientes a los años faltantes.

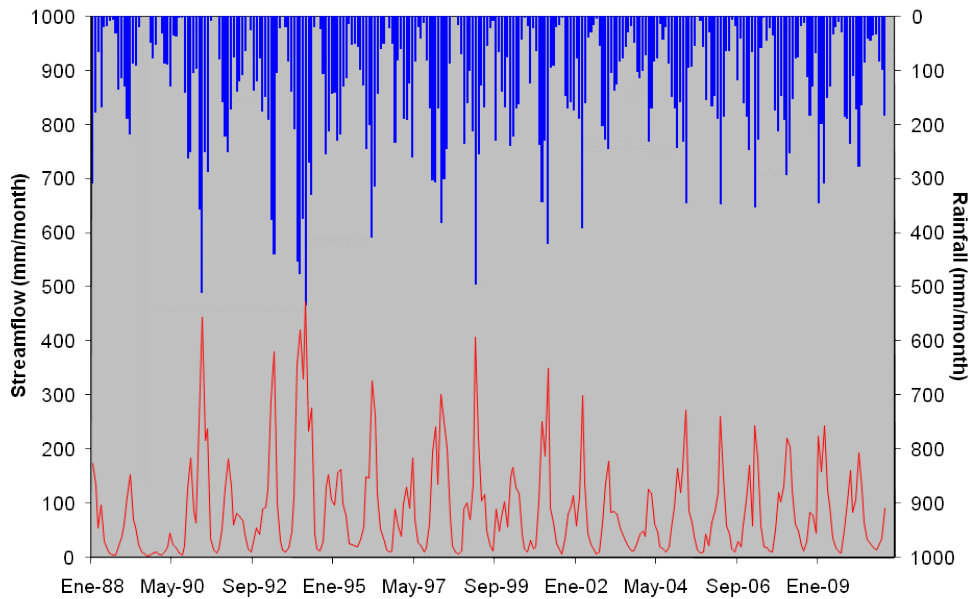
Figura N° 4.32: Simulación de caudales a partir de la precipitación. Est. Llapa.



Fuente: Elaboración propia. Modelo GR2M, Datos SENAMHI.

La figura 4.33, muestra los resultados de escorrentía para la estación Porcón, según el modelamiento del GR2M, lugar donde las características geomorfológicas impiden las pérdidas de caudales a lo largo del tiempo por la presencia de FC.

Figura N° 4.33: Simulación de caudales a partir de la precipitación. Est. Porcón.

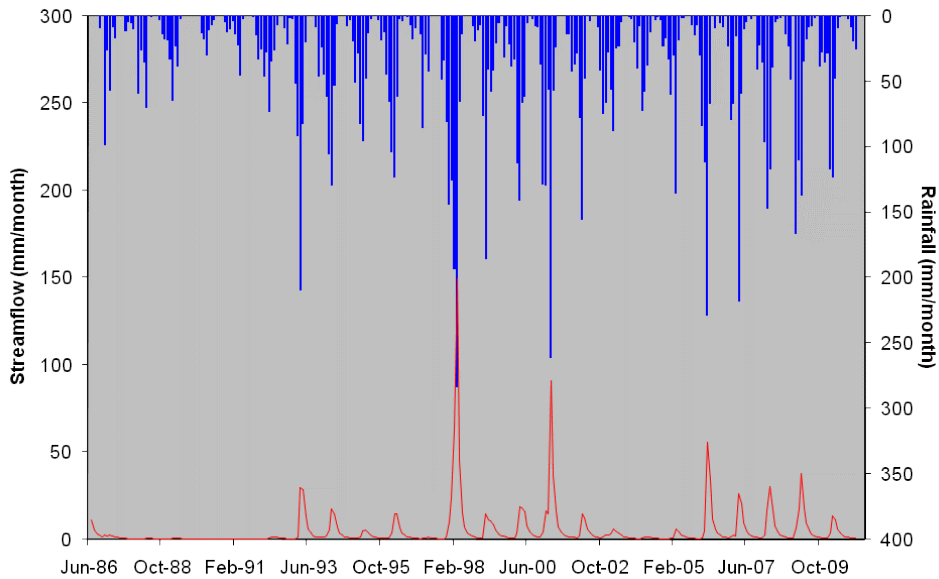


Fuente: Elaboración propia. Modelo GR2M, Datos SENAMHI.

Los datos para la estación Porcón, corresponden a 22 años de precipitación, con 14 años de data de temperatura, la cual nos va a permitir determinar la evapotranspiración y establecer los caudales simulados para la microcuenca del río Rejo, espacio donde se encuentra tres formaciones cóncavas: LL-01, C-01 y C-02.

En la figura 4.34, se presenta los resultados de precipitación y la simulación de caudales en la estación Magdalena. Su influencia según los polígonos de Thiessen, alcanza las dos márgenes del río Magdalena, hasta las cabeceras de cuenca. La estación se encuentra a 1300 msnm, la cual tiene poca representatividad a la precipitación efectiva de la cabecera de cuenca, dado que la zona de estudio, se encuentra entre 2600 y 3800 msnm para esta parte de la cabecera de cuenca.

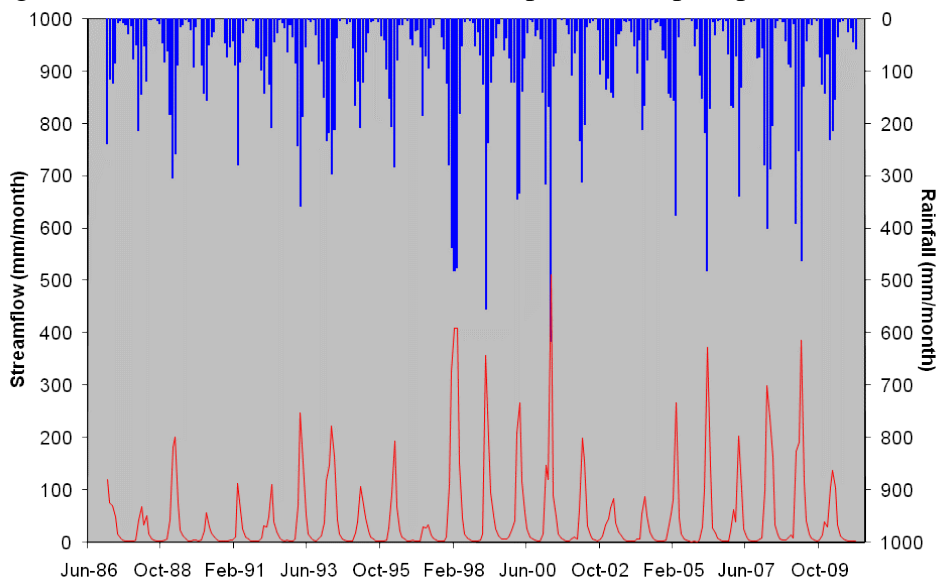
Figura N° 4.34: Simulación de caudales a partir de la precipitación. Est. Magdalena.



Fuente: Elaboración propia. Modelo GR2M, Datos SENAMHI.

La estación Magdalena, cuenta con 24 años de data de precipitación y 16 años de data de temperatura. Como se observa en la figura 4.34, los caudales son bastante bajos en los primeros años de análisis con un pequeño incremento en los años sucesivos. En este espacio se encuentran las formaciones cóncavas M-04, M-05, M-06, M-07, M-08, M-09 y Cz-03.

Figura N° 4.35: Simulación de caudales a partir de la precipitación. Est. Asunción.



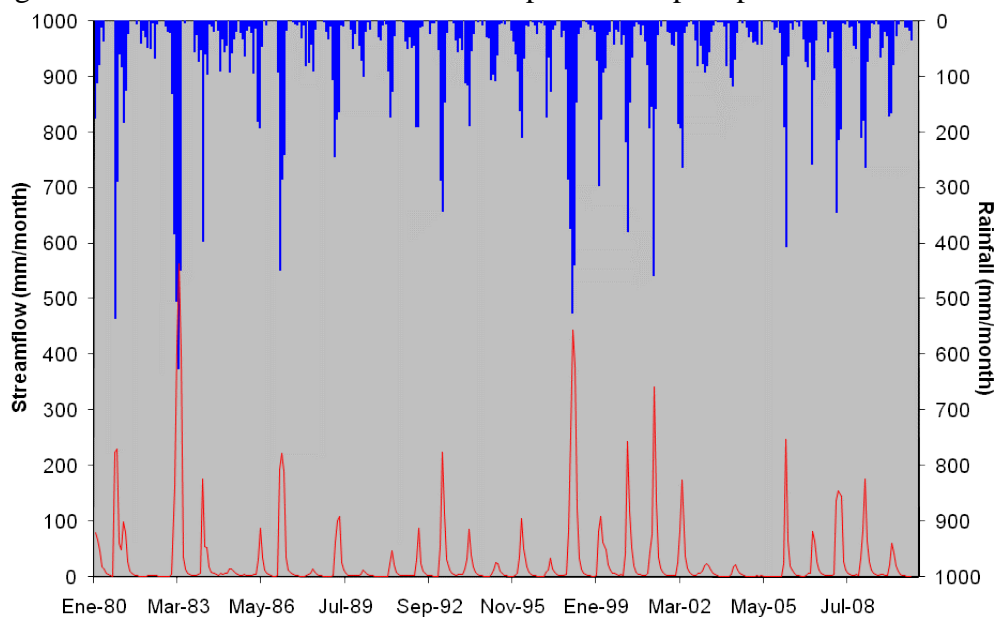
Fuente: Elaboración propia. Modelo GR2M, Datos SENAMHI.

La simulación de caudales de la estación Asunción (figura 4.35). Corresponden para los ríos San Juan, Paigal y Quinuas. Esta estación tiene influencia sobre las formaciones cóncavas M-10, M-11, M-03, M-02, M-01, Sj-01 y A-01.

La data para esta estación, corresponde de 23 años de precipitación y 20 años de temperatura, las cuales han hecho posible determinar la simulación de los caudales mucho de los cuales generalmente se pierde durante las temporadas de lluvia hacia el mar.

Finalmente, respecto a la simulación de caudales, se cuenta con la estación Contumazá, con datos desde el año 1980, tanto para precipitación como para temperatura, lo que nos ha generado una simulación de caudales para un periodo de 30 años. Su influencia es sobre las formaciones cóncavas Cz-01, Cz-02.

Figura N° 4.36: Simulación de caudales a partir de la precipitación. Est. Contumazá.



Fuente: Elaboración propia. Modelo GR2M, Datos SENAMHI.

Esta simulación de caudales, nos permitirá generar las figuras 4.37 y 4.38, las cuales sustentan la teoría del almacenamiento del agua en el medio poroso del suelo, que luego se convierte en escorrentía, aun en épocas de ausencia de precipitaciones. En este

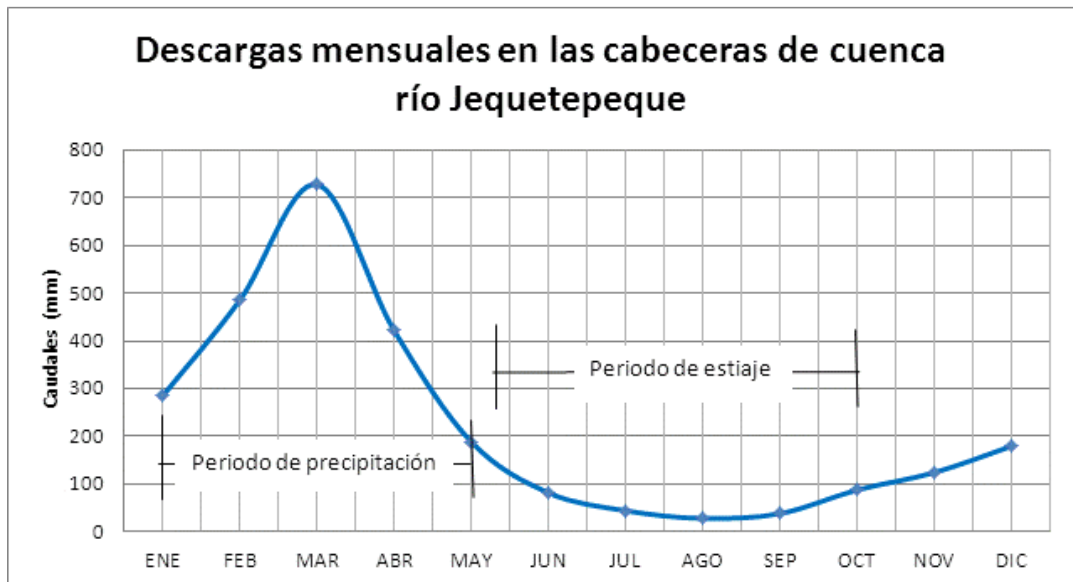
análisis es conveniente analizar al escorrentía de infiltración, la misma que se convierte en recargas directas en las geoformaciones cóncavas.

Por otro lado, la geomorfología, como parte del proceso de formación de litosfera superficial terrestre, recibe la influencia de un conjunto de sistemas y elementos que la van moldeando; sin embargo, en las partes altas de una cuenca, (las cabeceras de cuenca) la geomorfología, se encuentra interactuando con elementos distintivos en su proceso de evolución, por lo que se encuentra sujeta a la interacción de diferentes variables exógenas y endógenas propias de estos espacios, que la van modificando con el transcurrir del tiempo, que dentro de las visitas de campo, se ha observado lo siguiente:

4.4.2 Descargas de agua

Las descargas de aguas, son eventos continuos que se presentan a través del tiempo bajo dos sucesos:

Figura N° 4.37: Variación de las descargas en las cabeceras de cuenca del Jequetepeque.

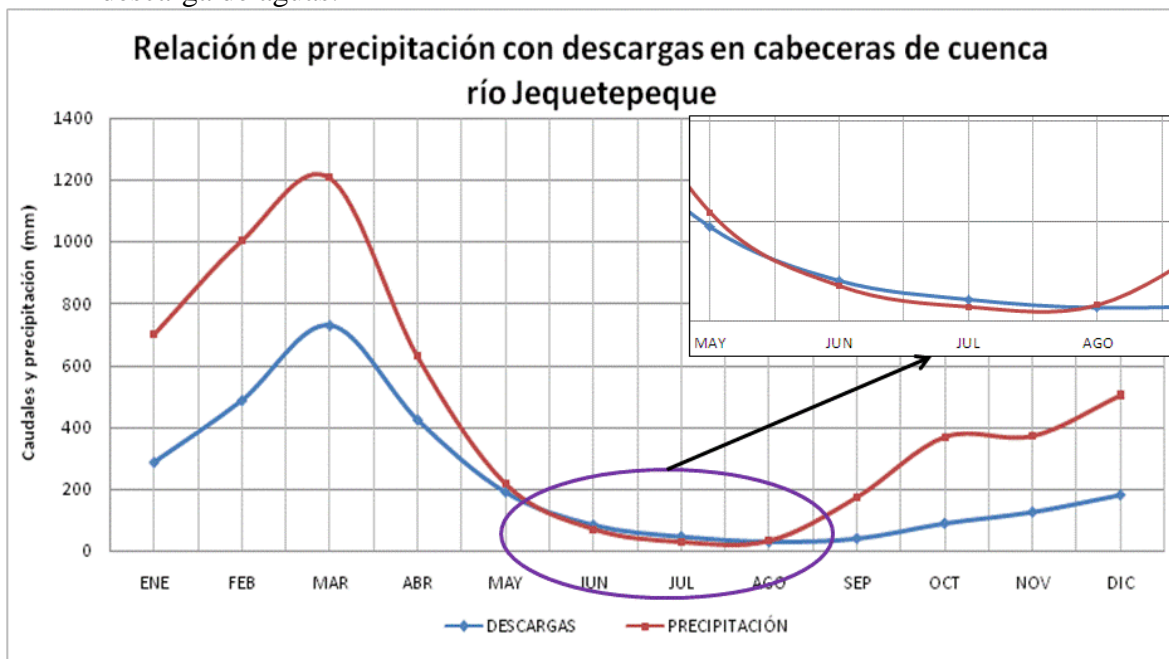


Fuente: El autor.

En un primer suceso, las descargas de agua durante las épocas de precipitación o invierno para la parte alta (meses de octubre a Abril), corresponde a los meses de estación húmeda. Las lluvias generan escorrentías superficiales cuando la precipitación es mayor a la infiltración. Los caudales máximos se producen en el mes de marzo (figura 4.37), datos obtenidos a partir de la simulación de caudales, utilizando el programa GR2M.

En un segundo evento, terminada la época de precipitación, las descargas de aguas abajo, continúan por lo que no se convierte en cero, como se observa en la figura 4.37. Estas descargas disminuyen notablemente, pero se mantiene una escorrentía, producto de otros parámetros, como lo analizaremos más adelante. Las descargas mínimas corresponden al mes de agosto; fecha en la cual también se realizó la evaluación de humedad de los suelos en las cabeceras de cuenca del río Jequetepeque. En algunas partes de la cuenca, las descargas simplemente disminuyen hasta extinguirse, como es en el caso de Contumazá.

Figura N° 4.38: Correlación directa e inversa de la presencia de precipitación y descarga de aguas.



Fuente: el autor.

Como es lógico, existe una correlación entre la precipitación y las descargas tanto en la estación húmeda como en las épocas secas, como se observa en la figura 4.38. Entre

los meses de agosto a mediados de mayo, esta correlación es directa entre la precipitación y las descargas, empero entre mediados de mayo a agosto la correlación es inversa; a este tramo la denominaremos “descargas de aguas subsuperficiales”; básicamente en el periodo de estiaje existe una influencia del flujo base, la cual se discutirá con mayor detalle páginas más adelante.

4.4.3 Recargas de agua

Las recargas de agua, se generan de manera natural durante el transcurso de todos los meses. Las actividades antrópicas también generan recargas en mayor o menor cantidad, dependiendo de los tipos de actividades y los espacios circundantes.

Durante los trabajos de campo, se ha determinado la existencia de geoformaciones cóncavas, denominadas también sumideros o boquerones, cuya función es recargar los acuíferos, dando lugar a la formación de aguas subterráneas. Las aguas subterráneas son el sustento de las actividades durante la mayor parte del año aguas abajo. Estas formaciones cóncavas, evitan que las aguas excedentes durante las épocas de lluvia, generen escorrentía y se pierdan en el mar.

Las recargas de agua en estos ambientes, constituyen aparentemente el 100 %, dado que toda la precipitación, generan escorrentía hacia el punto de infiltración común. Sin embargo, la cantidad de recargas son producto de la escorrentía, de la infiltración y parte del afloramiento de agua como se explica en los cuadros 4.11 y 4.12. Las recargas, están en función del área de la geoformación cóncava (figura 4.39). Su influencia alcanza el límite superior o punto crítico de función, que luego converge su escorrentía en un canal que la conduce hacia la recarga.

En geoformaciones cóncavas incompletas (encajonamientos), la particularidad es la baja pendiente que se genera en los puntos de salida que luego originan las quebradas y posteriormente los ríos, también son elementos importantes de recargas. En sus inmediaciones uno de los elementos que ayuda a este fenómeno es el fracturamiento del

macizo rocoso, la presencia de la vegetación herbácea, la grama de altura y especialmente el ichu.

4.4.4 Aporte de recarga de aguas en las geofORMACIONES cóncavas

El aporte de recarga de aguas subterráneas, está en función de parámetros como: pendiente del terreno, la vegetación, la infiltración y el escurrimiento de infiltración. Así, en la FC: A-01, que cubre una superficie de 2.99 has o 29 921.85 m², se han determinado precipitaciones promedios de 932.1 mm anuales e infiltraciones de 0.06 cm/min.

Por consiguiente, el aporte que está generando esta formación cóncava hacia los acuíferos es de 9 387.31 m³/año, considerando el aporte más bajo, dado que las medidas de caudal como ingreso hacia los acuíferos corresponde a la época de mayor estiaje; el restante estaría relacionado con las tasas de evapotranspiración de la zona, dado que la evapotranspiración calculado por Thornthwaite es de 759.2mm anuales. Así mismo, adicionando las recargas artificiales que se pueda realizar (pruebas de recarga que se realizaron en esta formación cóncava) de aproximadamente 28 067.04 m³/año (cuadro 4.14), se consideraría un aporte total de 37 454.35 m³/anuales.

Lo aportes de lluvia que ocurren en las formaciones cóncavas, se detallan a continuación en el cuadro 4.11.

Cuadro N° 4.11: Aporte de lluvia en geofORMACIONES cóncavas.

Distrito	Área (m ²)	Precipitación (mm)	Precipitación (m)	Aporte total (m ³ /año)
El Prado	1382.02	556.09	0.55609	768.53
Calquis	25055.50	979.89	0.97989	24551.57
Cochán	3337.74	1438.12	1.43812	4800.06
Magdalena	4444743.89	400.64	0.40064	1780722.27
San Juan	482.46	932.11	0.93211	449.70
Asunción	29921.86	932.11	0.93211	27890.34
Contumazá	3246.05	749.17	0.74917	2431.83
Total	4508169.52	5988.11	5.98811	1841614.31

Fuente: Elaboración propia.

El aporte total, es el 100% del agua que recae sobre la geoformación cóncava; de ella, un porcentaje se infiltra y otra escurre (cuadro 4.12). Del agua infiltrada, una parte emerge en forma de manantiales difusos, la que juntamente con el porcentaje de escurrimiento se convierte en la recarga real hacia los acuíferos.

En la cabecera de cuenca, las descargas y recargas de agua, se encuentran asociados a las mediciones de infiltración, humedad, área de influencia, vegetación, pendiente y canal de descarga.

Cuadro N° 4.12: Escurrimiento convertido en recarga en geoformaciones cóncavas.

Distrito	Área (m ²)	Precipitación (m)	Infiltración (mm/año)	Infiltración (m ³ /año)	Escorrentía (m)	*Escorrentía (m ³ /año)
El Prado	1382.02	0.556	477.69	660.18	0.078	108.35
Calquis	25055.50	0.980	844.11	21149.68	0.136	3401.89
Cochán	3337.74	1.438	1236.69	4127.75	0.201	672.31
Magdalena	4444743.89	0.401	333.49	1482256.73	0.067	298465.54
San Juan	482.46	0.932	798.60	385.29	0.134	64.41
Asunción	29921.86	0.932	798.60	23895.69	0.134	3994.65
Contumazá	3246.05	0.749	648.89	2106.32	0.100	325.51
Total	4508169.52	5.988	5138.07	1534581.65	0.85	307032.66

Fuente: Elaboración propia.

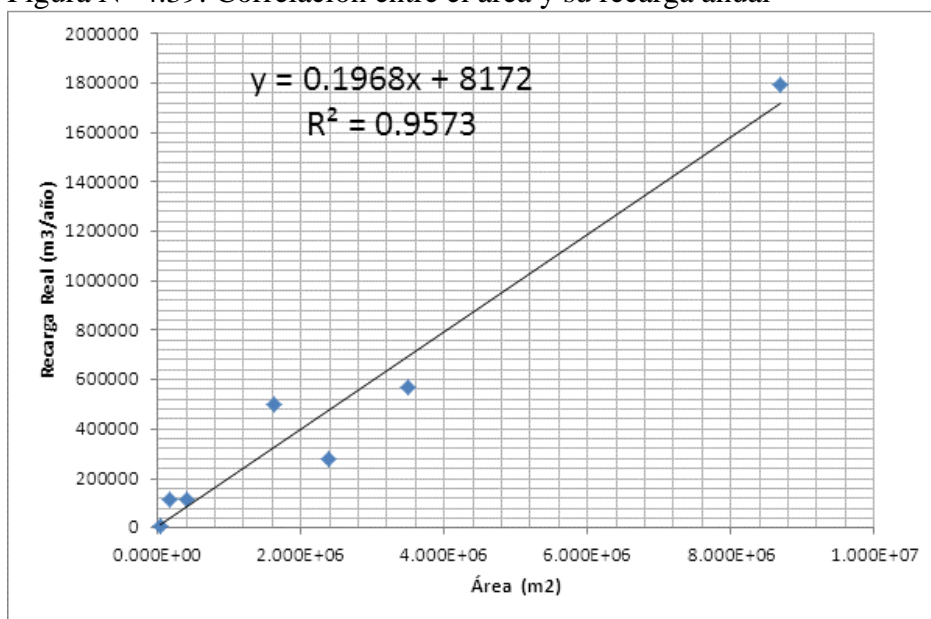
*se convierte en recarga en una geoformación cóncava producto de la precipitación.

Las recargas de agua simulando sin geoformaciones cóncavas, estaría asociado solamente a una parte de la infiltración (infiltración = 1 534 585.6 m³/año), que representa el 83.33% de la lluvia precipitada, el resto escurriría hacia los cauces de agua si no hubiesen geoformaciones cóncavas. En consecuencia las Geoformaciones cóncavas, solamente infiltran alrededor de 307 032.67 m³/año (*escorrentía, cuadro 4.12), que representa el 16.67% directamente de la lluvia; sin embargo a partir del cuadro 4.13, se ha determinado que existe escorrentías de agua que se van directamente a las recargas, producto del afloramiento de aguas subsuperficiales en esta parte de las cabeceras de cuenca, las cuales representan el 54.44% y sumado al 16.77%, acumulan una recarga total de 71.11% de la precipitación total que se generan en esta áreas. Por consiguiente existe

una importante fuente natural de recargas a partir de la existencia de geoformaciones cóncavas.

Así mismo, la recarga de aguas subterráneas en geoformaciones cóncavas, se encuentra relacionado directamente en función del área, estadísticamente está representado por la ecuación de regresión lineal, donde la correlación que se mantiene entre las dos variables es de $r = 0.96$.

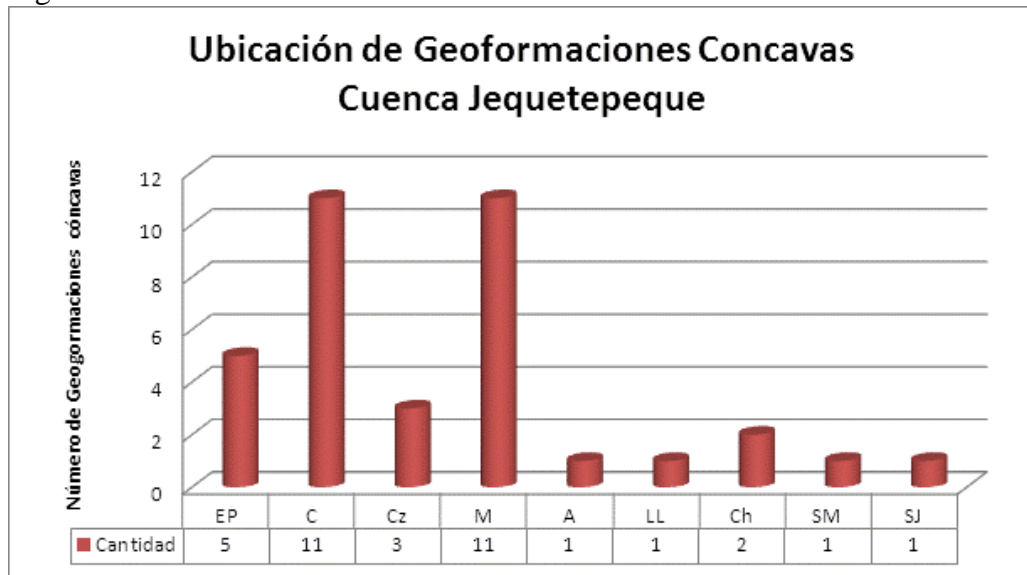
Figura N° 4.39: Correlación entre el área y su recarga anual



Fuente: Elaboración propia.

4.5 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO MUESTRAL

Figura N° 4.40: Gráfico de barras de la ubicación de formaciones cóncavas.

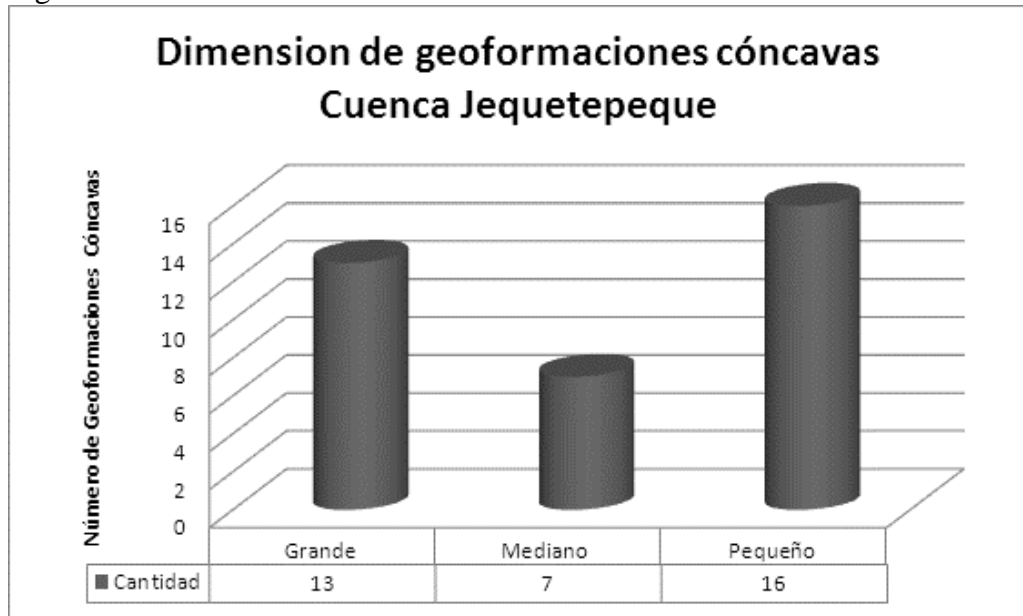


Fuente: Elaboración propia.

A lo largo del recorrido de las cabeceras de cuenca en los diferentes ríos que van formando el río principal (río Jequetepeque), la mayor cantidad de formaciones cóncavas registradas, se encuentran en los distritos de Calquis y Magdalena, con una cantidad de 11 unidades en cada uno de estos distritos (figura 4.40).

Así mismo esta diferenciación, también está en función del tipo de formación cóncava, tal es así que en el distrito de Calquis, la mayoría de ellos son del tipo Encajonamiento y hondonada en parte plana, mientras que en el distrito de Magdalena prima el tipo de hondonada, con procesos de formación kárstica. La ubicación de las geoformaciones cóncavas, también está en función al tipo de depósitos geológicos (Ks-p, Ks-yg y Tm-vll), los cuales son depósitos calizos, margas y calizos con otros materiales, altamente susceptibles al intemperismo, ocupando un 34% del espacio en cabeceras de cuenca del río Jequetepeque.

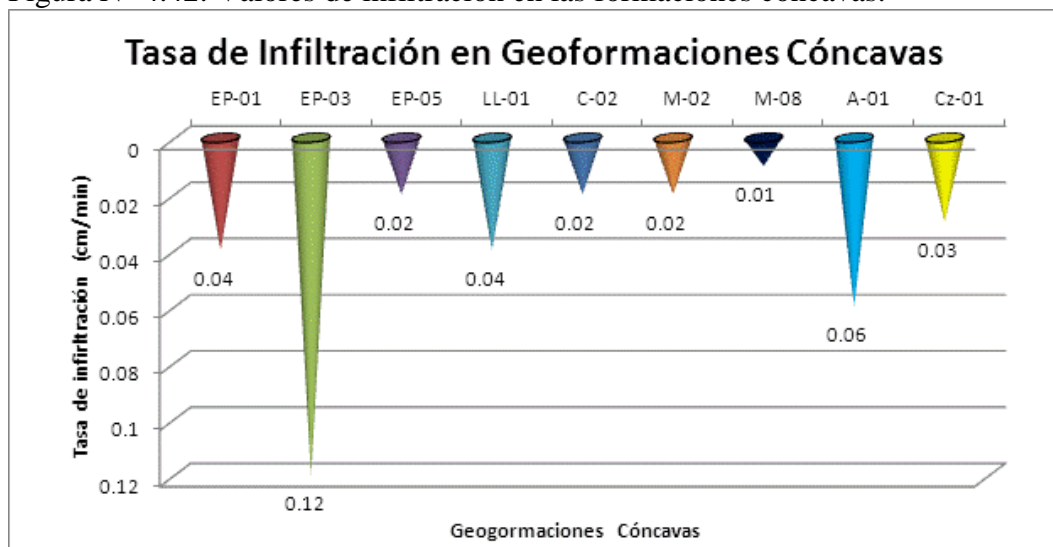
Figura N° 4.41: Gráfico cuantitativo del tamaño de formaciones cóncavas.



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las dimensiones de las geoformaciones cóncavas (figura 4.41), el mayor número, son de tamaño pequeño, cuyas dimensiones de área representan hasta una Ha. Las de mayor superficie, se encuentran alrededor de 2.4 km², como el caso de la FC: M-07. Otras geoformaciones cóncavas, de grandes superficies, se encuentran en la parte norte de la cabecera de cuenca, (San Miguel y Calquis) y en la parte media, distrito de Magdalena.

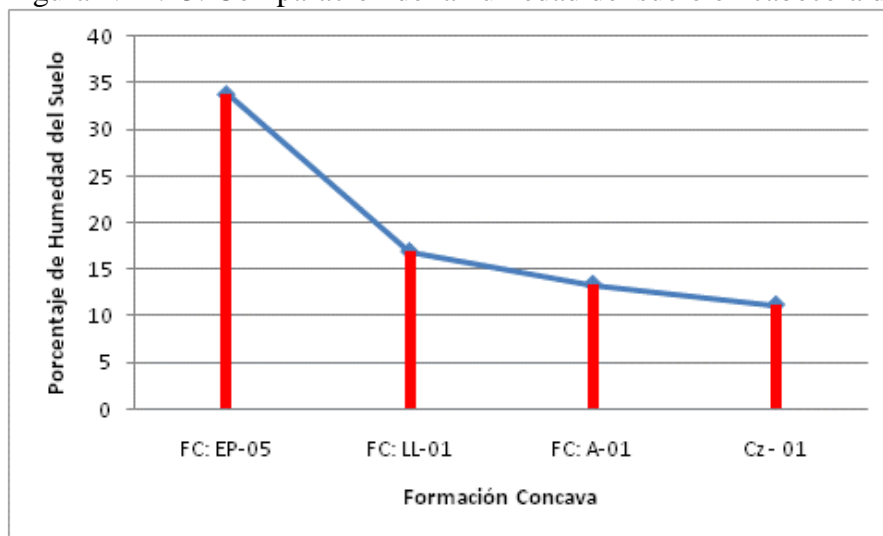
Figura N° 4.42: Valores de infiltración en las formaciones cóncavas.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.42, la formación cóncava con mayor velocidad de infiltración es la que se encuentra en el distrito de Llapa y el menor valor, se encuentra en el distrito de Magdalena (M-08). Estos valores nos permiten determinar el grado de infiltración difusa. Consecuentemente, la mayor área que aporta a la alimentación de agua subterránea ya sea sub-superficial o del tipo profunda, es la formación cóncava M-08.

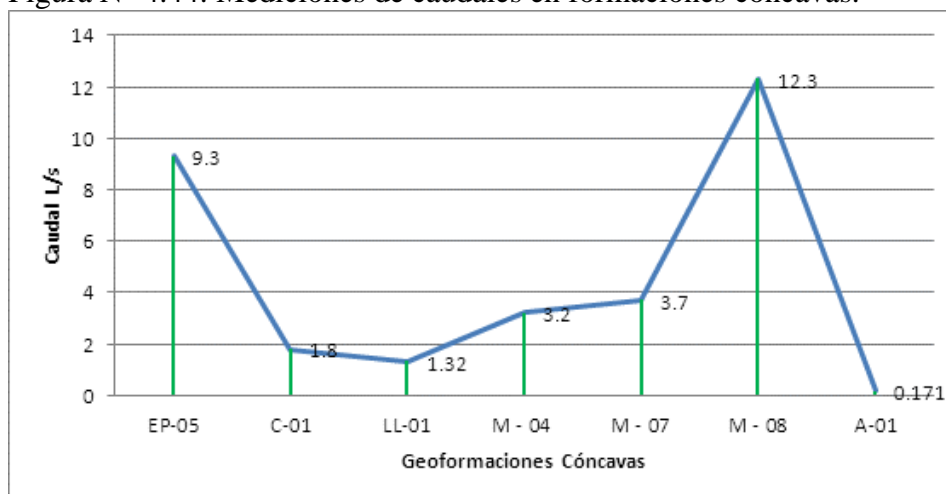
Figura N° 4.43: Comparación de la humedad del suelo en cabecera de cuenca.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.43, se observa que la formación cóncava EP-05, ubicada en el distrito de El Prado, conserva mayor cantidad de humedad del suelo y por ende mayor cantidad de vegetación aún en estaciones de ausencia de lluvias, este factor está relacionado con el grado de mayor intemperismo y la distribución climática. La humedad, también nos ayuda a determinar la cantidad de agua que aporta el suelo hacia las aguas subterráneas, lo que estaría condicionado por la estructura geológica metros y kilómetros abajo. Así mismo, la ubicación espacial, también determina que la cantidad de humedad va disminuyendo conforme va el recorrido de la cabecera de cuenca con dirección hacia el sur, donde, en Contumazá, se observa menores niveles de humedad con un 11.14%, como se observa en la figura 4.43.

Figura N° 4.44: Mediciones de caudales en formaciones cóncavas.



Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de caudal, que se ha podido registrar en el mes de julio-agosto (meses de mayor estiaje en la zona altoandina), se muestran en la figura 4.44. La mayor cantidad corresponde al distrito de Magdalena, esto es debido a los largos recorridos y a la concentración puntual en cada geoformación cóncava; entre ellos la formación cóncava M-08 registró 12.3 L/s en el lugar denominado Tingo. En la parte norte de la cabecera de cuenca, también se observa que existen fuentes importantes de escurrimiento. La EP-05 registró datos de 9.3 L/s, sin embargo a lo largo de este espacio existe fuentes de agua subsuperficial en forma difusa sin escurrir a una geoformación cóncava.

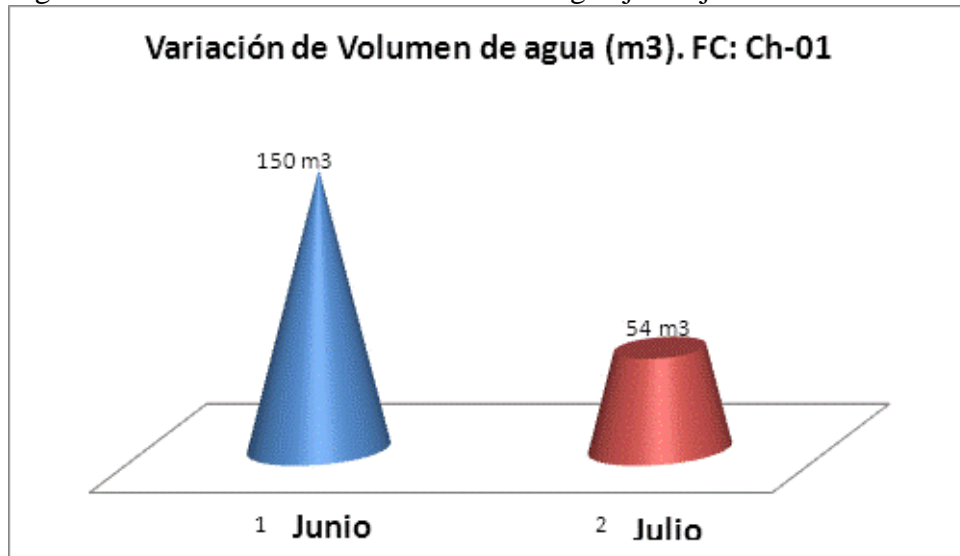
A partir de esta acumulación de agua, se puede determinar que existe un caudal base que recarga a las aguas subterráneas de 1 002 560.98 m³/año, como se observa en el cuadro 4.13.

Cuadro N° 4.13: Flujo de agua subsuperficial, expresado en caudal de escurrimiento.

Caudal	El Prado	Calquis	Llapa	Magdalena	Magdalena	Magdalena	Asunción	Total
FC	EP-05	C-01	LL-01	M-04	M-07	M-08	A-01	
L/s	9.3	1.8	1.32	3.2	3.7	12.3	0.171	
m ³ /año	293284.8	56764.8	41627.52	100915.2	116683.2	387892.8	5392.656	1002560.98

Fuente: elaboración propia.

Figura N° 4.45: Variación del volumen de agua junio-julio 2012.



Fuente: Elaboración propia.

De la figura 4.45 se observa que la variación de volumen de agua, se debe a factores ambientales y soporte del suelo, las cuales influyen en la evaporación e infiltración generando variaciones de volumen acumulado en formaciones cóncavas naturales y artificiales. Se observa que existe una fuerte cantidad de pérdida de agua en ausencia de lluvias por procesos de infiltración y evaporación en menos de un mes, esto debido básicamente al tipo de suelo, la insolación y el viento.

4.6 ESTRUCTURACIÓN DE LAS GEOFORMACIONES CÓNCAVAS

Los eventos anteriormente estudiados: la geología, la acción del viento, la interacción del agua, la gravedad y otros, han ayudado a formar un conjunto de geoformaciones cóncavas encontrados en la cuenca.

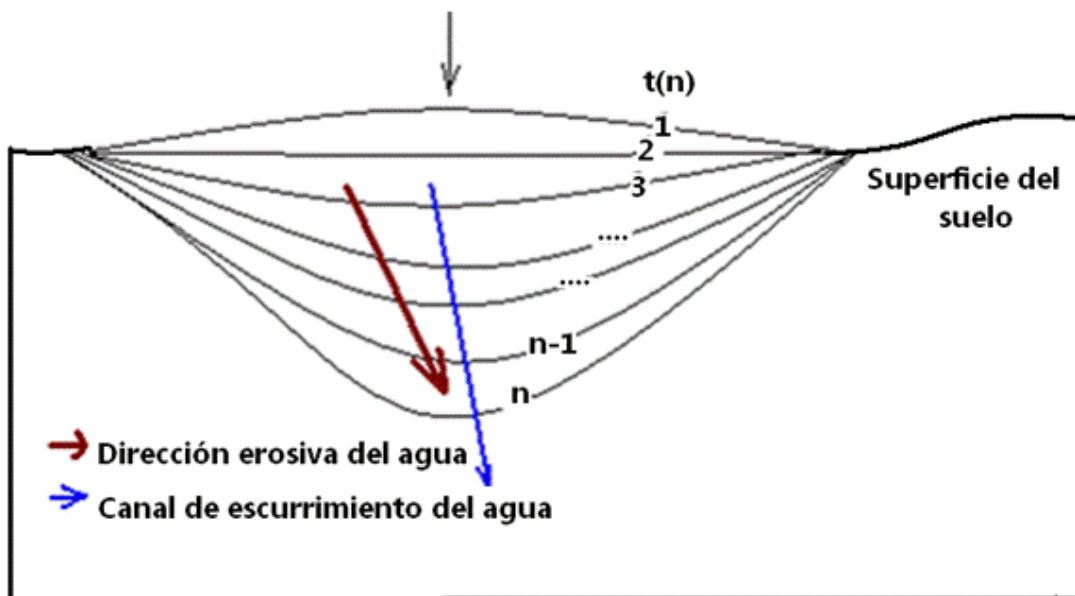
La formación de geoformaciones cóncavas, es un proceso continuo. Existen FC muy reciente, recientes y antiguas. Se ha podido determinar formaciones recientes menores a 50 años aproximadamente (figura 4.26), entre 100 – 200 años (figura 4.25), y la gran mayoría tiene un largo proceso formativo. La datación cronológica, se encuentra en función al desarrollo de las plantas arbóreas, secuencia y mezcla de horizontes del suelo y la profundidad de la formación cóncava; sin embargo, otras formaciones cóncavas han

tenido un largo periodo de formación, posiblemente cientos o miles de años (figuras 4.18; 4.20).

Las formaciones cóncavas en un proceso geomorfológico muy lento, su formación pasa desapercibido y sólo nos damos cuenta cuando ha existido la generación de desniveles del suelo. La actividad erosiva del agua juega un papel importante en la generación de estas depresiones, ayudando a las recargas de agua en forma natural.

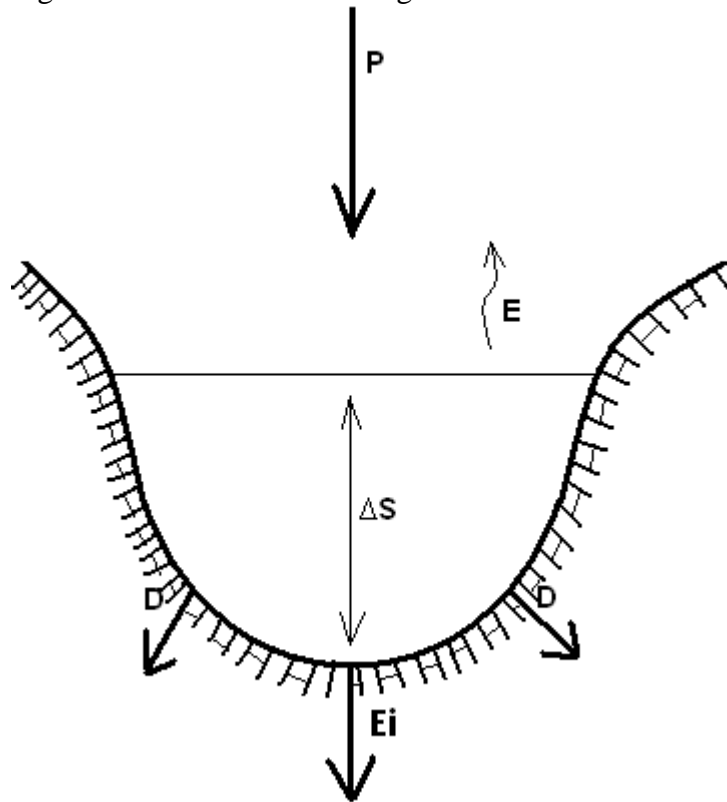
Esquemáticamente, la formación de estas depresiones, son procesos sucesivos que ocurren en el transcurso del tiempo (figura 4.46), la determinación del nivel de profundidad es un método aproximado para determinar la evolución histórica de los procesos geológicos de un espacio, en este caso el de la Cordillera de los Andes.

Figura N° 4.46: Procesos de hundimiento del terreno en función al tiempo.



En la medida que se va generando la geoformación cóncava, también se va incrementando la cantidad de agua que se pueda almacenar o cuantificar la cantidad de recarga de agua. El área de influencia está en relación a la magnitud de evolución de estas hondonadas; por consiguiente las recargas se encuentran representadas en el modelo de geoformaciones cóncavas expresadas en la figura 4.47.

Figura N° 4.47: Modelo de la geoformaciones cóncavas.



Donde:

P = Precipitación.

E = Evaporación

D = Infiltración difusa

Ei = Escorrentía de infiltración

ΔS = Variación de almacenamiento.

Este modelo geomorfológico, cumple dos funciones: almacenar agua e infiltrar agua. El primero es temporal y de corta duración; el segundo, es temporal y en otros es permanente, producto del afloramiento de agua subsuperficial. Entonces, la dinámica de esta geoformación cóncava, se encuentra representado por la infiltración difusa (infiltración a lo largo de toda el área de influencia) y la escorrentía de infiltración, que es la confluencia del agua superficial dentro de la formación cóncava que escurre por un canal que luego se infiltra en su totalidad.

Las ecuaciones de la recarga, se deducen a partir del cambio en el almacenamiento, dado por la siguientes ecuaciones.

$$\frac{\delta S}{\delta t} = Qi(t) + P(t) - Qs(t) - Ev(t) - I(t) \quad (4.1)$$

Donde:

$Qi(t)$ = Caudal de ingreso al sistema en el tiempo "t"

$P(t)$ = Precipitación sobre la geoformación cóncava en el tiempo "t"

$Qs(t)$ = Caudal de salidas en el tiempo "t"

$Ev(t)$ = Evapotranspiración en el tiempo "t"

$I(t)$ = Infiltración en el tiempo "t"

En una geoformación cóncava, las recargas de agua subterránea en forma directa, están representadas por $Qs(t) = R(t)$

$$R(t) = Rn(t) + Ei(t) \quad (4.2)$$

Donde:

$R(t)$ = Recarga de agua en el tiempo "t"

$Rn(t)$ = Recarga neta

$Ei(t)$ = Escorrentía de infiltración.

La recarga neta (Rn), está dado por la escorrentía producida por la lluvia, sobre las formaciones cóncavas, este exceso de escurrimiento se perdería si la geoformación cóncava no estuviese presente, originando el caudal de las quebradas y ríos.

La Ei , es la escorrentía de infiltración, es parte del agua que se infiltra, la cual emerge como afloramiento de aguas subterráneas subsuperficiales que se acumulan durante las estaciones húmedas. Este, es uno de los procesos más importantes, la cual explica el comportamiento de cuencas que no tienen glaciares (las cuales alimentan las primeras escorrentías), dado que la escorrentía esta relacionado con la cantidad de agua que se puede almacenar en forma temporal, la cual dará origen al caudal base en esta parte de la cuenca

4.7 EVALUACIÓN DE RECARGAS ARTIFICIALES DE AGUA SUBTERRÁNEA

Para desarrollar este proceso, se propuso desviar aguas que discurren por un cauce natural hacia una formación cóncava. La finalidad es mostrar la posibilidad de las recargas artificiales en la parte alta de la cabecera de cuenca, utilizando este tipo de formaciones.

Así mismo, los resultados de la presente investigación, se encuentran en función de la propuesta de recargas artificiales a partir de las cabeceras de cuenca. Las recargas de agua es posible, dado que se utilizaría agua que se escurre en forma libre durante las temporadas húmedas, la cual se pierde por el abundante caudal hacia el mar, después de haberse almacenado hasta su nivel de soporte en el embalse el Gallito Ciego.

Las pruebas de registro experimental, se realizaron en la formación cóncava FC: A-01 del distrito de la Asunción (figuras 4.48 y 4.49). Se ha realizado gracias a la colaboración con la directiva de las rondas campesinas de El progreso, en la cual se utilizó un total de 3 tubos de 25cm de diámetro y mangueras de dos pulgadas, con un recorrido de 483m, registrándose un ingreso neto hacia la geoformación cóncava de 0.89 L/s, que en forma mensual, se presenta en el cuadro 4.14 como pruebas de recargas de agua, durante los meses de marzo, abril y mayo.

Cuadro N° 4.14: Recarga de aguas subterráneas en la FC: A-01. Asunción.

Meses	Recargas (m³)
Marzo (18 días)	1 384.13
Abril (30 días)	2 306.88
Mayo (31 días)	2 383.78
Total	6 074.79

Fuente: Elaboración propia.

Esta información extendida hacia las 28 formaciones cóncavas, libre de las encajonadas, y mediante la utilización de elementos básicos (tubos y mangueras), tendrían un aporte sustancial mayor a los 170 094.12 m³, las que corresponderían a las recargas de aguas estacionales, durante los meses de febrero, marzo y abril.

En la geoformación cóncava, durante las pruebas de recarga artificial, se alcanzó acumular una altura máxima de 7 cm en un espacio de 3.5 m de diámetro disperso, a partir del cual no existió incrementos de agua que superen esa altura, encontrando medios de infiltración total. En otras geoformaciones cóncavas el ingreso sería total, pues existe un espacio bien delimitado de recargas de agua en forma de canal de infiltración.

Figura N° 4.48: Traslado del agua mediante tubería y mangueras a una FC.



Fuente: Propia, (Marzo 2013).

Figura N° 4.49: Recarga de aguas en una formación cóncava. Asunción



Fuente: Propia, (Marzo 2013).

Figura N° 4.50: Potenciales recargas de agua



Fuente: Propia, (Agosto 2012).

El aprovechamiento de la topografía local y las condiciones climáticas eventuales, favorecen las recargas de aguas desde las alturas, en función de las características geomorfológicas de las hondonadas, las cuales son medios directos para realizar recargas oportunas, en las épocas de mayor abundancia de agua, evitando pérdidas hacia el océano, posibles inundaciones y disminuyendo el transporte de sedimentos.

Así mismo, las geoformaciones cóncavas se encuentran directamente relacionadas con su área de influencia (figura 4.39) cuya ecuación es:

$$Y(t) = 0.1968X + 8172 \quad (4.5)$$

Donde:

Y= representa la variable recarga real ($m^3/año$)

X = representa el área (m^2)

La variable dependiente (Y), tiene por objeto cuantificar la cantidad de recarga producto de la precipitación (P(t)) y la escorrentía (R(t)) que se genera en cada espacio de infiltración de cada formación cóncava a largo de la cabecera de cuenca del río Jequetepeque.

V. CONCLUSIONES

Sub problemas 1

¿Cuáles son los parámetros directos e indirectos relacionados con las geoformaciones cóncavas para el almacenamiento y recargas de agua subterráneas?

Objetivo específico 1

Determinar, explicar y relacionar los parámetros directos e indirectos, con las formaciones cóncavas para el almacenamiento y recargas de agua subterránea.

1. Los parámetros directos relacionados con las formaciones cóncavas son las características geológicas del espacio, las precipitaciones estacionales, la infiltración y la humedad. Indirectamente, influyen la termoclastia y gelifración, así como las características geomorfológicas de pequeña pendiente a planas que juegan un papel importante en estas formaciones geomorfológicas.
2. Las formaciones cóncavas, dependiendo de la infiltración difusa (infiltración básica entre 0.04 a 0.17 cm/h) y esorrentía de infiltración (caudales 0.17 y 12.3 L/s) y la intensidad de la precipitación, pueden mantener determinadas cantidades de agua sobre su superficie. Las acumulaciones son periódicas y no permanentes, debido a que internamente, el agua actúa como un disociador de los materiales rocosos generando inestabilidad en la base de las formaciones cóncavas.
3. La conservación de humedad del suelo varía a lo largo de la cabecera de cuenca: en la cabecera norte, es de 33.87 %, en la cabecera centro de 16.9 % y en la cabecera sur de 13.37 %, la cual es un parámetro en la conservación de la vegetación y los tipos de vegetación, así como la permanencia de agua en el medio poroso, generando una reserva de agua en forma de agua subsuperficial.

Sub problema 2

¿Cuáles son las características geológicas y geomorfológicas de las formaciones cóncavas en cabeceras de cuenca del río Jequetepeque?

Objetivo específico 2

Evaluar el comportamiento geológico y geomorfológico de las formaciones cóncavas en cabeceras de cuenca del río Jequetepeque.

4. Las geoformaciones cóncavas, son procesos de formación continua que obedece al ciclo geológico, se encuentra asociado a procesos físicos y químicos zonales de gravitación continua y disolución de depósitos geológicos (Ks-p, Ks-yg y Tm-vll), los cuales son depósitos calizos, margas y calizos con otros materiales, altamente susceptibles al intemperismo, ocupando un 34% del espacio en cabeceras de cuenca del río Jequetepeque; éstos, forman hundimientos de hasta 1km de radio en forma de hondonadas, por lo que su ubicación es estratégica, permitiendo un criterio funcional de amortiguamiento de la escorrentía, detenimiento y recarga de aguas subterráneas.
5. La geomorfología, no es uniforme a lo largo de la cabecera de cuenca, en la parte norte, existen partes llanas a baja pendiente el 67% de los espacios se encuentra formado por lomas y colinas, con pendientes leves y la formación de pequeñas planicies. En ella se encuentran el 46% de geoformaciones cóncavas; en la parte media de la cabecera de cuenca, la pendiente es moderada, y a nivel de cabecera sur, la pendiente se torna más agreste donde el 53.8% se encuentra entre fuertemente inclinado a escarpado, la cual también está relacionado con el grado de concentración de humedad y vegetación.
6. Las cabeceras de cuenca generan niveles de sedimentación y erosión entre 40 y 26 toneladas/ha anuales respectivamente, las cuales mediante un sistema de gestión disminuiría el acarreamiento de material hacia la parte media y baja de la cuenca, ayudando el control de sedimentos en el embalse Gallito Ciego.

7. El proceso de reestructuración del suelo, la geomorfología y la vegetación, constituyen un elemento clave en el acondicionamiento de cordilleras sin glaciares, acumulando el agua en forma de agua subsuperficial, descargándolo paulatinamente durante las temporadas secas y con ello generando las primeras escorrentías de quebradas y ríos.

Sub problema 3.

¿Cómo se relaciona la escorrentía y recargas de aguas subterráneas en geoformaciones cóncavas en las partes altas de la cuenca del río Jequetepeque?

Objetivo específico 3

Estudiar y determinar la escorrentía y recarga de aguas en las partes altas de la cuenca.

8. Las geoformaciones cóncavas, aportan el 71.11% de las precipitaciones que ocurren en los espacios de las cabeceras de cuenca, expresado en metros cúbicos, es de 1 309 593.6 m³/año. Su recarga está relacionado directamente con el área de influencia direccionando el afloramiento de las aguas subsuperficiales como escorrentía de infiltración hacia los acuíferos en un 54.44% y una recarga neta del 16.77%, que se perdería si estas geoformas cóncavas no estuviesen presentes.
9. Si consideramos el aporte natural y el aporte artificial, se estaría generando un incremento en la recarga de agua. Tal es el caso de la geoformación cóncava (A-01) donde el aporte natural hacia los acuíferos es de 9 387.31 m³/año, considerándose como el aporte más bajo y sumándole a ello las recargas artificiales en donde se obtuvo un aproximado de 28 067.04 m³, generaría un aporte total 37 454.35 m³/anuales, evitando que las aguas excedentes durante las épocas de lluvia, generen escorrentías y se pierdan en el mar.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda no utilizar algunas de las geoformaciones cóncavas como almacenamiento de agua tales como: M-01 al M-12, A-01 y otras en forma de hondonadas, debido al lento y continuo proceso de erosión de las agua por hidrolisis y carbonatación que actúan y disuelven el material geológico, desestabilizando en el tiempo cualquier construcción que se diseñe sobre ella.
2. Algunas de las geoformaciones cumplen para el almacenamiento de agua, por lo que se recomienda utilizarlo para ese fin, tal es el caso de la FC: EP-05, C-09, LL-01, y otras de menores dimensiones, especialmente las geoformaciones en encajonamiento.
3. Utilizar las geoformaciones cóncavas en las cabeceras de cuenca, como medios de recargas de agua estacional, disminuyendo la generación de sedimentos y controlando las pérdidas del recurso en periodos húmedos. Este control amortiguaría la sobre explotación de los acuíferos de agua subterránea en la parte baja de la cuenca.
4. En base a la información de la presente investigación, se recomienda estudiar o modelar la incidencia de la recarga de agua por formaciones cóncavas, sobre el flujo base del río en zonas localizadas aguas abajo del área de estudio, dado la inexistencia de estudios respecto al proceso hidrogeológico de recargas de agua desde las partes altas hacia la parte media y baja de la cuenca.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCÁNTARA BOZA, F.A. 2013. Compendio de Geología. Universidad Católica Sedes Sapientiae. Lima. Perú.
- ALCÁNTARA GUEVARA, R.A. 2010. Cabeceras de Cuenca (Entrevista). Celendín, PE. Presidente de Asociación de Productores Agropecuarios de Cajamarca. Perú.
- ANA (Autoridad Nacional del Agua, PE). 2009. Medidas para la adaptación al cambio climático. Ministerio de Agricultura. Lima. Perú.
- APARICIO MIJARES, FJ. 1996. Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa. México.
- ASIM, M., DOCTER, C., NITZCHE, C., WINEGAR, A. and ECHSTEIN, Y. 2004. A procedure for delineation of bedrock fracture zones under glacial drift formation in Ohio. Kent State University. Journal of Environmental Hydrology. Volume 12. Paper 15.
- AYALA, R., PÁEZ, G. y ARAQUE F. 2005. Análisis geomorfológico de la microcuenca El Guayaba a propósito de la ocurrencia de las lluvias excepcionales de febrero de 2005. Cuencas del río Macoties, estado de Mérida-Venezuela.
- BEDIENT, P.B., HUBER, W.C. and VIEUX, BE. 2008. Hydrology and floodplain analysis. Fourth edition. Prentice-Hall, Inc. United State of America.
- BONELL, M., HUFSCHMIDT, M.M. and GLADWELL, J. 1993. Hydrology and water management in the humid tropics. Cambridge University Press.
- CASTANY, G. 1971. Tratado práctico de las aguas subterráneas. Ediciones Omega. Barcelona. España.
- CCTA (Coordinadora de Ciencia y Tecnología en los Andes, VE). 1999. La Gestión de Microcuencas: Una estrategia para el desarrollo sostenible de montañas del Perú. Lima Perú.
- CENTENO CARRILLO, J.D. y GARCÍA RODRÍGUEZ, M. 2008. Balance hídrico de las superficies gradas en roca granítica. Un modelo geomorfológico e hidrogeológico con implicancias ambientales. Universidad complutense de Madrid.
- CHORLEY, R.J. 1975. Introduction fluvial processes. Harper and row, publishers inc. Great Britain.

- CHOW, V TE., MAIDMENT, D.R. y MAYS, L.W. 1994. Hidrología Aplicada. Editorial Nomos. Santa Fe de Bogotá. Colombia.
- CUELLAR TELLO, J.R. 1970. Flujo subterráneo en el fundo “Aguas Negras”. Piura. Tesis Lic. Ing. Agr. UNALM. Perú.
- DEUTSCH, J. 2000. Groundwater Geochemistry, fundamentals and applications to contamination. Lewis publishers. United State of America.
- DÍAZ, M.A., NAVARRETE GONZALES, J.D. y SUAREZ LÓPEZ, T. 2005. Paramos: hidrosistemas sensibles. Universidad de los Andes.
- DIEZ HERRERO, A. 2001. Geomorfología e Hidrología Fluvial del río Alberche. Modelos y SIG para la Gestión de Riberas. Tesis Dr. Universidad Complutense de Madrid. España.
- DIARIO EL PERUANO. 2009. Ley N° 29338. Ley de Recursos Hídricos y su Reglamento. Periódico Normas Legales: Lima, Perú.
- FAO (Food and Agriculture Organization of The United Nations, IT). 2006. Guidelines for soil description. Fourth edition. Rome.
- FERNÁNDEZ CARRASCO, F. 2002. Estudio del Impacto del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos: Aplicación en diecinueve pequeñas cuencas en España. Tesis Dr. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- FERNÁNDEZ MEJUTO, M., VELA MAYORGA, A. y CASTAÑO FERNÁNDEZ, S. 1999. La utilización de los modelos en hidrología. Universidad de Castilla La Mancha.
- FCIHS (Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, ES). 2009. Hidrología: Conceptos básicos de hidrología subterránea. Barcelona. España.
- FOSTER, S., CHILTON, J., MOENCH, M., CARDY, F. y SCHIFFLER, M. 2000. Groundwater in rural Development: Facing the Challenges of Supply and resource sustainability. World Bank Technical paper N° 463. Washington D.C.
- GRUPO EDITORIAL OCÉANO. 1989. Diccionario enciclopédico Océano Uno. Barcelona. España.
- GUERRA LÁZARO, L.G. 1973. Movimiento del agua en el suelo durante y después de la infiltración. Tesis. Lic. Ing. Agr. UNALM. Lima. Perú.
- GUERRERO SALAZAR, P. y YEVJEVICH, V. 1975. Analysis of drought characteristics by the theory of runs. Colorado State University.
- GUTIÉRREZ ELORZA, M. 2008. Geomorfología. Pearson Prentice Hall. España.

- GUTIÉRREZ, J. 2004. Guía Teórica de Geomorfología. Universidad de los Andes. Venezuela.
- INADE (Instituto Nacional de Desarrollo, PE). 2002. Plan de gestión de la oferta de agua en la cuenca Jequetepeque. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima. Perú.
- JACQUIN, P.A. and SOTO-SANDOVAL, J.C. 2013. Interpolation of monthly precipitation amounts in mountainous catchments with sparse precipitation networks. Chilean Journal of Agricultural Research. Vol. 74. October-December. 2013, pp 406-413.
- JORDÁN LÓPEZ, A. 2005. Manual de edafología. Universidad de Sevilla. España.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F., RUBIO RECIO, J.M. y CUADRAT, J.M. 1992. *Geografía física*. Gráficas Rógar. España.
- MARIZZA, M.S. 2003. Integración de la información espacio temporal para la restitución de las series de aportaciones al régimen natural utilizando Sistemas de Información Geográfica. U.P.M.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. y NAVARRO HEVIA, J. 1995. Hidrología forestal. El ciclo hidrológico. Universidad de Valladolid. España.
- MATOS CALDERÓN, C. 1969. Estudio comparativo de los métodos de medida de la infiltración. Tesis Lic. Ing. Agr. UNALM. Perú.
- MEJÍA AGUILAR, J.R. 2009. Geología y categorización de recursos geológicos mineros del proyecto Invicta – provincia de Huaura, Lima. Tesis. Ing. Geol. UNI. Perú.
- MILLAN, J. y YEVJEVICH, V. 1971. Probabilities of observed droughts. Colorado State University. USA.
- MOLINA, G. 1975. Hidrología. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú.
- MONSALVE SÁENZ, G. 2002. Hidrología en la Ingeniería. segunda edición, Bogotá. Colombia.
- MOSER, A. 1990. Guide to the safe handling of radioisotopes in hydrology. Institute of hydrology Neuhergerg, Munich, Germany. Austria.
- PEÑA, F. y VARGAS, F. 2005. Mapa hidrogeológico de la cuenca del río Jequetepeque: regiones Cajamarca y la Libertad. XIII Congreso Peruano de Geología. Sociedad Geológica del Perú. INGEMMET. Lima Perú.
- PÉREZ VERÁSTEGUI, G. 2003. Hidrogeología. UNI. Lima. Perú.

- PORTA, J., LOPEZ-ACEVEDO, M. y ROQUERO, C. 2003. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Edición Mundi-Prensa. México.
- RIVERA MANTILLA, H. 2011. Geología general. Tercera Edición. Editorial Megabyte. UNMSM. Lima. Perú.
- ROJAS VÁSQUEZ, G. 2007. Gobernabilidad de la gestión del agua en una cuenca compartida; Jequetepeque-Chamán. Tesis: Grado Ms.C. UNALM. Lima. Perú.
- SALAS, J. 2010. Low Flows and Droughts. Colorado State University. USA.
- SCHOSINSKY N, G. 2007. Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Revista Geológica de América Central, 34-35: 13-30,2006. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
- TAPIA MUÑOZ, S.M. 2011. Cuantificación de la erosión hídrica superficial en laderas semiáridas de la sierra peruana. Tesis: Grado Ms.C. UNALM. Lima. Perú.
- VARGAS CAIRO, C.A. 2008. La contaminación fluvial y la alteración de usos del suelo y paisajes como indicadores de un proceso de urbanización. Zona de estudio: Distrito de Ate-Provincia de Lima. Tesis Mg. Universidad Internacional de Andalucía. Huelva, España.
- VÁSQUEZ VILLANUEVA, A. 2012. Sistema de captación de agua de lluvia en laderas semiáridas de la sierra y su impacto en el proceso de desertificación y cambio climático. Tesis: Grado Ph.D. UNALM. Lima. Perú.
- VENTURA MENDOZA, O.M. 1974. Estudio hidrológico de la cuenca del río Acarí para el aprovechamiento de sus recursos hídricos. Tesis Lic. Agr. UNALM. Lima. Perú.
- VILLÓN BÉJAR, M. 2011. Hidrología. Segunda edición. Lima. Perú.
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific Cultural Organization, FR). 2003. Water for people, water for life. Firth publication. Paris. Francia.
- _____. (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, FR). 2006. El Agua, una responsabilidad compartida. 2do Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. Paris. Francia.
- _____. 2009. Water in a Changing World. The United Nations World Water Development Report 3. Paris. Francia.

- WEIHUA ZHANG, T.D. y B.F. AUBRY. 2008. Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resources Research*. Volume 27, Issue 9. Pages 2271-2285.
- WORLD BANK. 1999. *Groundwater: Legal and Policy Perspectives*. Proceeding of a World Bank Seminar. World Bank Technical Paper N° 456. Washington, D.C.
- _____. 2003. *Water Resources and Environmental: Environmental flows: Flood flows*. Technical Note C.3. Editors. Rafik, RD. Washington DC.
- YACTAYO PÉREZ, A. 2006. Evaluación cuantitativa de la erosión hídrica utilizando varillas de erosión en suelos con diferentes grados de cobertura vegetal de la comunidad campesina de Yuracmayo, Lima. Tesis: Grado Ms.C. UNALM. Lima. Perú.
- ZAVALETA GARCÍA, A. 1992. *Edafología. El suelo en relación con la productividad*. CONCYTEC. Lima. Perú.

VIII. ANEXOS.

8.1 ANEXO CARTOGRÁFICO

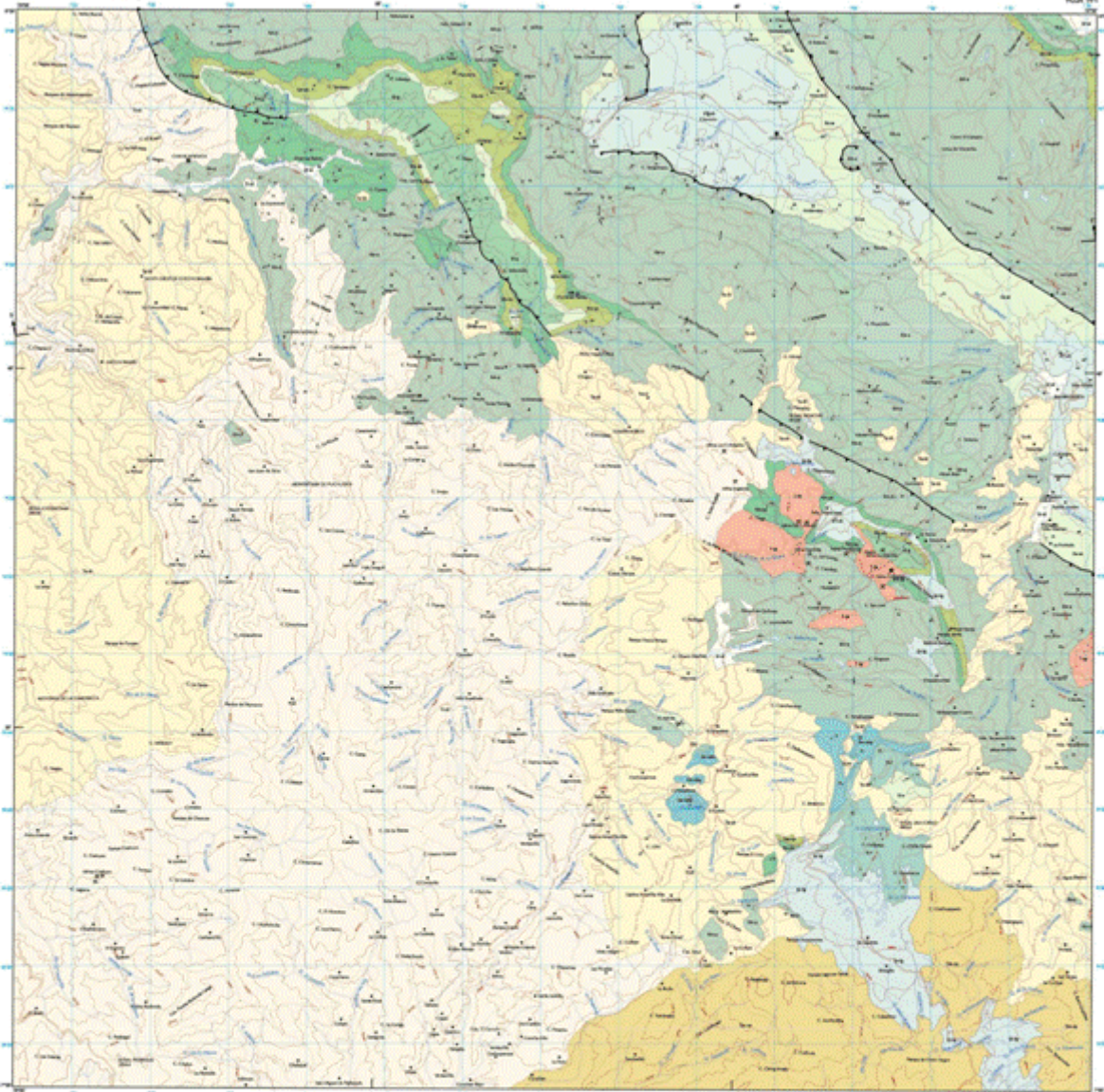
Cartas geológicas 1/100 000

14E – Chongoyape.

14F – Chota.

15F – Cajamarca.

15G – San Marcos.



LEYENDA

UNIDAD	SUBUNIDAD	EDAD	ROCA	UNIDADES CORRELACIONADAS	ROCA METAMORFA
CUERPO DE CHOTA	CHOTA	MIAMI	MIAMI	MIAMI	
		MIAMI	MIAMI	MIAMI	
		MIAMI	MIAMI	MIAMI	
		MIAMI	MIAMI	MIAMI	
MISCELANEA	MIAMI	MIAMI	MIAMI	MIAMI	
		MIAMI	MIAMI	MIAMI	
	MIAMI	MIAMI	MIAMI	MIAMI	
		MIAMI	MIAMI	MIAMI	
	MIAMI	MIAMI	MIAMI	MIAMI	
		MIAMI	MIAMI	MIAMI	
	MIAMI	MIAMI	MIAMI	MIAMI	
		MIAMI	MIAMI	MIAMI	

REPÚBLICA DEL PERÚ
SECTOR ENERGÍA Y MINAS
INSTITUTO GEOLOGICO MINERO Y METALURGICO
MAPA GEOLÓGICO DEL CUADRÁNGULO DE CHOTA
ESTADÍSTICO - CLASIFICA
DEL INSTITUTO GEOLOGICO MINERO Y METALURGICO
ESTADÍSTICO DEL INSTITUTO GEOLOGICO MINERO Y METALURGICO



- SÍMBOLOS**
- Carretera asfaltada
 - Carretera ordinaria
 - Ruina o ruinas de adobe
 - Ruina o ruinas de adobe con mampara
 - Edificio actual
 - Ruina o ruinas de fábrica
 - De la ciudad
 - De la provincia
 - Suburbanización
 - Aldea actual
 - Clase de perfil actual
 - Perfil arqueológico de adobe
 - Muro o talud
 - Edificio construido
 - Edificio de mampara
 - Edificio pendiente
 - Edificio

8.2 ANEXO METEOROLÓGICO

DATA METEOROLÓGICA DE ESTACIONES EN LA CUENCA DEL JEQUETEPEQUE.

DATA DE PRECIPITACIÓN. ESTACION ASUNCIÓN

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	7.0	0.0	24.7	0.0	4.5	0.0	0.0	0.2	0.0	60.4	70.6	34.1
1981	15.6	46.6	100.6	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.4	24.0	40.7
1982	17.3	44.8	10.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.8	87.3	137.0	54.7
1983	73.1	42.4	108.9	70.0	51.4	0.0	0.2	0.0	0.0	2.3	9.3	29.0
1984	5.0	135.0	110.3	74.2	29.1	16.5	3.1					
1986					7.0	0.0	0.6	18.4	2.0	16.6	60.6	146.8
1987	237.7	114.0	121.4	84.3	7.3	2.0	7.7	10.9	27.5	12.8	75.5	48.7
1988	212.3	143.5	51.4	117.6	0.6	0.5	0.0	3.0	8.6	45.6	82.5	61.2
1989	182.4	303.7	257.8	87.0	13.6	11.4	0.1	3.9	20.0	92.3	15.3	0.0
1990	87.7	141.8	154.4	48.2	32.8	24.3	0.0	0.0	0.0	45.3	73.0	52.7
1991	40.6	88.3	278.6	81.7	25.2	3.0	0.0	0.0	2.2	53.2	55.4	97.3
1992	140.9	69.8	124.4	206.3	43.2	25.1	1.1	6.2	17.0	62.5	9.8	33.3
1993	84.4	242.7	357.1	185.3	53.8	0.7	4.2	0.5	29.3	86.3	79.4	149.2
1994	232.6	217.4	295.0	210.4	35.4	3.0	0.0	0.0	8.5	4.0	54.4	165.2
1995	119.3	207.4	121.2	63.3	25.8	4.1	3.3	0.0	4.3	32.5	39.5	94.7
1996	151.1	205.7	283.1	78.2	10.5	10.1	0.0	2.5	37.0	49.7	21.8	20.6
1997	53.6	184.6	70.1	92.9	17.1	10.3	0.0	0.0	33.1	57.6	121.5	279.2
1998	436.5	481.0	474.4	180.7	51.3	4.8	0.0	2.6	7.4	51.4	24.0	68.1
1999	123.7	554.9	236.4	120.1	69.4	36.2	9.6	0.0	58.7	35.7	73.7	121.3
2000	119.9	343.0	331.5	138.7	74.0	26.0	0.5	4.3	31.0	21.1	38.2	139.3

2001	314.4	166.7	615.1	90.5	65.1	0.0	1.9	0.0	11.5	27.5	107.1	64.7
2002	21.7	231.3	311.6	201.0	15.3	7.0	3.7	0.0	20.0	105.6	77.3	134.7
2003	112.0	140.3	149.8	51.7	27.3	23.0	2.1	4.4	2.3	23.4	50.7	103.0
2004	39.1	211.8	165.4	78.9	20.8	0.6	6.9	4.5	12.8	58.3	75.1	141.2
2005	150.2	154.9	375.5	33.0	1.1	0.2	0.0	0.0	3.5	51.2	18.4	107.1
2006	151.4	216.1	480.5	170.7	4.7	30.4	3.1	1.8	21.5	2.4	66.3	164.3
2007	168.7	69.8	338.6	129.7	11.2	0.0	0.0	5.0	2.4	74.0	72.3	54.2
2008	277.9	399.6	286.2	204.0	16.9	3.2	0.0	4.1	40.7	85.9	92.1	9.5
2009	390.6	251.2	460.7	128.6	41.4	8.4	10.3	0.0	2.3	72.8	125.0	142.3
2010	66.2	230.3	213.6	152.9	33.7	5.3	3.8	0.0	24.2	15.9	43.2	56.3

DATA DE TEMPERATURA MEDIA. ESTACION ASUNCIÓN

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1987		17.2	17.2	17.4	18.0	19.6	18.6	19.4	18.5	18.2	17.1	17.7
1988	16.1	15.7	16.5	15.6	17.4	17.7	18.4	18.7	17.3	16.1	16.1	15.5
1989	14.9	14.7	14.7	15.3	17.5	16.9	19.3	19.0	18.3	17.0	16.9	17.0
1990	16.3	16.8	17.0	16.7	17.7	19.2	19.4	18.0	19.3	16.9	16.9	18.1
1993		14.7	14.5	14.7	15.3	17.6	17.4	17.4	17.0	17.1	16.1	15.9
1994	15.2	15.3	15.2	15.4	16.0	16.2	16.8	16.8	16.9	15.6	15.2	14.7
1995	14.7	13.8	14.1	14.5	14.3	16.4	16.4	17.7	17.7	17.1	16.8	16.1
1996	15.1	15.3	15.4	15.6	16.6	16.5	16.3	17.2	17.8	16.7	17.1	17.0
1997	15.8	15.8	16.7	16.7	17.6	16.5	18.3	18.5	17.8	17.9	16.9	17.0
1998	17.2	17.5	16.9	17.2	17.4	16.8	17.0	17.0	17.1	17.1	17.1	16.9
1999	15.6	14.8	15.6	15.7	15.9	15.9	16.4	17.0	16.2	17.1	16.4	15.5
2000	15.3	14.7					16.8	17.4	16.2	17.3	16.5	15.8
2001	14.5	15.7	15.3	15.8	16.0	16.8	17.0	18.6	16.5	17.3	16.0	16.3
2002	16.4	15.6	16.0	15.5	17.2	17.3	17.4	18.6	17.5	16.6	16.4	16.6
2003	16.3	16.1	15.9	16.6	17.1	16.8	17.5	18.1	17.9	17.3	17.1	16.4
2004	16.2	15.7	16.6	16.5	17.1	18.0	16.7	18.4	17.6	16.7	16.7	16.2
2005	15.7	15.9	16.0	17.3	17.4	17.6	18.3	18.3	17.8	16.5	16.6	15.8
2006	15.8	15.3	15.3	15.6	17.0	16.7	18.0	18.1	17.5	17.3	16.7	16.1
2007	15.8	16.0	15.5	15.7	16.7	17.2	17.6	17.0	17.6	16.0	15.9	15.7
2008	14.4	14.7	15.1	15.3	16.0	16.8	17.1	16.8	17.6	16.5	16.0	16.3
2009	14.8	14.8	15.2	15.7	16.6	17.2	17.5	17.8	18.1	17.3	16.7	16.3
2010	16.7	17.2	16.8	17.2	17.5	17.4	17.0	17.8	16.9	17.1	15.9	15.5

DATA DE PRECIPITACIÓN MENSUAL, ESTACIÓN PORCÓN

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	70.0	37.3	166.9	69.6	73.6	11.8	0.0	5.7	2.2	247.2	221.1	161.0
1981	94.1	257.3	190.0	153.1	65.6	0.0	0.0	0.0	6.5	160.6	60.3	90.8
1982	56.8	19.2	72.2	32.6	34.2							
1984	0.0			134.0	0.0	0.0	60.0					
1985						0.0	0.0	0.0	0.9	0.6	0.8	0.0
1986	155.0	41.0	6.0	74.2	106.6			50.0	10.9	33.0	51.8	133.2
1987	315.7	118.5	126.5	85.3	68.6	0.0	19.5	0.0		122.7	161.6	
1988	307.5	176.9	63.6	167.3	18.6	15.6	6.4	5.3	30.6	133.7	112.6	127.6
1989	188.7	216.8	85.0	89.9	18.5	0.0	0.0	0.0	46.5	77.0	51.5	0.0
1990	29.7	85.4	88.6	127.2	33.1	35.6	0.9	0.6	139.7	262.0	250.2	103.6
1991	94.7	355.5	509.6	248.6	287.0	6.3	0.0	0.0	78.7	157.6	221.5	250.1
1992	170.1	74.1	137.1	119.1	107.7	62.4	0.0	24.0	135.5	119.2	75.7	174.1
1993	147.6	190.6	374.3	437.8	102.7	19.8	0.0	18.4	82.6	137.5	206.2	452.6
1994	475.4	373.5	531.9	268.5	329.1	18.6	0.0	22.2	104.8	252.8	210.7	142.5
1995	139.7	228.8	217.7	127.8	112.7	12.6	51.8	48.9	54.9	96.5	125.9	243.9
1996	198.8	407.5	312.7	141.3	59.7	49.7	0.0	20.3	48.5	232.9	80.6	58.6
1997	186.9	190.3	123.2	260.0	81.0	18.5	39.0	9.9	80.5	169.2	301.6	305.1
1998	168.5	380.5	298.7	243.2	85.4	0.0	0.0	14.8	67.6	234.7	158.8	99.0
1999	210.3	494.2	253.5	126.0	166.7	53.9	20.3	6.4	228.3	65.3	138.6	166.4
2000	74.8	237.0	221.1	168.6	160.7	40.7	1.6	16.3	123.2	19.3	62.8	236.5
2001	341.1	227.7	419.2	92.6	88.7	17.6	15.2	0.4	145.2	169.5	156.1	171.8
2002	76.2	188.8	390.1	159.0	38.1	27.8	15.2	2.6	53.3	202.1	226.5	243.0
2003	103.8	134.9	124.3	81.2	76.0	54.4	28.9	15.6	47.2	101.8	112.6	100.0
2004	70.3	230.4	168.2	82.4	75.4	11.7	41.0	19.1	84.8	147.0	168.0	240.9

2005	157.8	231.2	343.3	93.1	91.6	53.7	0.0	7.1	54.4	152.8	28.6	164.8
2006	145.5	188.1	345.7	184.7	62.8	62.0	5.1	15.7	116.2	39.8	158.5	183.6
2007	245.4	64.5	352.3	226.3	57.7	1.1	42.6	20.1	32.8	171.8	211.1	146.4
2008	190.6	291.2	252.4	150.3	76.0	73.3	16.0	11.0	110.9	182.6	127.3	66.4
2009	344.8	197.5	307.3	149.6	127.4	31.3	18.1	8.0	27.0	184.0	187.9	234.8
2010	108.0	169.7	275.7	163.5	83.1	39.4	44.3	33.6	31.2	82.7	96.5	182.6

DATA DE PRECIPITACIÓN MENSUAL, ESTACIÓN LIVES

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	7.7	39.7	38.7	18.3	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	112.2	15.1	42.3
1981	83.6	183.2	129.3	33.2	4.3	0.0	1.5	7.9	0.0	76.1	28.7	14.1
1982	30.9	31.7	28.5	40.0	20.0	6.5	2.2	0.0	43.0	24.7	35.7	132.2
1983	173.9	105.0	271.0	253.6	10.7	9.6	0.0	2.2	27.7	30.6	15.8	100.6
1984	54.6	274.1	150.1	40.7	46.6	26.7	6.5	3.2	3.0	39.9	29.0	30.1
1985	29.5	51.7	127.3	10.5	12.7	19.9	0.0	0.0	19.0	10.6	0.0	30.9
1986	134.6	40.4	38.5	131.2	0.0	0.0	0.0	20.0	0.0	4.4	22.3	37.0
1987	209.4	105.4	65.5	0.0	0.0	0.0	4.6	2.1	13.9	5.3	31.2	2.0
1988	99.6	76.6	27.0	70.1	1.8	0.0	0.0	0.0	11.1	10.7	13.9	4.3
1989	75.7	293.1	89.3	78.2	4.6	1.5	0.0	5.0	9.7	34.7	10.0	0.0
1990	27.5	52.1	76.2	17.6	2.0	29.2	0.0	0.0	8.0	48.7	49.5	29.3
1991	0.0	48.1	82.3	45.4	17.5	0.0	0.0	0.0	11.2	56.5	45.3	27.1
1992	61.6	73.1	166.3	97.0	40.6	6.5	0.0	0.0	7.5	31.1	21.2	12.6
1993	72.2	238.4	237.0	57.3	34.2	0.0	0.7	1.1	4.1	30.9	24.4	26.3
1994	71.2	144.1	197.4	95.1	11.8	10.7	2.5	0.0	7.3	5.3	35.3	51.0
1995	102.4	122.4	71.6	40.0	6.6	9.1	1.1	0.0	8.7	22.2	8.1	91.5
1996	74.3	180.1	136.9	40.2	0.6	0.0	0.0	5.8	0.4	31.0	7.9	15.8
1997	15.1	128.2	48.7	54.4	1.8	14.3	0.0	0.0	20.1	38.1	82.4	317.6
1998	337.2	534.3	561.3	139.3	17.2	0.0	0.0	0.8	9.2	37.5	9.3	54.2
1999	105.3	261.3	95.5	55.2	31.0	13.0	5.3	0.0	13.0	4.9	6.9	58.3
2000	24.3	127.5	163.4	50.2	39.0	10.9	0.0	0.0	3.1	0.0	16.1	89.0
2001	94.0	91.5	390.7	86.9	37.2	1.8	0.0	0.0	24.5	5.0	22.5	18.3
2002	20.0	162.0	217.9	79.6	17.9	0.0	0.6	0.0	2.7	21.2	65.4	34.3

2003	60.0	83.0	49.9	32.6	7.2	4.5	0.0	0.0	13.4	2.4	21.4	26.4
2004	19.3	67.7	84.7	5.7	13.8	3.6	1.2	0.9	6.6	19.3	13.0	32.3
2005	37.1	53.6	102.2	17.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.9	12.8	3.6	14.4
2006	103.5	156.9	263.8	24.7	2.3	5.5	0.0	7.4	2.0	0.5	20.8	65.2
2007	107.6	18.5	173.4	46.1	5.1	0.0	0.0	0.6	1.1	35.3	32.5	17.3
2008	110.8	236.2	264.0	136.0	3.1	0.0	0.0	0.7	9.0	20.4	36.2	9.2
2009	168.0	163.8	120.3	14.2	14.2	4.8	0.8	0.0	0.6	20.6	29.0	10.8
2010	20.8	148.9	115.4	68.9	9.3	0.0	0.0	0.6	2.3	14.5	7.0	22.4

DATA DE PRECIPITACIÓN MENSUAL, ESTACIÓN LLAPA

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	20.5	42.2	116.0	83.9	16.1	5.3	4.8	17.9	2.8	149.6	119.3	108.7
1981	73.0	232.2	138.6	66.3	28.8	16.1	11.3	36.6	32.7	115.6	55.5	80.8
1982	75.0	59.5	93.8	104.3	63.8	29.2	19.7	23.1	75.4	170.0	95.6	162.4
1983	284.0	122.0	262.3	137.5	53.4	30.4	6.2	0.0	69.8	82.4	57.4	156.4
1984	56.4	380.8	238.9	119.3	110.0	40.7	62.8	10.2	30.6	170.9	71.9	48.4
1985	35.1	93.6	73.0	82.8	39.1	4.8	3.5	21.5	57.3	37.8	32.3	110.3
1986	153.8	89.3	137.7	145.5	60.1	0.0	0.0	58.2	3.6	63.9	68.2	131.7
1987	185.8	101.8	57.9	127.5	0.0	0.0	10.1	40.3	19.8		56.7	31.7
1988	43.2	140.4	53.9	207.9	31.6	19.0	7.1	10.8	11.8	114.4	63.7	1.2
1989	93.7	274.1	240.2	224.0	19.3	18.2	0.0	3.0	37.5	142.6	33.8	5.1
1990	87.9	146.8	84.1	78.2	32.2	37.4	0.0	0.0	27.9	107.0	123.8	73.5
1991	33.5	108.9	221.4	110.5	45.6	9.1	0.0	0.0	5.4	72.2	58.1	113.8
1992	122.5	48.0	152.6	88.0	49.4	41.6	0.0	5.0	75.6	119.0	22.0	52.7
1993	110.8	162.6	278.6	142.8	73.7	0.0	8.0	2.2	72.6	123.4	69.1	172.2
1994	150.6	177.0	143.3	163.8	48.9	10.1	3.5	0.0	34.5	16.6	109.0	103.8
1995	94.2	134.9	155.6	91.3	45.6	12.8	20.2	25.2	44.3	65.3	67.4	112.3
1996	151.6	224.3	244.5	62.8	23.3	3.0	2.0	6.9	32.1	105.1	41.8	38.7
1997	44.4	174.1	66.1	96.1	14.2	19.5	0.0	5.9	57.1	49.4	149.1	199.6
1998	209.3	297.1	322.0	202.5	27.1	11.6	3.2	9.3	34.2	111.9	22.1	101.9
1999	151.4	313.6	147.4	89.1	61.0	46.8	10.9	4.1	123.3	58.1	37.2	122.1
2000	45.8	205.7	320.2	133.9	83.8	15.8	0.7	22.8	57.2	41.8	53.3	160.6
2001	238.8	152.0	439.4	122.8	49.3	5.8	9.1	0.0	106.7	58.2	91.3	94.5
2002	63.7	157.7	245.8	197.4	15.9	27.5	4.1	0.5	61.5	116.7	131.9	127.0

2003	119.8	86.8	149.0	61.7	40.4	41.1	0.0	5.1	44.7	56.1	77.1	67.2
2004	19.8	189.2	113.6	85.5	58.2	4.2	21.8	3.3	78.7	86.2	61.2	103.7
2005	98.6	104.0	251.6	39.0	10.4	4.5	1.2	9.3	21.6	70.1	36.9	109.4
2006	162.7	170.5	347.8	78.8	21.4	25.8	4.4	17.7	40.8	23.3	104.2	163.1
2007	175.3	57.1	317.6	185.4	61.4	0.8	3.8	2.7	6.3	86.7	107.1	45.1
2008	132.1	255.4	219.6	145.3	35.2	13.1	5.0	18.2	65.0	129.9	93.3	31.6
2009	226.9	160.1	232.9	147.5	61.2	24.9	12.7	13.7	15.3	74.8	161.9	89.9
2010	47.3	137.8	289.4	103.2	38.7	13.2	19.1	3.4	53.5	36.5	44.3	127.1

8.3 ANEXO FOTOGRÁFICO

FOTOGRAFÍAS EN LA CABECERA DE CUENCA DE GEOFORMACIONES CÓNCAVAS.

FC: EP- 01: Formación Geomorfológica en el distrito El Prado.



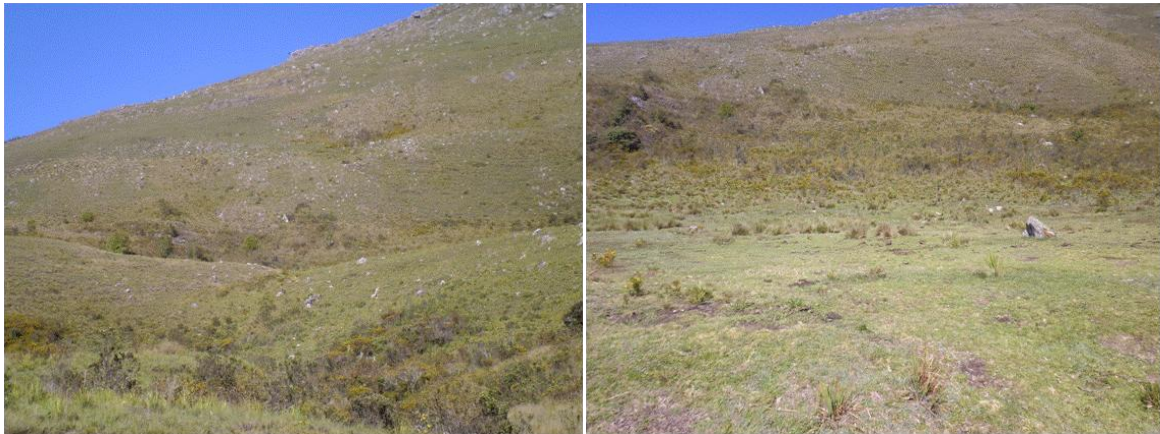
Fuente: Propia. Abril. 2012

FC: EP- 03 Formación geomorfológica en el distrito El Prado y la Vegetación aledaña.



Fuente: Propia. Abril. 2012

FC: C -02: Formación geomorfológica en las alturas de Calquis.



Fuente: Propia. Junio. 2012

FC: C 03: Formación Geomorfológica y los tipos de vegetación en las alturas de Calquis.



Fuente: Propia. Junio. 2012

FC: M-02. Vista panorámica de la geomorfología formando hondonadas en Magdalena



Fuente: Propia 29/05/12

FC: M- 04. Recorrido del agua para esta formación cóncava.



Fuente: Propia 29/05/12

FC: M-05. Vista del espacio y recorrido de agua.



Fuente: Propia 29/05/12

FC: M-07. Vista de la base de esta formación cóncava.



Fuente: Propia 29/05/12

FC: A-01. Vista de la extensión y forma de la hondonada en Asunción.



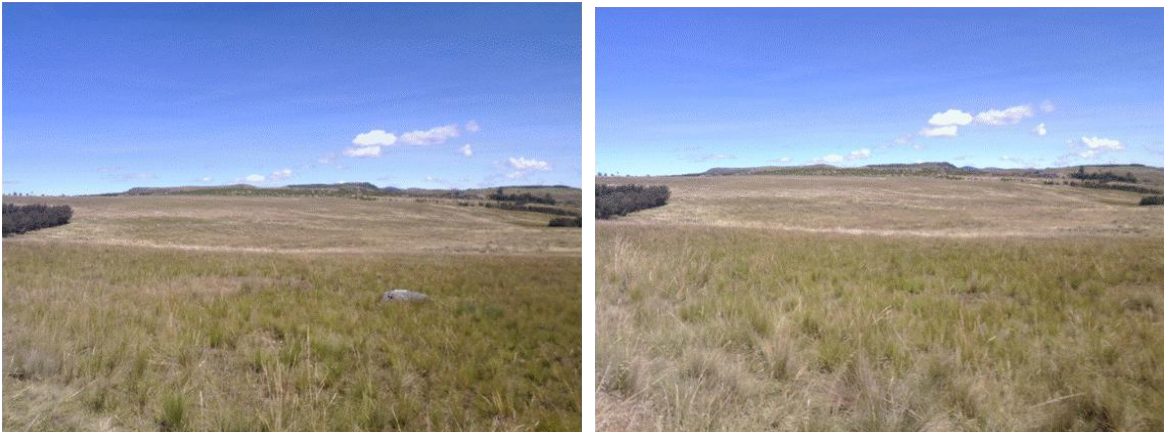
Fuente: Propia 29/05/12

FC: SM-01. Vista desde la parte inferior al encajonamiento en San Miguel.



Fuente: El autor. Visita 11/06/12

FM: C-02. Formación de hondonada en pampa larga.



Fuente: El autor. Visita 13/06/12

Procesos de Intemperismo y adaptación de cuencas sin glaciares – Cuenca Jequetepeque.



Fuente: Propia. Julio – agosto 2012

8.4 ANEXO GEOLÓGICO

UBICACIÓN GEOESPACIAL DE LA GEOLOGÍA EN LA CABECERA DE CUENCA DEL JEQUETEPEQUE.

Id	FORMACIÓN GEOLOGICA	SIMBOLO	DISTRITO	PROVINCIA	ÁREA (ha)
1	Formación Carhuaz	Ki-car	JESUS	CAJAMARCA	971.06
2	Formación Carhuaz	Ki-car	CONTUMAZA	CONTUMAZA	385.67
3	Formación Chimú	Ki-chi	CONTUMAZA	CONTUMAZA	4468.54
4	Formación Chimú	Ki-chi	COSPAN	CAJAMARCA	229.34
5	Formación Farrat	Ki-f	HUALGAYOC	HUALGAYOC	2192.23
6	Formación Farrat	Ki-f	CAJAMARCA	CAJAMARCA	657.82
7	Formación Farrat	Ki-f	CHETILLA	CAJAMARCA	719.27
8	Formación Farrat	Ki-f	CONTUMAZA	CONTUMAZA	1.19
9	Formación Farrat	Ki-f	ASUNCION	CAJAMARCA	2641.83
10	Formación Farrat	Ki-f	JESUS	CAJAMARCA	2746.17
11	Formación Farrat	Ki-f	CONTUMAZA	CONTUMAZA	1244.79
12	Formación Farrat	Ki-f	CONTUMAZA	CONTUMAZA	2883.74
13	Formación Farrat	Ki-f	CONTUMAZA	CONTUMAZA	0.40
14	Formación Farrat	Ki-f	COSPAN	CAJAMARCA	97.02
15	Formación Goylloriquizga	Ki-g	CAJAMARCA	CAJAMARCA	3619.71
16	Formación Pariatambo	Ks-p	HUALGAYOC	HUALGAYOC	833.35
17	Formación Yumagual	Ks-yg	CAJAMARCA	CAJAMARCA	3885.69
18	Formación Yumagual	Ks-yg	MAGDALENA	CAJAMARCA	1050.49
19	Formación Yumagual	Ks-yg	MAGDALENA	CAJAMARCA	125.07
20	Formación Yumagual	Ks-yg	JESUS	CAJAMARCA	1074.62
21	Formación Yumagual	Ks-yg	JESUS	CAJAMARCA	6776.37
22	Granodiorita	Kti-gd	ASUNCION	CAJAMARCA	1311.13
23	Depósitos Fluvioglaciales	Qp-fg	TUMBADEN	SAN PABLO	5104.65
24	Depósitos Fluvioglaciales	Qp-fg	SAN SILVESTRE DE COCHAN	SAN MIGUEL	0.61
25	Rocas intrusivas	T-di/to	TANTARICA	CONTUMAZA	2082.47
26	Volcánico Chilete	Ti-vch	EL PRADO	SAN MIGUEL	1.74
27	Volcánico Chilete	Ti-vch	CONTUMAZA	CONTUMAZA	4831.69
28	Volcánico San Pablo	Ti-vsp	CHETILLA	CAJAMARCA	3369.09
29	Volcánico San Pablo	Ti-vsp	CONTUMAZA	CONTUMAZA	941.76
30	Volcánico Llama	Tm-vll	TONGOD	SAN MIGUEL	20029.52
31	Volcánico Llama	Tm-vll	CONTUMAZA	CONTUMAZA	4311.54
32	Volcánico Porculla	Tm-vp	ENCAÑADA	CAJAMARCA	11843.56
33	Volcánico Porculla	Tm-vp	EL PRADO	SAN MIGUEL	9586.55
34	Volcánico Huambos	Ts-vh	CATILLUC	SAN MIGUEL	12410.56
35	Volcánico Huambos	Ts-vh	HUALGAYOC	HUALGAYOC	614.83

8.5 ANEXO DE MAPAS

MAPA N° 01 MAPA DE UBICACIÓN

MAPA N° 02 DELIMITACIÓN DE LA CABECERA DE CUENCA

MAPA N° 02 DISTRIBUCIÓN GEOLOGICA EN CABECERA DE CUENCA