

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Desarrollo y aplicación de ecuaciones de regresión para la
estimación de caudal en la cuenca del Río Pastaza**

Javier Andrés Sánchez Vaca

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 30 de abril de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Desarrollo y aplicación de ecuaciones de regresión para la estimación de
caudal en la cuenca del Río Pastaza**

Javier Andrés Sánchez Vaca

Nombre del profesor, Título académico

Sixto Durán-Ballén Ochoa, PhD.

Quito, 30 de abril de 2020

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Javier Andrés Sánchez Vaca

Código: 00131924

Cédula de identidad: 1719216218

Lugar y fecha: Quito, 30 abril de 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

DEDICATORIA

A la memoria de mi padre Javier Hernán, por todo su cariño, ejemplo y apoyo incondicional durante toda mi vida, especialmente en mi etapa universitaria donde lamentablemente no pudo verme convertido en su colega.

A mi madre Rocío, por su amor, paciencia y dedicación, así como los valores que forjó en mí, ya que son los cimientos de la persona que soy ahora y que me han permitido alcanzar este logro.

A mi hermana Jhoanna, por su guía, consejos y comprensión en situaciones difíciles que me han dado aliento para seguir adelante y seguir creciendo.

A mi abuela Ana Rosa, por ser una parte fundamental en mi vida y demostrarme que con esfuerzo y sacrificio siempre se puede superar cualquier adversidad.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad San Francisco de Quito por abrirme las puertas a un mejor futuro y demostrarme que la educación basada en artes liberales no solo forma grandes profesionales, sino excelentes seres humanos.

A mis profesores de la carrera de ingeniería civil por todas sus enseñanzas y por saber transmitir su conocimiento de la mejor manera. Por compartir su sabiduría, no solo en el aspecto técnico, sino en el aspecto humano. Especialmente agradezco a mi tutor, Sixto, por siempre brindarme su apoyo, apertura y guía en la consecución de este trabajo y en el resto de la carrera.

A mis tíos y tías que siempre estuvieron pendientes de mí y mi desarrollo durante mi vida académica. Por todo el cariño y apoyo brindado en situaciones difíciles y por demostrarme que la familia es lo más importante que tenemos.

A mis amigos, con quienes he compartido grandes momentos y experiencias únicas que han quedado marcadas en mí. Por su amistad sincera y demostrarme que efectivamente, los amigos son la familia que uno escoge.

RESUMEN

La estimación del caudal que presenta un río es de gran importancia para poder prevenir fenómenos tales como inundaciones o sequías. Así mismo, es de gran utilidad el conocer el caudal medio que este presenta para el diseño y construcción de estructuras civiles e hidráulicas capaces de solventar estos obstáculos y aprovechar los recursos que presentan los ríos respectivamente. Debido a la falta de equipamiento y la dificultad de colocación equipos de medición de caudal en todos los ríos del Ecuador es necesaria la estimación del caudal que estos presentan mediante otros métodos. Es por esto que en el presente proyecto de investigación se busca desarrollar ecuaciones de regresión con alto grado de confiabilidad para la estimación de caudal de ríos, utilizando como río objetivo al Río Pastaza, el cual se origina por la confluencia de los ríos Chambo y Patate y de esta manera validar las ecuaciones y proponer posibles aplicaciones para las mismas.

Palabras clave: Caudal, ecuación de regresión simple, ecuación de regresión múltiple coeficiente de determinación, promedio excluyente.

ABSTRACT

The estimation of the flow presented by a river is of great importance in order to prevent phenomena such as floods or droughts. Likewise, it is very useful to know the average flow that it presents for the design and construction of civil and hydraulic structures capable of solving these obstacles and taking advantage of the resources presented by the rivers respectively. Due to the lack of equipment and the difficulty of placing flow measurement equipment in all the rivers of Ecuador, it is necessary to estimate the flow that these present through other methods. For this reason, this research project seeks to develop regression equations with a high degree of reliability for estimating river flow, using the Pastaza River as the objective river, which originates from the confluence of the Chambo and Patate rivers, and in this way validate the equations and propose possible applications for them.

Key words: Flow, simple regression equation, multiple regression equation, determination coefficient, excluding average.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 Descripción	15
1.2 Problemática	15
1.3 Justificación	15
2. OBJETIVOS	16
3. ALCANCE DEL PROYECTO	17
4. EQUIPOS, INFORMACIÓN Y SOFTWARE	17
5. FUNDAMENTO TEÓRICO	18
5.1 Ciclo Hidrológico	18
5.2 Precipitación	19
5.3 Área de drenaje y Tiempo de Concentración	19
5.4 Diagramas IDF e hidrogramas de escorrentía	20
5.5 Escorrentía	21
5.5.1 Medición del caudal	22
5.6 Ecuaciones de regresión	23
5.6.1 Análisis del caso de Pennsylvania.	24
5.6.2 Modelos de regresión en Estados Unidos.	26
6. DESARROLLO	29
6.1 Datos históricos	29
6.1.1 Depuración de la información	29
6.2 Modelado con ecuaciones de otra región	30
6.3 Desarrollo de ecuaciones de regresión	35
6.3.1 Análisis de regresión lineal con datos de precipitación anuales.	35
6.3.1.1 Selección de la cuenca hidrográfica.	35
6.3.1.2 Selección de estaciones hidrológicas.	37
6.3.1.3 Selección de estaciones meteorológicas.	37
6.3.1.4 Análisis de regresión lineal simple anual	38
6.3.1.5 Análisis de regresión lineal múltiple anual.	42
6.3.1.6 Registro de Resultados de los análisis de regresión lineales anuales.	46
6.3.2 Análisis de regresión lineal con datos de precipitación mensuales.	49
6.3.2.1 Selección de la cuenca hidrográfica.	49
6.3.2.2 Selección de estaciones hidrológicas.	49
6.3.2.3 Selección de estaciones meteorológicas.	50

6.3.2.4	Análisis de regresión lineal simple mensual	50
6.3.2.5	Análisis de regresión lineal múltiple mensual.....	53
6.3.2.6	Registro de Resultados de los análisis de regresión lineales mensuales.	57
6.3.3	Análisis de regresión en forma potencial con datos logarítmicos de precipitación mensuales.....	62
6.4	Presentación de ecuaciones de regresión.....	65
6.4.1	Modelo general de ecuación de regresión lineal múltiple	65
6.4.2	Modelo general de ecuación de regresión potencial múltiple.....	66
6.4.3	Ecuaciones de regresión lineal anual obtenidas.....	66
6.4.3.1	Ecuación de regresión lineal anual para caudal promedio	66
6.4.3.2	Ecuación de regresión lineal anual para caudal máximo (inundación).....	67
6.4.3.3	Ecuación de regresión lineal anual para caudal mínimo (sequía)	67
6.4.4	Ecuaciones de regresión lineal/potencial mensual obtenidas	68
6.4.4.1	Ecuación de regresión lineal mensual para caudal promedio	68
6.4.4.2	Ecuación de regresión lineal mensual para caudal máximo (inundación)	69
6.4.4.3	Ecuación de regresión lineal mensual para caudal mínimo (sequía)	70
6.4.4.4	Ecuación de regresión potencial mensual para caudal mínimo (sequía).....	71
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
7.1	Conclusiones.....	73
7.2	Recomendaciones	75
8.	REFERENCIAS.....	76
9.	ANEXOS	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modelos de regresión en distintas ubicaciones de Estados Unidos.	26
Tabla 2. Datos de la cuenca de drenaje para el uso de ecuaciones de Georgia.....	31
Tabla 3. Datos de la estación hidrológica para el uso de ecuaciones de Georgia	31
Tabla 4. Datos de la estación meteorológica para el uso de ecuaciones de Georgia.....	32
Tabla 5. Datos de precipitación para el uso de ecuaciones de Georgia.....	32
Tabla 6. Datos de altitud y área para el uso de ecuaciones de Georgia.....	33
Tabla 7. Ecuaciones de regresión de Georgia	33
Tabla 8. Valores de caudal para la estación H1140 aplicando las ecuaciones de regresión de Georgia.....	34
Tabla 9. Valores de caudal de datos históricos para la estación H1140.....	34
Tabla 10. Valores de caudal [m ³ /s] de datos históricos para la estación H0800 (1965-1984).	38
Tabla 11. Valores de precipitación [mm] de datos históricos para la estación M0400 (1965-1984).....	39
Tabla 12. Valores de caudal medio mensual [m ³ /s] de datos históricos para la estación H0800 (1976-1990).	42
Tabla 13. Valores de precipitación media mensual [mm] de datos históricos para la estación M0382 (1976-1990).	43
Tabla 14. Valores de precipitación media mensual [mm] de datos históricos para la estación M0380 (1976-1990).	43
Tabla 15. Resultados del análisis estadístico para caudales promedio anuales.....	44
Tabla 16. Resultados del análisis estadístico para caudales máximos (picos) anuales.	45
Tabla 17. Resultados del análisis estadístico para caudales mínimos (sequías) anuales.	45
Tabla 18. Resultados del análisis de regresión lineal simple anual.....	46
Tabla 19. Resultados del análisis de regresión lineal doble anual	48
Tabla 20. Resultados del análisis de regresión lineal múltiple (3) anual	48
Tabla 21. Valores de caudal [m ³ /s] mensual de datos históricos para la estación H0800	50
Tabla 22. Valores de precipitación [mm] mensual de datos históricos para la estación M0380	51
Tabla 23. Valores de caudal medio mensual [m ³ /s] de datos históricos para la estación H0800 para análisis múltiple.....	54
Tabla 24. Valores de precipitación media mensual [mm] de datos históricos para la estación M0380 para análisis múltiple	54
Tabla 25. Valores de precipitación media mensual [mm] de datos históricos para la estación M0097 para análisis múltiple	55
Tabla 26. Resultados del análisis estadístico para caudales promedio mensuales.....	55
Tabla 27. Resultados del análisis estadístico para caudales máximos (picos) mensuales.	56
Tabla 28. Resultados del análisis estadístico para caudales mínimos (sequías) mensuales... ..	57
Tabla 29. Resultados del análisis de regresión lineal simple mensual	58
Tabla 30. Resultados del análisis de regresión lineal doble mensual.....	59
Tabla 31. Resultados del análisis de regresión lineal triple mensual	59
Tabla 32. Resultados del análisis de regresión lineal múltiple mensual	60
Tabla 33. Posibles combinatorias de estaciones meteorológicas a ser analizadas de manera múltiple.....	62

Tabla 34. Comparativo entre regresión lineal doble y regresión potencial doble	62
Tabla 35. Comparativo entre regresión lineal triple y regresión potencial triple	63
Tabla 36. Comparativo entre regresión lineal múltiple y regresión potencial múltiple	63
Tabla 37. Coeficientes de la ecuación de regresión lineal mensual para caudal promedio.....	68
Tabla 38. Coeficientes de la ecuación de regresión lineal mensual para caudal máximo (inundación)	70
Tabla 39. Coeficientes de la ecuación de regresión lineal mensual para caudal mínimo (sequía)	71
Tabla 40. Coeficientes de la ecuación de regresión lineal potencial para caudal mínimo (sequía)	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuencas de ríos a ser analizados.....	17
Figura 2. Diagrama del ciclo hidrológico.	18
Figura 3. Sección mostrando las tres maneras que el agua llega a la corriente.	18
Figura 4. Relación entre la precipitación en exceso y sus pérdidas	21
Figura 5. Elementos principales de un hidrograma unitario.	21
Figura 6. Confluencia de los ríos Onzole y Cayapas.	31
Figura 7. Validación de la ecuación de regresión de Georgia.....	35
Figura 8. Ubicación de la confluencia en el nivel de cuenca 3.	36
Figura 9. Identificación de los ríos en el nivel de cuenca 5.	36
Figura 10. Estaciones hidrológicas analizadas.....	37
Figura 11. Regresión lineal simple de promedios anuales entre las estaciones H0800-M0400.	39
Figura 12. Regresión lineal simple de máximos anuales entre las estaciones H0800-M0400.	40
Figura 13. Regresión lineal simple de mínimos anuales entre las estaciones H0800-M0400.	40
Figura 14. Validación de la ecuación de regresión lineal anual simple para Q_{prom}	41
Figura 15. Ubicación de las estaciones hidrológicas y meteorológicas a ser analizadas mediante ecuaciones de regresión lineal múltiple.....	41
Figura 16. Validación de la ecuación de regresión lineal anual múltiple para caudal promedio.	49
Figura 17. Regresión lineal simple de promedios mensuales entre las estaciones H0800- M0380.	51
Figura 18. Regresión lineal simple de máximos mensuales entre las estaciones H0800- M0380.	52
Figura 19. Regresión lineal simple de mínimos mensuales entre las estaciones H0800- M0380.	52
Figura 20. Validación de la ecuación de regresión lineal mensual simple para caudal promedio.....	53
Figura 21. Validación de la ecuación de regresión lineal mensual múltiple para caudal promedio.....	61
Figura 22. Validación de la ecuación de regresión potencial mensual múltiple para caudal mínimo.	65

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1). Intensidad de precipitación	19
Ecuación (2). Intensidad de precipitación con periodo de retorno.....	20
Ecuación (3). Caudal por método racional.....	22
Ecuación (4). Medición de caudal.....	23
Ecuación (5). Ecuación de regresión del estado de Pennsylvania.....	25
Ecuación (6). Ecuación de regresión del estado de Pennsylvania en forma potencial.....	25
Ecuación (7). Intervalo de predicción del 90%	25
Ecuación (8). Relief Ratio promedio.....	30
Ecuación (9): Modelo general de ecuación de regresión lineal múltiple	65
Ecuación (10): Modelo general de ecuación de regresión potencial múltiple	66
Ecuación (11): Ecuación de regresión lineal anual para caudal promedio	66
Ecuación (12): Ecuación de regresión lineal anual para caudal máximo (inundación)	67
Ecuación (13): Ecuación de regresión lineal anual para caudal mínimo (sequía)	67
Ecuación (14): Ecuación de regresión lineal mensual para caudal promedio.....	68
Ecuación (15): Ecuación de regresión lineal mensual para caudal máximo (inundación).....	69
Ecuación (16): Ecuación de regresión lineal mensual para caudal mínimo (sequía).....	70
Ecuación (17): Ecuación de regresión potencial mensual para caudal mínimo (sequía).....	71

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción

El Ecuador, al ser un país costero y amazónico cuenta con una gran cantidad de ríos dentro de su geografía. Estos ríos a su vez son ramales de ríos más grandes, los cuales desembocan en el Océano Pacífico o en el Océano Atlántico. El caudal que presenta cada uno de estos ríos es variable dependiendo de la precipitación sobre dicha cuenca, la infiltración y la evapotranspiración, los cuales están relacionados con la temperatura, la humedad relativa de la zona y el viento. Además, otros factores influyentes son el área de la cuenca, la diferencia de elevaciones, el tipo de suelo y cobertura vegetal presente. Debido a la variabilidad y diversidad de estos factores en los ríos del Ecuador, la estimación de su caudal puede llegar a ser complejo, pero resulta de gran importancia. Una vez conocido el caudal, es posible diseñar y construir dispositivos y estructuras hidráulicas con el fin de controlar crecientes excesivas en los ríos, previniendo desbordamientos e inundaciones. De igual manera, se puede aprovechar la cantidad de agua existente en un río en un momento determinado para el posible desarrollo de energía sustentable.

1.2 Problemática

El estudio hidrológico en los ríos del Ecuador a lo largo de los años no ha sido lo suficientemente exhaustivo como para poder satisfacer los requerimientos necesarios para la determinación del caudal por métodos convencionales en una gran cantidad de casos. La falta de datos del caudal, tanto diaria como mensual en algunos ríos del Ecuador, hace muy difícil poder utilizar los métodos convencionales. El principal problema es que no existe información suficiente y por ende la creación de hidrogramas unitarios no es factible. De igual manera, la carencia de suficientes estaciones meteorológicas e hidrométricas en funcionamiento en varios puntos de la gran mayoría de ríos del Ecuador no nos permite obtener datos confiables acerca de las variables que intervienen en la determinación del caudal en los ríos. Por lo tanto, es necesario realizar una estimación del caudal por métodos estadísticos de regresión en diversos ríos donde sí existe información suficiente en cuanto a sus variables. De esta manera se podrá aprovechar y controlar la cantidad de agua que fluye por el río durante un evento de precipitación.

1.3 Justificación

La estimación de caudal en los ríos ha sido objeto de estudio e investigaciones alrededor del mundo. Es así que a lo largo de los años se han desarrollado diversos métodos para poder estimar el caudal en los ríos. Entre estos métodos se encuentran el método racional, el cual da una estimación aproximada del caudal pico tomando en consideración el área de caudal, la precipitación y un coeficiente de escorrentía propio de cada tipo de suelo, el cual

toma en cuenta la infiltración. Además de este método, existe el método racional modificado, el cual adicionalmente toma en cuenta la duración de la tormenta. Es así que el caudal pico se reduce a medida que aumenta el tiempo de concentración. A su vez, en este método existe una estimación del caudal pico tomando en cuenta un factor de seguridad o un diagrama en el cual se aplica el principio de superposición para cada intensidad de lluvia. Por otra parte, en Estados Unidos, el Servicio Nacional de Conservación de Recursos (NRCS) por sus siglas en inglés, también desarrolló un método propio, el cual es específico para cada ubicación, características de la cuenca, tiempo de concentración y precipitación. A parte de estos métodos, también existe un método estadístico en el cual se desarrollan ecuaciones de regresión para determinar el caudal en los ríos de una zona determinada, la cual posea similares características climáticas. Sin embargo, estas ecuaciones solo son aplicables en las zonas donde han sido desarrolladas y con los datos históricos de los distintos factores que intervienen en el aumento o disminución del caudal en los ríos.

Por esta razón, el desarrollo de ecuaciones de regresión para la estimación de caudales en ríos del Ecuador resulta necesario para poder aplicar dichas ecuaciones de manera efectiva y práctica en los distintos campos de estudio correspondientes a la hidrología en el Ecuador. De igual manera, el desarrollo de estas ecuaciones también es aplicable para la estimación del caudal en zonas no reguladas, donde no existen suficientes datos, o zonas donde existan variaciones en los factores influyentes para la determinación del caudal. Para esto, es necesario utilizar la recopilación de la información correspondiente a los datos históricos de caudal promedio mensual en los distintos ríos del Ecuador, que para el caso de esta investigación serán los ríos Pastaza, Chambo y Patate. A su vez, se debe poseer información acerca de los factores influyentes en el aumento o disminución del caudal, obtenidos de estaciones meteorológicas ubicadas en ciertas zonas de las cuencas de los ríos mencionados. Por último, es necesario realizar un análisis estadístico de la información existente sobre el caudal de la confluencia de los ríos Chambo y Patate que dan origen al Río Pastaza.

2. OBJETIVOS

- Determinar la factibilidad de la aplicación de ecuaciones de regresión para la estimación de caudal de ríos en el Ecuador.
- Desarrollar ecuaciones de regresión lineal simple para la estimación de caudal de ríos en el Ecuador, especialmente en el Río Pastaza, con precipitaciones promedio anuales y mensuales.
- Desarrollar ecuaciones de regresión lineal multicriteria para la estimación de caudal de ríos en el Ecuador, especialmente en el Río Pastaza, con precipitaciones promedio mensuales.
- Identificar y proponer posibles aplicaciones de las ecuaciones de regresión para la estimación de caudal en el Río Pastaza.

3. ALCANCE DEL PROYECTO

El presente proyecto tiene como alcance el estudio de la factibilidad y el desarrollo de ecuaciones de regresión para la estimación del caudal de distintos ríos del Ecuador, tal como es el caso del Río Pastaza, el cual es producto de la confluencia del Río Chambo y del Río Patate. De igual manera, se busca la identificación y propuesta de sus posibles aplicaciones. Debido a la gran extensión de la zona de estudio (Ecuador), este alcance es demasiado grande y genérico, por lo cual es necesario reducirlo a las cuencas de los ríos Cayapas en Esmeraldas y el río Pastaza cuyo nacimiento se da en la provincia de Tungurahua. Estos ríos pueden ser vistos en la figura 1:

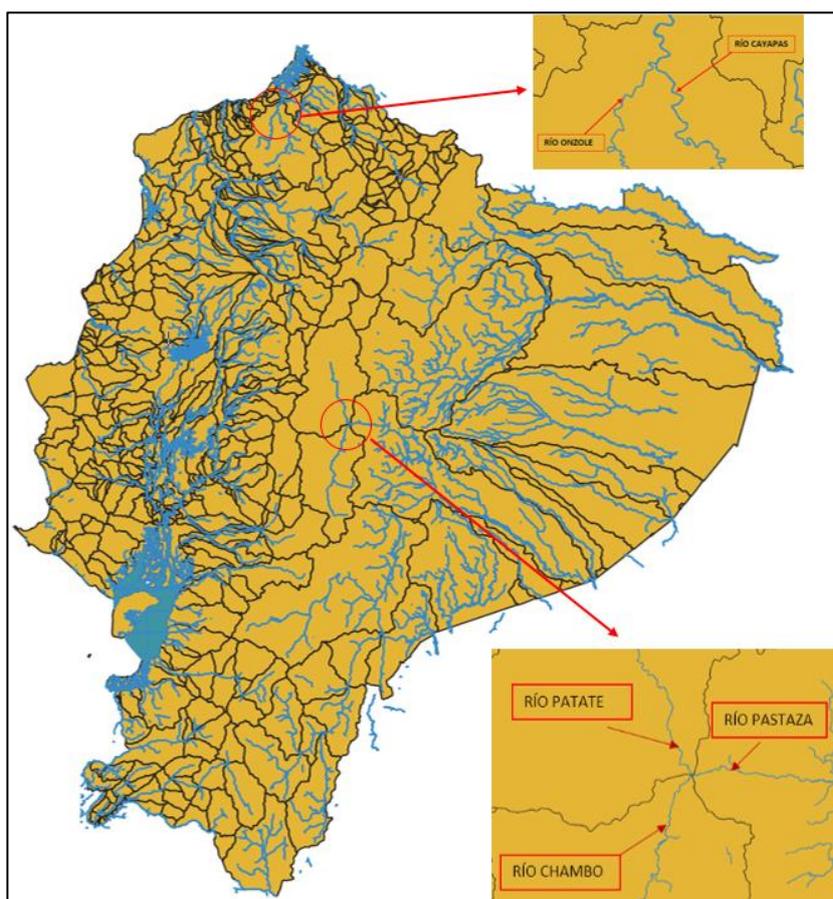


Figura 1. Cuencas de ríos a ser analizados.

Fuente: QGis.

Elaborado por: Autor.

4. EQUIPOS, INFORMACIÓN Y SOFTWARE

- Software QGIS
- Datos históricos de caudal (INAMHI/SENAGUA)
- Datos históricos de factores climáticos y cuencas de drenaje (INAMHI/SENAGUA)
- Programa Microsoft Excel con paquete de análisis de datos de regresión.

5. FUNDAMENTO TEÓRICO

5.1 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es el proceso por el cual el agua de lagos y océanos es reciclada por el planeta mismo. El agua presente en lagos y ríos es evaporada, condensada y transportada por las nubes, las cuales se mueven a través de la atmósfera en forma de patrones climáticos globales para posteriormente ser precipitada en forma de lluvia, granizo o nieve, la cual fluye hacia la corriente de los ríos y eventualmente, a los lagos y océanos. Este ciclo puede ser observado en las figuras 1 y 2.

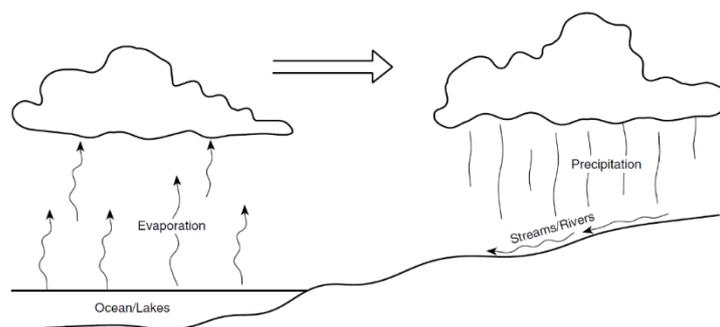


Figura 2. Diagrama del ciclo hidrológico.

Fuente: Gribbin, 2007, p.162.

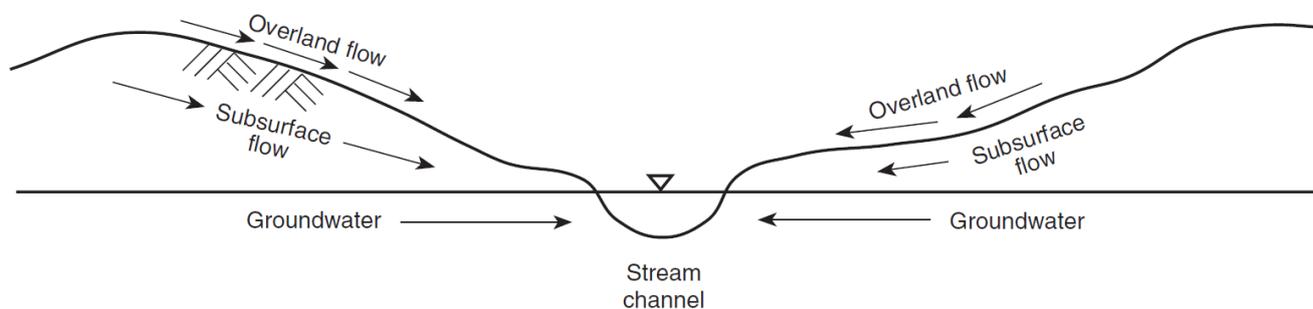


Figura 3. Sección mostrando las tres maneras que el agua llega a la corriente.

Fuente: Gribbin, 2007, p.162.

En cuanto a los factores influyentes para el aumento o la disminución del caudal, la lluvia es el principal. Si no existe precipitación, el caudal disminuirá, mientras que si la precipitación es alta, el caudal aumentará. El río originalmente posee un caudal o caudal base, el cual es totalmente independiente de la precipitación. Por otra parte, cuando se da una tormenta o un evento de precipitación, el caudal aumenta y este excedente es llamado escorrentía directa y es el utilizado para el diseño hidráulico (Gribbin, 2007, p.163). De esta manera, se puede hablar de un balance hídrico entre la precipitación con escorrentía, infiltración y evapotranspiración.

5.2 Precipitación

Debido a la variabilidad que la precipitación presenta, es muy complicado cuantificarla para propósitos de diseño, donde se busca controlar y/o aprovechar la escorrentía directa acumulada en los ríos. Por tal motivo, alrededor del mundo se ha procedido con la recolección de datos de precipitación por determinadas zonas. Estos datos son procesados estadísticamente y de esta manera es posible hablar de una precipitación típica o precipitación promedio (Hershfield, 1961). Cabe destacar que dos tormentas que tienen la misma cantidad de precipitación no son necesariamente iguales, ya que la duración de estas puede ser diferente y por lo tanto, su intensidad también lo será. Por esto, un evento de precipitación es aquel que posee la misma cantidad de precipitación, con igual intensidad (Gribbin, 2017). De esta manera, es posible expresar la intensidad de la lluvia en términos de la precipitación y la duración del evento de la siguiente manera:

Ecuación (1). Intensidad de precipitación

$$i = P/d$$

Donde:

i: Intensidad [mm/hr]

P: Precipitación [mm]

d: Duración del evento [hr]

A partir de estas definiciones podemos determinar la frecuencia del evento de precipitación. Esta frecuencia de dicho evento indica que tan repetitivo es. Por otra parte, la probabilidad de ocurrencia de un evento de precipitación específico es establecida por el periodo de retorno, el cual indica la relación existente entre el número de años promedio necesarios para que se dé un mismo evento de precipitación (Salas & Obeysekera, 2014).

5.3 Área de drenaje y Tiempo de Concentración

El área de drenaje es el área delimitada hidrográficamente en la cual el agua procedente de la precipitación aportará a la del caudal, transformándose en corriente y cumpliendo el ciclo hidrológico (Heras, 1972). Para el caso del Ecuador, estas áreas comprenden lo que INAMHI llama demarcaciones. Entre las demarcaciones del Ecuador se tiene las siguientes: Esmeraldas, Guayas, Jubones, Manabí, Mira, Napo, Pastaza, Puyango-Catamayo y Santiago. A su vez, cada una de estas demarcaciones se encuentra subdividida por sistemas hidrográficos clasificados por niveles, de donde se obtiene la información necesaria mediante las estaciones fluviométricas principalmente. Cabe destacar que para el caso del Ecuador, se encuentran disponibles niveles de cuencas. Estos niveles van desde el nivel 3, el cual comprende grandes áreas de drenaje, llamadas demarcaciones, hasta el nivel cinco, en el cual las cuencas de drenaje son delimitadas a un área mucho menor.

En cuanto al tiempo de concentración, Gribbin lo define como: “La cantidad de tiempo que le toma a la escorrentía directa fluir desde el punto más remoto hidráulicamente hasta el punto de análisis” (2007, p. 168). Se entiende por el punto más remoto hidráulicamente a aquel

punto más alejado geográficamente en la cuenca de drenaje, en la cual a una gota de agua le tomará la mayor cantidad de tiempo el salir de la cuenca. Es así que este punto es un lugar en la cuenca donde exista una gran cantidad de distancia horizontal hasta el punto de análisis, pero de igual manera que no posea una gran pendiente, ya que de esta forma la velocidad del caudal aumentará y la gota de agua llegará más rápido. El camino por el cual se llega del punto más remoto hidráulicamente hasta el punto de análisis es conocido como trayectoria hidráulica (Chow, Madment, and Mays, 1988). Esta trayectoria se encuentra dividida generalmente en tres zonas bien definidas, las cuales son de caudal superficial, caudal superficial concentrado y caudal de corriente.

5.4 Diagramas IDF e hidrogramas de escorrentía

Los diagramas de intensidad duración frecuencia (IDF) son una serie de curvas desarrolladas empíricamente basados en datos experimentales acerca de la precipitación, propios de cada zona (Ramirez, s.f). Estos diagramas relacionan la duración del evento de precipitación con el periodo de retorno (frecuencia) de dicho evento, para que de esta manera, se obtenga la intensidad (Jaramillo & Apolo, 2015). La ecuación general para el desarrollo de estas curvas viene dado por la siguiente expresión:

Ecuación (2). Intensidad de precipitación con periodo de retorno

$$I = \frac{K \times T^m}{t^n}$$

Donde:

I : Intensidad [mm/hr]

T : Periodo de retorno [años]

t : Duración del evento [min]

K, m, n : Parámetros de ajuste propios de cada zona.

Por otra parte, los hidrogramas de escorrentía son representaciones gráficas de la relación existente entre la escorrentía directa y el tiempo que transcurre en un evento de precipitación específico. Estos hidrogramas pueden ser presentados de tal manera que tan solo se tome en cuenta 1 [mm] o 1 [in] de precipitación, lo cual los convierte en hidrogramas unitarios y sirven a modo de matriz para otras precipitaciones mayores (Ponce, 2014). Tal como se mencionó en el balance hídrico, no toda la precipitación se convierte en escorrentía, sino que esta puede verse infiltrada, o evaporada, dejando como resultado tan solo la precipitación en exceso o también llamada precipitación efectiva; la cual genera la escorrentía directa. En la figura 4 se puede observar un diagrama de la precipitación total, en la que se muestra las pérdidas iniciales, pérdidas por infiltración y la precipitación efectiva. Por otra parte, la figura 5 se puede observar un modelo de un hidrograma de escorrentía unitario.

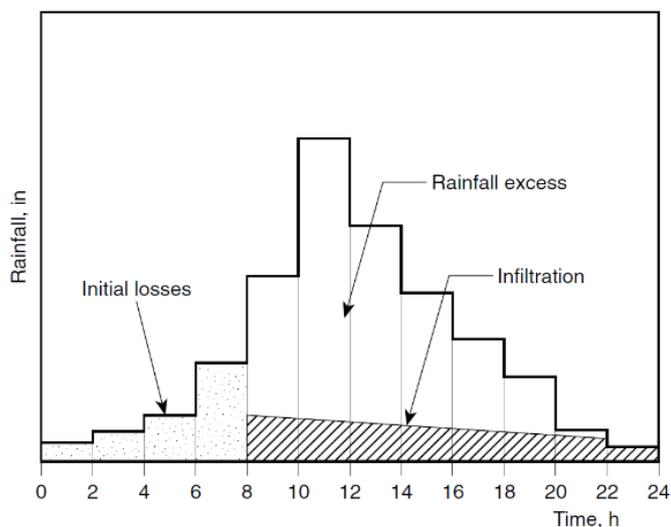


Figura 4. Relación entre la precipitación en exceso y sus pérdidas
Fuente: Gribbin, 2007, p.178.

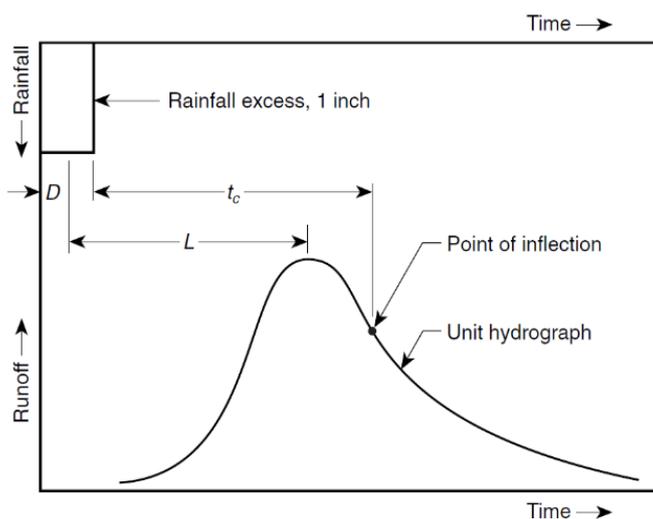


Figura 5. Elementos principales de un hidrograma unitario.
Fuente: Gribbin, 2007, p.179.

5.5 Escorrentía

El caudal o caudal volumétrico es la cantidad de volumen de un fluido que atraviesa una sección por unidad de tiempo (Mott, 2006). Típicamente, este caudal es medido en [m³/s] o en [ft³/s] (Gribbin, 2007, p. 46). En los ríos, este fluido es el agua y el caudal sirve principalmente para tener conocimiento de que tanto volumen de agua está presente en un río en un momento determinado. Para la determinación de la escorrentía se usan diversos métodos descritos anteriormente, en el cual el método que es utilizado comúnmente es el método racional, el cual toma como variables a la precipitación, el área de caudal y un coeficiente de escorrentía propio de cada suelo, el cual “representa la fracción de agua del total de lluvia precipitada que

realmente genera escorrentía superficial una vez se ha saturado el suelo por completo” (Ibáñez, Moreno, Gisbert, 2011). Su ecuación es la siguiente:

Ecuación (3). Caudal por método racional

$$Q = \frac{\zeta i A}{3,6 \times 10^6}$$

Donde:

Q : Caudal [m³/s]

A : Área de la cuenca hidrográfica analizada [m²]

i : Intensidad de precipitación [mm/hr]

ζ : Coeficiente de escorrentía [-]

5.5.1 Medición del caudal.

Con el pasar de los años y el avance tecnológico, se han desarrollado diversos métodos para determinar experimentalmente el caudal que atraviesa un río en un momento determinado. El método más utilizado para determinar el caudal a través de una tubería es mediante un Medidor de Venturi, el cual emplea la ecuación de Bernoulli (Gribbin, 2007, p.60). De igual manera, existen métodos para determinar el caudal en canales abiertos. Entre estos destaca el método del tubo pitot por su facilidad de uso. En este método, se busca medir la velocidad de caudal experimentalmente, ya sea a contracorriente o a favor de la corriente con la ayuda de un tubo en forma de L, en el cual se mide el aumento o disminución del agua debido a la carga de velocidad (Simon & Korom, 1997).

Por otra parte, para la medición del caudal en ríos, al necesitar una precisión más exacta y principalmente, que no se necesite personas midiendo el caudal del río en todo momento, se ha contemplado la utilización de estaciones hidrométricas automáticas, las cuales no necesitan de personal humano operando la estación en todo momento (Vera, 2001). Estas estaciones se encuentran en ubicaciones específicas en algunos de los principales ríos del Ecuador y a su vez, en las ramificaciones de estos ríos. En el Ecuador existen estaciones hidrológicas automáticas y estaciones convencionales, en las cuales destacan las estaciones limnimétricas y estaciones limnigráficas. En las estaciones limnimétricas se registra el caudal por medio de las lecturas periódicas de la elevación del agua, generalmente en dos mediciones, a las 7am y a las 7 pm, y en algunos casos, cada 3 horas en ese mismo horario (García, 2015). Por otra parte, en las estaciones limnigráficas existe un registro gráfico continuo de los niveles de agua. En el anexo 1 se puede observar un mapa de las estaciones hidrológicas existentes hasta el 2015. Este mapa es de autoría del Instituto Geográfico Mililar (IGM) y del Instituto Nacional de Metereología e Hidrología (INAMHI), en la cual se pueden observar que existen 32 estaciones limnigráficas, 105 estaciones limnimétricas y 39 estaciones automáticas. De igual manera, se entiende como caudal a la velocidad promedio del flujo del río con la que se desplaza a través de una sección transversal, es decir por un área. De esta manera, es posible expresar el caudal en términos de la velocidad y el área de caudal de la siguiente manera:

Ecuación (4). Medición de caudal

$$Q = Av$$

Donde:

Q : Caudal [m³/s]

A : Área transversal del río [m²]

v : Velocidad de caudal [m/s]

5.6 Ecuaciones de regresión

Las ecuaciones de regresión para la estimación del caudal en los ríos de una zona determinada son propias de cada región donde estas han sido desarrolladas. Para poder desarrollar ecuaciones de regresión, en primer lugar, se debe delimitar la zona de estudio (Ahearn, 2004). Esta zona debe poseer características similares en cuanto a la precipitación y demás factores influyentes, en la escorrentía directa. Se espera tener estas características similares ya que el objetivo con las ecuaciones de regresión es que estas posean una alta correlación entre estos factores y que, de igual manera, sean aplicables en toda la extensión de la zona de estudio.

Se debe tomar en cuenta que no existe un proceso preestablecido para el desarrollo de ecuaciones de regresión para estimar el caudal existente en los ríos de una zona. Por lo tanto, se utilizarán algunos de los parámetros y regulaciones utilizadas por investigaciones previas, para que así sea posible determinar la factibilidad de la aplicación de dichos parámetros para el desarrollo de ecuaciones de regresión propios de la zona. Para esto, son necesarios los reportes técnicos del desarrollo y aplicación de ecuaciones de regresión elaborados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) por sus siglas en inglés. A partir de esto, se puede observar que, para el desarrollo de dichas ecuaciones de regresión en diversas regiones de Estados Unidos, tal como es el caso de Colorado, Connecticut y Dakota del Norte se toman en cuenta eventos de precipitación con periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

En cuanto a la información requerida, para el desarrollo de ecuaciones de regresión para estimar el caudal en los ríos del estado de Colorado es necesaria la utilización del análisis de las características climáticas de sus respectivas cuencas de drenaje delimitadas para determinar el caudal pico de sus respectivos ríos. Así mismo, se debe elegir las estaciones hidrométricas a ser incluidas en el análisis de regresión lineal. En cuanto a los datos de caudal, se necesita al menos el caudal promedio diario de todas sus zonas hidrológicas de estudio, y que esta información posea al menos 10 años de continua toma de datos por medio de las estaciones hidrométricas (Capesius and Stephens, 2009). Finalmente, se requiere un análisis estadístico de las ecuaciones. De esta manera, se realiza un análisis de mínimos cuadrados generalizados, el cual utilizado para generar las ecuaciones de caudal pico y de caudales máximos y mínimos semanales, mientras que para las ecuaciones de regresión correspondientes a caudales promedio mensuales y anuales se utiliza un análisis de mínimos cuadrados ponderados. Por otra parte, para el estado de Dakota del Norte, la utilización de un análisis de mínimos cuadrados ordinarios es factible y aplicable para la determinación del caudal pico en los ríos que comprenden su zona (Williams-Sether, 2015).

5.6.1 Análisis del caso de Pennsylvania.

Al tomar en cuenta estudios realizados por la USGS en el estado de Pennsylvania en Estados Unidos, podemos darnos cuenta que las características que influyen en la predicción del caudal fueron variables que poseen un 95% de nivel de confianza en las ecuaciones. Es decir, estas variables independientes juegan un papel fundamental en la predicción del caudal de ríos en Pennsylvania y explican de forma precisa un aumento o disminución del caudal. Entre estas variables independientes destacan principalmente el área de drenaje, la pendiente de la cuenca, la precipitación media anual, el espesor de la capa de suelo, la densidad de corriente, la elevación promedio de la cuenca y de ser el caso, el porcentaje de glaciación y de existencia de rocas de carbonato. Este método de ecuaciones de regresión aplicando las fórmulas correspondientes con las variables independientes entrega errores estándares de predicción entre un 12 y un 38% para el caso del caudal medio anual.

En este caso, debido a la gran extensión del estado de Pennsylvania se utilizaron cerca de 293 estaciones hidrométricas. Como limitaciones podemos observar que este método utiliza información de la cuenca recogida por las estaciones hidrométricas, de tal manera que este caudal no se encuentre afectado por regulación, minería, etc. En cuanto al análisis de ecuaciones de regresión para la determinación del caudal en los ríos del Ecuador se tiene el método de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) y el método de mínimos cuadrados ponderados (WLS), ambos por sus siglas en inglés. En el caso de WLS, la ponderación adquiere la siguiente forma:

$$\frac{\text{Número de años de la estación operando} * (\text{número de estaciones})}{\text{suma de los años operando de todas las estaciones}}$$

De las 3 ecuaciones de regresión desarrolladas para la determinación del caudal en los ríos de Pennsylvania, las cuales son de caudal mínimo en periodos de sequía, caudal base y caudal medio anual, podemos observar que aquella que presenta mayor cantidad de variables independientes es la de caudal mínimo, mientras que la que presenta menos variables es la de caudal base. Estas ecuaciones son muy similares entre sí, variando tan la adición o sustracción de algunas de las variables independientes de su ecuación.

Para el caso de estudio del caudal medio diario se emplearon 195 estaciones hidrométricas para medir los parámetros influyentes en la predicción del caudal. En el caso de este estudio se utilizó el método de mínimos cuadrados ponderados (WLS). Pero a continuación se explica que para regresiones hidrológicas y para obtener la ecuación final de regresión, el mejor método es el de mínimos cuadrados generalizados (GLS) por sus siglas en inglés ya que este método es más preciso debido que toma en cuenta las diferencias en la longitud de registro, y variación de caudal entre las estaciones analizadas. Finalmente esta técnica de regresión fue incorporada a un paquete de software de USGS llamado GLSNET con el cual fue realizado este análisis.

En cuanto a las características de la cuenca que son influyentes como variables independientes en el análisis de regresión para este tipo de caudal se encuentran:

- Área de drenaje
- Elevación media
- Precipitación media anual
- Porcentaje de roca carbonatada
- Porcentaje de área forestada
- Porcentaje de área urbana

El modelo de la ecuación de regresión es la siguiente:

Ecuación (5). Ecuación de regresión del estado de Pennsylvania

$$\log Q_m = A + b \log DA + c \log El + d \log Ppt + e \log(1 + 0,01C) + f \log(1 + 0,01F) + g \log(1 + 0,01U)$$

O visto en forma potencial:

Ecuación (6). Ecuación de regresión del estado de Pennsylvania en forma potencial

$$Q_m = 10^A (DA)^b (El)^c (Ppt)^d (1 + 0,01C)^e (1 + 0,01U)^g$$

Donde:

Log: Logaritmo base 10

Q_m : Caudal medio [$\frac{ft^3}{s}$]

A: Intercepto

DA: Área de drenaje [*millas*²]

El: Elevación promedio [*ft*]

Ppt: Precipitación media anual [*in*]

C: Porcentaje de roca carbonatada en la cuenca [%]

F: Porcentaje de zona foresta [%]

U: Porcentaje de área urbana [%]

b, c, d, e, f, g: Coeficientes de regresión de las características de la cuenca

Finalmente, se analiza el intervalo de predicción del 90% de la siguiente manera:

Ecuación (7). Intervalo de predicción del 90%

$$10^{|q_0 - T|} \leq Q_T \leq 10^{q_0 + T}$$

Donde:

q_0 : Caudal medio predicho en unidades de logaritmo $\log\left[\frac{ft^3}{s}\right]$

T : Intervalo de predicción del 90%

Q_T : Caudal medio predicho en unidades de $\left[\frac{ft^3}{s}\right]$

Cabe destacar que los modelos de regresión son después evaluados en cuanto a su adecuación utilizando relaciones gráficas, pruebas de colinealidad, error estándar y el coeficiente de determinación R^2 . Para el caso de las ecuaciones de regresión en Pennsylvania, el error estándar para la determinación del caudal medio anual es del 12%, con un intervalo de predicción del 90% de 0,831.

5.6.2 Modelos de regresión en Estados Unidos.

Tabla 1. Modelos de regresión en distintas ubicaciones de Estados Unidos.

UBICACIÓN	FACTORES	ECUACIÓN/DESCRIPCIÓN
Pennsylvania	<ul style="list-style-type: none"> - Área de drenaje. - Elevación media. - Precipitación media anual. - Porcentaje de roca carbonatada. - Porcentaje de área forestada. - Porcentaje de área urbana. 	$Q_m = 10^A (DA)^b (El)^c (Ppt)^d (1 + 0,01C)^e (1 + 0,01F)^f (1 + 0,01U)^g$ <p> Q_m: Caudal medio $\left[\frac{ft^3}{s}\right]$. A: Intercepto. DA: Área de drenaje $[millas^2]$. El: Elevación promedio $[ft]$. Ppt: Precipitación media anual $[in]$. C: Porcentaje de roca carbonatada en la cuenca [%]. F: Porcentaje de zona foresta [%]. U: Porcentaje de área urbana [%] b, c, d, e, f, g: Coeficientes de regresión de las características de la cuenca. </p>
Arizona (Depende del periodo de retorno y del número de días de inundación)	<ul style="list-style-type: none"> - Área de drenaje. - Elevación media. - Precipitación media anual. 	$Q_m = 10^A (DA)^b (Ppt)^c (10)^{\left(\frac{-0,095 * El}{1000}\right)}$ <p> Q_m: Caudal medio $\left[\frac{ft^3}{s}\right]$. A: Intercepto. DA: Área de drenaje $[millas^2]$. El: Elevación promedio $[ft]$. Ppt: Precipitación media anual $[in]$. </p>

<p>New Hampshire</p> <p>(Por estaciones climáticas, depende de porcentaje de caudal mínimo)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Área de drenaje. - Pendiente promedia de terreno. - Elevación máxima. - Porcentaje de árboles coníferos en el área de drenaje. - Centroide de precipitación promedio en invierno. -Entre otros 	<p>Varias ecuaciones. Depende de la estación de año y del porcentaje.</p>
<p>Colorado</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Área de drenaje. - Elevación media. - Precipitación media anual. 	<p>Varias ecuaciones. Depende de periodo de retorno y del tipo de caudal solicitado (Qmin, Qpico, Qprom anual, Qprom mensual)</p>
<p>North Dakota</p> <p>(Qpico en lugares donde no hay estaciones)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Caudal pico (gaging station) - Área de drenaje (gaging station) - Área de drenaje (ungaged station) - Exponente regional del área de drenaje de la zona hidrológica estudiada 	$Q_{\%uw} = Q_{\%gw} \left(\frac{A_u}{A_g} \right)^b$
<p>Connecticut</p> <p>(Q inundación dependiendo del periodo de retorno)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Área de drenaje. - Elevación media. - Precipitación con un periodo de retorno x para una duración de 24 hrs 	$Q_m = 10^A (DA)^b (El)^c (Ppt_x)^d$

<p>Arizona, Utah, Colorado, New México</p> <p>(Q inundación dependiendo del periodo de retorno)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Área de drenaje. - Pendiente promedio de terreno. - Elevación promedio. 	<p>Varias ecuaciones. Depende de periodo de retorno.</p>
<p>Georgia</p> <p>(Low flow, mean flow unged)</p> <p>(Depende del periodo de retorno y el número de días de inundación)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Área de drenaje. - Precipitación media anual. - Elevación máxima. - Elevación mínima. - Relief Ratio (RR) 	$Q_m = 10^A (DA)^b (EL)^c (d)^{RR}$
<p>Idaho</p> <p>(Q prom mensual y anual unged)</p> <p>(Depende del periodo de retorno)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Área de drenaje. - Precipitación media anual. - Elevación media - Relief Ratio (RR) - Número de pendientes del terreno (>30%). - Pendiente promedio - Área forestada. - Pendiente del canal principal. 	$Q_m = 10^A (DA)^b (BS)^c (S30)^d (F)^e$

<p>Hawaii</p> <p>(Q low Q medio)</p>	<p>Modelos complejos debido a sus condiciones geográficas.</p>	<p>Varios modelos complejos. Dependen de las condiciones únicas del estado de Hawaii.</p>
<p>Florida</p>	<p>Modelos de 1983 ya no utilizados.</p>	<p>Modelos ya no utilizados.</p>

Fuente: USGS.

Elaborado por: Autor.

6. DESARROLLO

6.1 Datos históricos

Como primer paso para la determinación de ecuaciones de regresión, se necesita la obtención de datos históricos de las variables influyentes en el caudal presente en los ríos de Ecuador, especialmente del Río Pastaza. Para el caso se obtuvo información histórica proporcionada por INAMHI-SENAGUA, de las variables de precipitación promedio diaria, precipitación promedio mensual, temperatura, viento, humedad y heliofanía. Los primeros son los factores más influyentes para el aumento o disminución del caudal en la cuenca del Río Pastaza ya que de no existir datos de precipitación, no sería posible la regresión. Junto a estos, se obtuvieron los datos históricos de caudal promedio diario, así como caudal promedio mensual. Estos últimos actúan como variables dependientes, los cuales serán explicados por las ecuaciones de regresión a desarrollarse.

6.1.1 Depuración de la información.

Después de revisar la información obtenida, principalmente de precipitación y de caudal, se pudo observar que una gran cantidad de las 176 estaciones meteorológicas se encuentran en estado inactivo, mientras que otra gran parte de estas, cuentan con grandes vacíos en la toma de datos. Lo mismo ocurre con las estaciones hidrológicas, las cuales son las responsables de la medición del caudal, aunque si bien esto se da en menor medida.

Dentro de las estaciones hidrológicas y meteorológicas con una buena cantidad de datos, se identificaron algunas de las mejores estaciones en las regiones centrales de costa, sierra y oriente. Sin embargo no se encontraban una relación entre estaciones meteorológicas e hidrológicas en cuanto a los meses y años con datos completos. Esta es una de las principales razones por las cuales las condiciones que se presentan en las ecuaciones de regresión de varios

estados estudiados en Estados Unidos no se cumplen en Ecuador, especialmente al realizar el análisis para datos de precipitación anual. No se puede utilizar estos modelos extranjeros debido a la falta de estaciones meteorológicas de una misma cuenca de drenaje con una toma continua e ininterrumpida de datos. Así mismo, no es factible aplicar el modelo de recopilación y utilización de información para el desarrollo de las ecuaciones de regresión de otros estados con estaciones meteorológicas de múltiples cuencas, ya que en Ecuador no existe una gran cantidad de estaciones dentro de los niveles de cuencas a ser estudiados y peor aún, estas se encuentran con gran cantidad de vacíos.

6.2 Modelado con ecuaciones de otra región

A pesar de no cumplir con ciertos parámetros del desarrollo de las ecuaciones de otras regiones, tales como Estados Unidos, se intentó realizarlos con la información disponible en Ecuador, proporcionada por INAMHI. Para esto, se utilizaron los modelos de ecuaciones de regresión del estado de Georgia, proporcionados por USGS, los cuales tienen como parámetros de entrada Área de drenaje, precipitación media anual, elevación promedio, máxima, mínima y por ende el relief ratio.

Básicamente, los datos de precipitación media anual y elevación de las estaciones son obtenidos de la información recopilada. El área de drenaje es obtenida mediante el programa QGIS al ingresar los archivos correspondientes de niveles de cuenca. En cuanto a elevación promedio, al no tener datos topográficos de curvas de nivel, no es posible determinar con exactitud una elevación promedio de la cuenca, por lo cual para obtener este dato lo que se hace es un promedio simple entre la elevación máxima y la elevación mínima, correspondientes a las estaciones meteorológica/hidrológica, según corresponda. Finalmente, para obtener el relief ratio se emplea la siguiente ecuación:

Ecuación (8). Relief Ratio promedio

$$RR_{mean} = \frac{El_{prom} - El_{min}}{El_{max} - El_{min}}$$

Donde:

RR_{mean} : Relief Ratio promedio [-]

El_{prom} : Elevación promedio de la cuenca [m]

El_{max} : Elevación máxima de la cuenca [m]

El_{min} : Elevación mínima de la cuenca [m]

Para el caso de la implementación de este modelo, se realizó una comparación de los datos presentes en estaciones hidrométricas con estaciones meteorológicas, partiendo por el noroccidente ecuatoriano. De esta comparación se encontraron estaciones que se encontraban en estado activo y con las cuales se podría probar el modelo de ecuaciones de regresión del

estado de Georgia, a pesar de no cumplir con los 10 años de toma de datos continua. Para la implementación de estas ecuaciones se utilizaron datos de la cuenca del Río Cayapas en Esmeraldas, la cual puede ser observada en la siguiente figura:

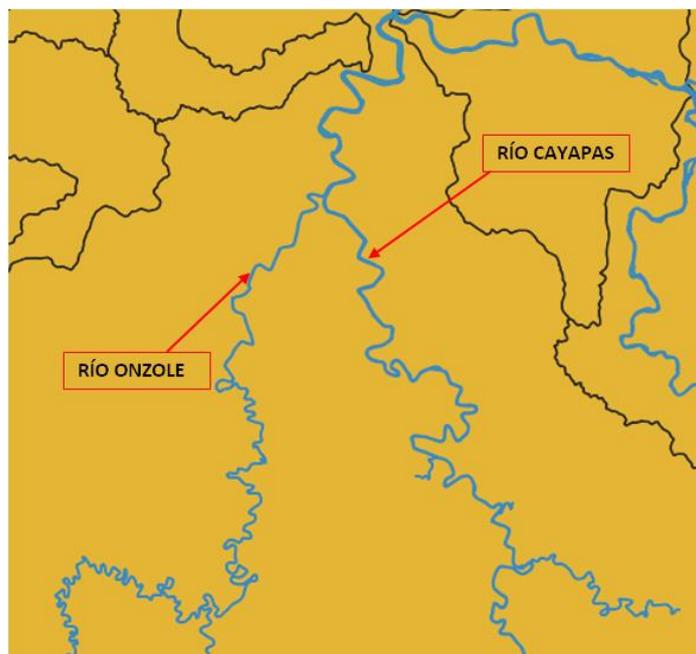


Figura 6. Confluencia de los ríos Onzole y Cayapas.

Fuente: Qgis.

Elaborado por: Autor.

Por otra parte, entre los datos necesarios para la implementación de las ecuaciones de Georgia tenemos:

Tabla 2. Datos de la cuenca de drenaje para el uso de ecuaciones de Georgia

DATOS DE CUENCA		
NIVEL DE CUENCA	ID DE CUENCA	AREA DE CUENCA [km2]
N5	436	2979,5

Fuente: INAMHI.

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. Datos de la estación hidrológica para el uso de ecuaciones de Georgia

DATOS DE ESTACIÓN HIDROLÓGICA					
TIPO DE ESTACION	ID DE ESTACION	NOMBRE	UBICACIÓN	ESTADO	ALTITUD [m]
Manual	H1140	Cayapas	Eloy Alfaro, Esmeraldas	Activa	14

Fuente: INAMHI.

Elaborado por: Autor.

Tabla 4. Datos de la estación meteorológica para el uso de ecuaciones de Georgia

DATOS DE ESTACIÓN METEREOLÓGICA					
TIPO DE ESTACION	ID DE ESTACION	NOMBRE	UBICACIÓN	ESTADO	ALTITUD [m]
Manual	M1022	Zapallo	Eloy Alfaro, Esmeraldas	Inactiva	508
TIPO DE ESTACION	ID DE ESTACION	NOMBRE	UBICACIÓN	ESTADO	ALTITUD [m]
Manual	M0154	Cayapas	Eloy Alfaro, Esmeraldas	Activa	55

Fuente: INAMHI.

Elaborado por: Autor.

Como se puede observar en la *tabla 4*, la estación M1022 es una estación inactiva y por lo tanto se utilizó la estación M0154 la cual si se encuentra en estado activo. Por otra parte, para el caso de la precipitación se tomaron los valores de los años 2011 al 2014 y los cuales fueron transformados a unidades de pulgadas, de tal manera que las unidades sean compatibles con las ingresadas en los modelos de ecuación de Georgia. Adicionalmente, para el promedio se utiliza el promedio excluyente el cual no toma en cuenta valores de cero (marcados en rojo) para realizarlo.

Tabla 5. Datos de precipitación para el uso de ecuaciones de Georgia

M0154 [in]					
MES/AÑO	2011	2012	2013	2014	PROM
ENERO	17,7	22,3	15,3	16,4	17,9
FEBRERO	6,8	21,2	7,4	13,8	12,3
MARZO	16,1	17,5	21,7	10,6	16,5
ABRIL	13,0	16,4	19,7	21,5	17,6
MAYO	5,6	22,1	15,7	18,9	15,6
JUNIO	10,5	16,9	0,0	8,9	12,1
JULIO	12,5	9,0	5,1	10,6	9,3
AGOSTO	4,6	2,7	8,0	9,6	6,2
SEPTIEMBRE	10,0	2,4	5,8	0,0	6,1
OCTUBRE	8,1	4,4	6,3	0,0	6,2
NOVIEMBRE	0,8	6,3	1,4	0,0	2,8
DICIEMBRE	4,9	3,7	10,4	0,0	6,3
PROMEDIO EXCLUYENTE	9,2	12,1	10,6	13,8	11,4

Fuente: INAMHI.

Elaborado por: Autor.

Tabla 6. Datos de altitud y área para el uso de ecuaciones de Georgia

ALTITUD E. HIDROLÓGICA [ft]	ALTITUD E. METEOROLÓGICA [ft]	ALTITUD PROM [ft]	RELIEF RATIO	AREA DE CUENCA [millas2]
46	180	113	0,5	1150,88

Fuente: INAMHI.

Elaborado por: Autor.

Se utilizan las ecuaciones de regresión de Georgia para caudal de sequía con 1 día de caudal promedio y 10 años de periodo de retorno (M1D10Y), 7 días de caudal promedio y 10 años de periodo de retorno (M7D10Y) y los correspondientes a cada uno de los meses del año, para obtener el caudal. Las ecuaciones utilizadas son presentadas en la siguiente tabla:

Tabla 7. Ecuaciones de regresión de Georgia

Statistic	Regression equation	SEE (percent)
M1D10Y	$(4.42 \times 10^{-16})(\text{DRNAREA})^{0.914}(\text{PRECIP})^{8.62}(2.12 \times 10^{-3})^{\text{RRMEAN}}$	91.6
M7D10Y	$(2.11 \times 10^{-15})(\text{DRNAREA})^{0.907}(\text{PRECIP})^{8.25}(3.11 \times 10^{-3})^{\text{RRMEAN}}$	86.4
M7D10Y01	$(1.60 \times 10^{-8})(\text{DRNAREA})^{0.936}(\text{PRECIP})^{4.42}(1.94 \times 10^{-1})^{\text{RRMEAN}}$	34.5
M7D10Y02	$(1.43 \times 10^{-7})(\text{DRNAREA})^{0.955}(\text{PRECIP})^{3.89}(3.54 \times 10^{-1})^{\text{RRMEAN}}$	26.6
M7D10Y03	$(2.09 \times 10^{-7})(\text{DRNAREA})^{0.974}(\text{PRECIP})^{3.83}(3.69 \times 10^{-1})^{\text{RRMEAN}}$	26.1
M7D10Y04	$(3.20 \times 10^{-8})(\text{DRNAREA})^{0.962}(\text{PRECIP})^{4.33}(1.77 \times 10^{-1})^{\text{RRMEAN}}$	32.8
M7D10Y05	$(1.01 \times 10^{-9})(\text{DRNAREA})^{0.920}(\text{PRECIP})^{5.21}(4.86 \times 10^{-2})^{\text{RRMEAN}}$	46.6
M7D10Y06	$(8.43 \times 10^{-11})(\text{DRNAREA})^{0.901}(\text{PRECIP})^{5.80}(2.01 \times 10^{-2})^{\text{RRMEAN}}$	60.0
M7D10Y07	$(1.69 \times 10^{-12})(\text{DRNAREA})^{0.912}(\text{PRECIP})^{6.70}(9.72 \times 10^{-3})^{\text{RRMEAN}}$	73.2
M7D10Y08	$(4.95 \times 10^{-14})(\text{DRNAREA})^{0.933}(\text{PRECIP})^{7.47}(7.79 \times 10^{-3})^{\text{RRMEAN}}$	87.9
M7D10Y09	$(2.37 \times 10^{-14})(\text{DRNAREA})^{0.938}(\text{PRECIP})^{7.63}(5.27 \times 10^{-3})^{\text{RRMEAN}}$	81.9
M7D10Y10	$(1.46 \times 10^{-13})(\text{DRNAREA})^{0.892}(\text{PRECIP})^{7.30}(3.08 \times 10^{-3})^{\text{RRMEAN}}$	83.0
M7D10Y11	$(5.12 \times 10^{-10})(\text{DRNAREA})^{0.790}(\text{PRECIP})^{5.48}(5.03 \times 10^{-3})^{\text{RRMEAN}}$	63.9
M7D10Y12	$(2.93 \times 10^{-9})(\text{DRNAREA})^{0.874}(\text{PRECIP})^{4.90}(4.45 \times 10^{-2})^{\text{RRMEAN}}$	49.4
QA	$(9.20 \times 10^{-6})(\text{DRNAREA})^{0.993}(\text{PRECIP})^{2.97}$	13.7

Fuente: USGS Georgia, 2017.

Fuente: USGS.

Con lo cual al aplicar las ecuaciones correspondientes, obtenemos los siguientes valores de caudal, siendo promedio excluyente el promedio de los valores de todos los meses del año sin considerar los valores donde no hay información, es decir, los ceros. Por otra parte, el promedio de regresión es la aplicación de la última ecuación de la tabla 7 llamada QA.

Tabla 8. Valores de caudal para la estación H1140 aplicando las ecuaciones de regresión de Georgia

GEORGIA LOW 7D 10Y [ft3/s]					
MES/AÑO	2011	2012	2013	2014	PROM
ENERO	1,677	4,746	0,900	1,222	2,136
FEBRERO	0,124	10,377	0,170	1,914	3,146
MARZO	5,085	6,965	16,089	1,032	7,293
ABRIL	0,787	2,135	4,804	6,922	3,662
MAYO	0,001	1,483	0,252	0,652	0,597
JUNIO	0,006	0,091	0,000	0,002	0,033
JULIO	0,002	0,000	0,000	0,001	0,001
AGOSTO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SEPTIEMBRE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
OCTUBRE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
NOVIEMBRE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
DICIEMBRE	0,001	0,000	0,028	0,000	0,010
PROMEDIO EXCLUYENTE	0,640	2,150	2,022	1,468	1,570
PROMEDIO REGRESION	7,357	16,475	11,264	24,438	13,972

Fuente: Autor.

Como podemos observar, los valores de caudal calculados con las ecuaciones de Georgia son sumamente pequeñas, en algunos casos adquiriendo valores cercanos a cero. Estos valores son comparados con los valores de caudal obtenidos de la información del INAMHI y presentados en la tabla 9.

Tabla 9. Valores de caudal de datos históricos para la estación H1140.

H1140 [ft3/s]					
MES/AÑO	2011	2012	2013	2014	PROM
ENERO	34236,19	37517,31	33963,95	40332,77	36512,56
FEBRERO	30855,45	38952,47	35617,84	35115,77	35135,38
MARZO	37021,25	39043,68	39579,62	37198,28	38210,71
ABRIL	40749,38	33724,87	40288,38	38388,63	38287,82
MAYO	31708,30	38019,77	32617,40	40710,04	35763,88
JUNIO	28768,39	0,00	30113,03	32667,06	30516,16
JULIO	34336,59	29564,17	28546,50	25360,91	29452,04
AGOSTO	31331,45	28425,66	28918,23	33637,33	30578,17
SEPTIEMBRE	35981,30	28267,34	31128,50	0,00	31792,38
OCTUBRE	31317,08	28943,62	30226,53	30853,29	30335,13
NOVIEMBRE	25873,11	28962,16	29423,16	28990,55	28312,25
DICIEMBRE	29192,94	30116,35	27714,88	31639,47	29665,91
PROMEDIO EXCLUYENTE	32614,29	32867,04	32344,84	34081,28	32976,86

Fuente: INAMHI.

Elaborado por: Autor.

Al obtener los valores de la tabla 8 y 9, de la aplicación de ecuaciones del estado de Georgia y de los datos históricos, correspondientemente, podemos observar que los caudales son sumamente diferentes, a tal punto que se encuentran en órdenes de magnitud diferentes. Por lo tanto, podemos afirmar que la aplicación del modelo de ecuaciones de regresión del estado de Georgia no es reproducible o aplicable para el Ecuador, especialmente por la falta de datos que se presentan, además de la variación de condiciones geográficas e hidrológicas en ambas regiones.

En la siguiente figura se presenta la validación de la ecuación de regresión con el modelo de Georgia, en la cual comparamos el caudal real medido por las estaciones (x) vs el caudal calculado utilizando la regresión (y).

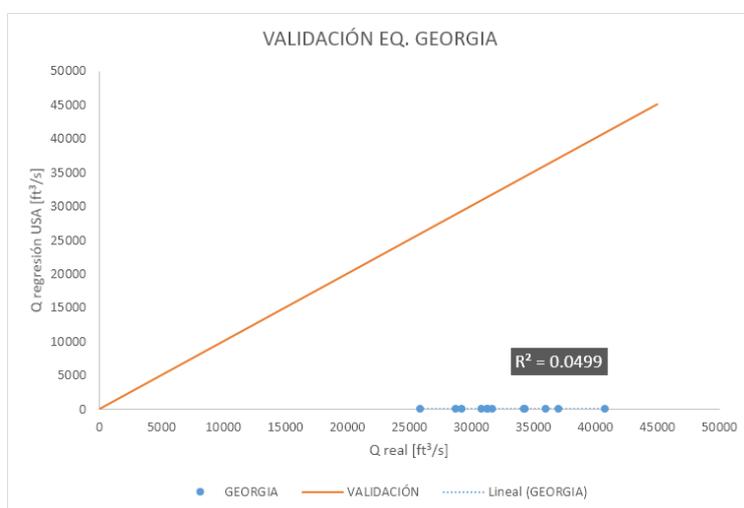


Figura 7. Validación de la ecuación de regresión de Georgia.

Fuente: Autor.

6.3 Desarrollo de ecuaciones de regresión

6.3.1 Análisis de regresión lineal con datos de precipitación anuales.

6.3.1.1 Selección de la cuenca hidrográfica.

Después de un análisis de las estaciones que cumplen con requisitos de más de 10 años de toma de datos y con poca cantidad de vacíos en su información (al menos 8 meses del año con toma de datos), se decidió que una de las mejores estaciones para el análisis de esta investigación se encuentra en la cuenca del Río Pastaza, el cual es resultado de la confluencia

del Río Chambo con el Río Patate. A continuación, en el desarrollo de este trabajo, se identificará a la cuenca del Río Patate como “TOP”, mientras que la cuenca del Río Chambo será identificada como “BOTTOM”. El inicio de este río se encuentra en la provincia de Tungurahua, al pie del volcán del mismo nombre, muy cerca de la ciudad de Baños de Agua Santa (Yépez, 2015). La cuenca del Río Pastaza es la tercera más importante del Ecuador, la cual posee un área total de 32182.34 km² y una descarga promedio de aproximadamente 2050 m³ por segundo (SENAGUA, 2011).

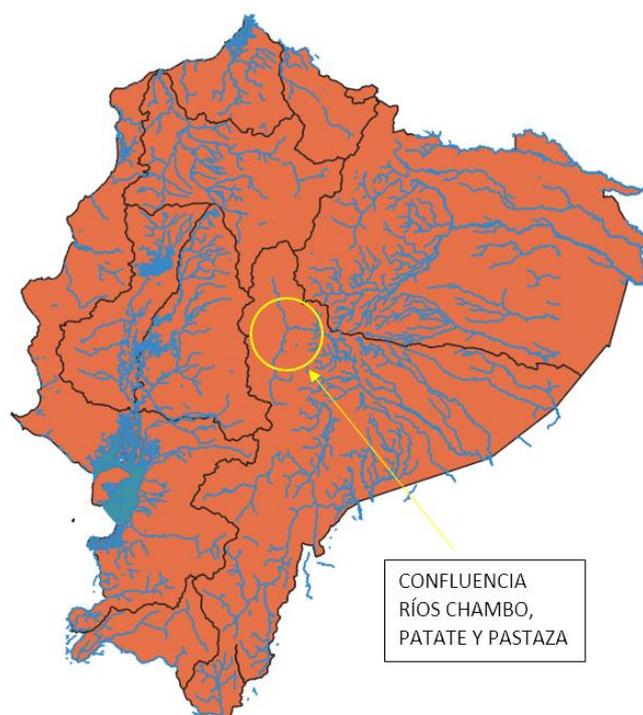


Figura 8. Ubicación de la confluencia en el nivel de cuenca 3.

Fuente: QGis.

Elaborado por: Autor.

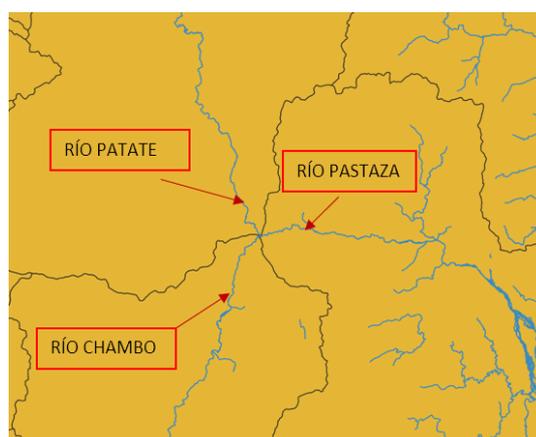


Figura 9. Identificación de los ríos en el nivel de cuenca 5.

Fuente: QGis.

Elaborado por: Autor

6.3.1.2 Selección de estaciones hidrológicas.

Para la selección de estaciones hidrológicas se tomaron en cuenta aquellas cercanas al cierre de cuenca, así como aquellas con una buena cantidad de años de toma de datos ininterrumpida (10 años, máximo 4 vacíos en un año). Finalmente, fueron tres de estas las elegidas para ser en conjunto con estaciones meteorológicas las opciones para el desarrollo de ecuaciones de regresión. Las estaciones elegidas fueron:

- H0826 CHAMBO EN HDA.CAHUAJI (1978-1998)
- H0788 PUELA AJ CHAMBO (1965-2015)
- H0800 PASTAZA EN BAÑOS (1962-2014)

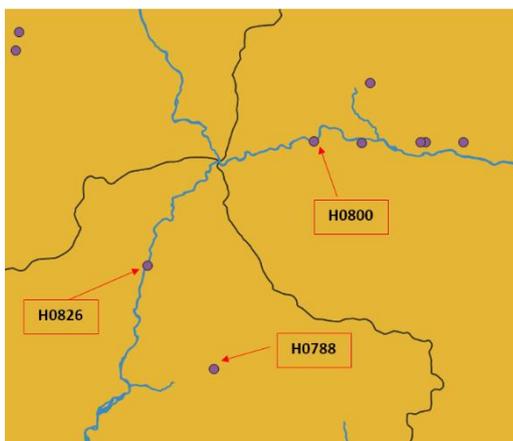


Figura 10. Estaciones hidrológicas analizadas.

Fuente: QGis.

Elaborado por: Autor.

6.3.1.3 Selección de estaciones meteorológicas.

Para la selección de estaciones meteorológicas se tomaron en cuenta aquellas cercanas al cierre de cuenca y cercanas a las estaciones hidrológicas analizadas, así como aquellas con una buena cantidad de años de toma de datos ininterrumpida (10 años, máximo 4 vacíos en un año). Finalmente, se eligieron las siguientes estaciones meteorológicas:

- M0029 PASTAZA EN BAÑOS (1962-2014)
- M0378 RIO VERDE (1951-2016)
- M0900 PUENTE LAS JUNTAS (1975-1987)
- M0133 GUASLAN (1963-2015)
- M0400 PENIPE (1964-1985)
- M0243 PUNGALLES (1984-2001)
- M0408 GUANO (1979-2016)
- M0057 RIOBAMBA AEROPUERTO (1934-1998)

Posteriormente, debido a los resultados obtenidos y la correlación entre estaciones hidrológicas-meteorológicas, se procedió a incluir en el análisis a las siguientes estaciones meteorológicas:

- M0380 GUAMBALO (1964-2016)
- M0381 PELILEO TNQ. AGUA POTABLE (1975-1988)
- M0382 QUERO (1975-1990)
- M0128 PEDRO FERMIN CEVALLOS (1978-2015)
- M0127 PILLARO (1931-2014)
- M0066 AMBATO AEROPUERTO (1965-1998)

6.3.1.4 Análisis de regresión lineal simple anual

Para el análisis de regresión lineal simple anual, fue necesario evaluar cada una de las estaciones hidrológicas con las estaciones meteorológicas, siendo los datos de estas últimas las que actúan como variable independiente y explican los datos obtenidos por las estaciones hidrológicas, es decir, el caudal como variable dependiente. Para esto, fue necesario el descarte de aquellos años con más de 4 vacíos en cuanto a la información que presentan en un año, sean estas de precipitación o de caudal. De esta manera, se procede a realizar un promedio excluyente el cual no toma en cuenta los vacíos en las bases de datos, un conteo de ceros o vacíos en la base de datos y los valores máximos y mínimos tanto de caudal como de precipitación. A continuación se presenta el análisis de regresión lineal simple entre las estaciones H0800-M0400. En este análisis se puede observar que ninguno de sus años contempla más de 4 meses sin toma de datos, sin embargo en los años 1979 y 1981 la suma de vacíos entre los meses de ambas estaciones dan como resultado 6 y 5 respectivamente, por lo cual estos años son candidatos a ser excluidos del análisis de regresión. Si se hubiesen descartado estos dos años, el coeficiente de determinación r^2 hubiese aumentado, sin embargo para este análisis de regresión lineal simple se decidió incluir estos años.

Tabla 10. Valores de caudal [m^3/s] de datos históricos para la estación H0800 (1965-1984).

	1965	1966	1967		1979	1980	1981	1982	1983	1984
ENERO	51,202	108,08	146,14		0	46,147	0	0	102,11	0
FEBRERO	53,285	97,927	79,768		0	0	0	0	98,377	72,543
MARZO	62,506	167,74	71,505		0	94,076	72,308	0	114,96	70,635
ABRIL	87,868	141,21	58,474		0	103,95	73,292	82,939	154,66	98,825
MAYO	151,9	92,733	68,033		91,51	93,548	64,056	94,426	185,37	102,44
JUNIO	239,71	89,635	172,49		93,78	130,35	85,471	80,576	86,143	137,92
JULIO	176,05	140,81	241,08		85,2	113,97	121,93	108,57	81,716	115,63
AGOSTO	123,36	123,57	189,94		98,76	87,192	55,517	120,64	78,195	77,262
SEPTIEMBRE	115,37	94,047	109,33		80,92	89,437	63,045	76,854	91,218	87,156
OCTUBRE	94,739	84,312	116,81		69,22	96,83	45,326	75,228	92,539	69,821
NOVIEMBRE	147,8	49,396	81,364		51,49	65,139	49,297	82,085	39,368	48,316
DICIEMBRE	77,463	76,629	58,058		56,73	50,867	0	107,14	50,1	53,795

PROMEDIO EXCLUYENTE [m3/s]	115,105	105,507	116,082		78,451	88,319	70,027	92,051	97,896	84,940
CONTEO DE CEROS	0	0	0		4	1	3	3	0	1
MAXIMO	239,711	167,735	241,075		98,757	130,345	121,927	120,638	185,369	137,921
MINIMO	51,202	49,396	58,058		51,494	46,147	45,326	75,228	39,368	48,316

Fuente: Autor

Tabla 11. Valores de precipitación [mm] de datos históricos para la estación M0400 (1965-1984)

	1965	1966	1967		1979	1980	1981	1982	1983	1984
ENERO	26,5	20,4	40,7		0	20,4	7,3	17,4	20,4	7,3
FEBRERO	10,7	32,3	21,1		16	54,6	21,3	0,7	54,6	21,3
MARZO	55,8	64,5	45,3		0	34,9	31,7	3,3	34,9	31,7
ABRIL	79	43	43,1		141,5	24,5	30	11,6	24,5	30
MAYO	57,7	41,3	23,9		49,2	29,7	41,6	26,2	29,7	41,6
JUNIO	36,8	49,7	86,2		28,7	32,3	307,2	15,7	32,3	307,2
JULIO	49,4	53,7	70		4,7	21,5	0	61,7	21,5	0
AGOSTO	46,1	37,2	59,6		21,5	37,3	0	2,3	37,3	0
SEPTIEMBRE	29,3	37,6	37,8		28,3	17,3	0,9	1,4	17,3	0,9
OCTUBRE	94,7	44,1	95,3		5,1	75	26,2	0,1	75	26,2
NOVIEMBRE	85,8	40	34,4		42,8	36,1	20,2	0,4	36,1	20,2
DICIEMBRE	32,2	101,7	29		25	11,5	15,5	45,6	11,5	15,5
PROM EXCLUYENTE [mm]	50,333	47,125	48,867		36,280	32,925	50,190	15,533	32,925	50,190
CEROS	0	0	0		2	0	2	0	0	2
MAXIMO	94,700	101,700	95,300		141,500	75,000	307,200	61,700	75,000	307,200
MINIMO	10,700	20,400	21,100		4,700	11,500	0,900	0,100	11,500	0,900

Fuente: Autor

Tal como se puede observar, debido a la extensión de las tablas, para la ilustración de estas se decidió cortar los valores correspondientes a los años 1968-1978, sin embargo el procedimiento es el mismo para todos los años. Finalmente, se realizó un análisis de regresión lineal mediante el software Excel para los valores de promedio excluyente, máximos y mínimos, obteniendo los siguientes resultados:

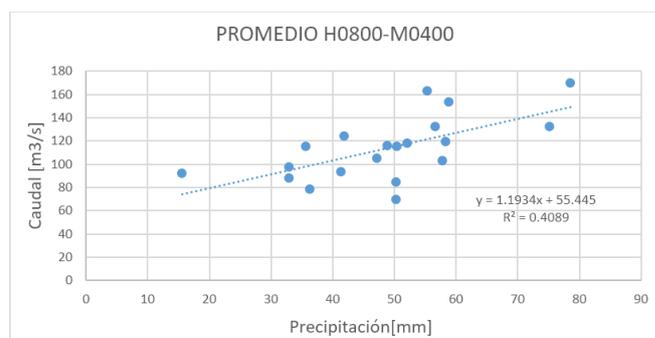


Figura 11. Regresión lineal simple de promedios anuales entre las estaciones H0800-M0400.

Fuente: Autor.

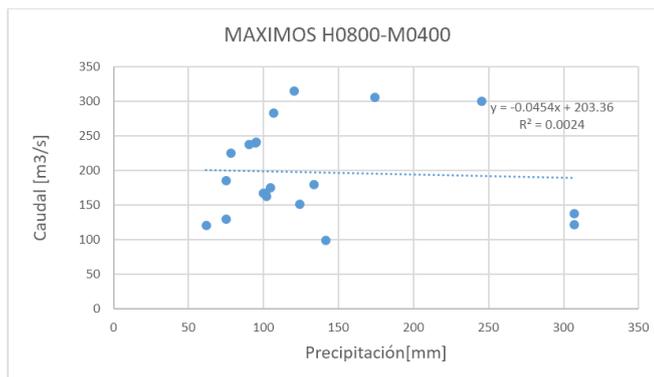


Figura 12. Regresión lineal simple de máximos anuales entre las estaciones H0800-M0400.

Fuente: Autor.

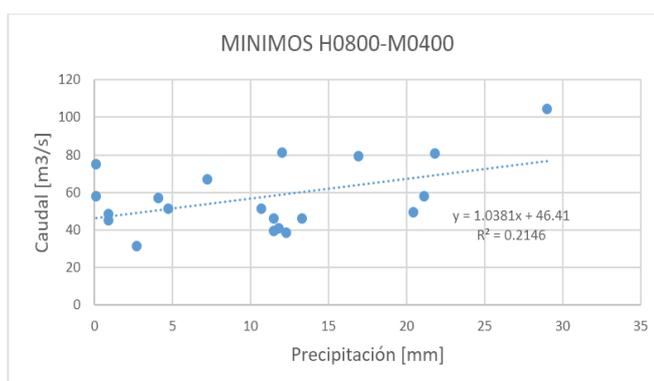


Figura 13. Regresión lineal simple de mínimos anuales entre las estaciones H0800-M0400.

Fuente: Autor

De estas gráficas podemos observar que la mayor correlación existente se encuentra en los valores promedios, seguidos de mínimos y finalmente máximos, sin embargo estos valores de coeficiente de determinación R cuadrado aún son muy bajos, siendo estos de aproximadamente el 40%.

Este mismo procedimiento se lo realizó con las demás estaciones y de esta manera se observó que los mejores resultados los obtuvieron las regresiones compuestas por las estaciones:

- H0800-M0400
- H0800-M0133
- H0800-M0380
- H0800-M0382

Se puede observar que en todos los casos, los mejores resultados fueron obtenidos con la estación hidrológica H800, lo cual tiene sentido ya que esta se encuentra aguas debajo de la confluencia de los ríos Chambo y Patate por lo cual esta es la responsable de medir el caudal producto de la precipitación que se da aguas arriba, la cual es medida por las estaciones meteorológicas descritas anteriormente.

En la siguiente figura se presenta la validación de la ecuación de regresión con el modelo de regresión lineal simple para caudal promedio, en la cual comparamos el caudal real medido por las estaciones (x) vs el caudal calculado utilizando la regresión (y).

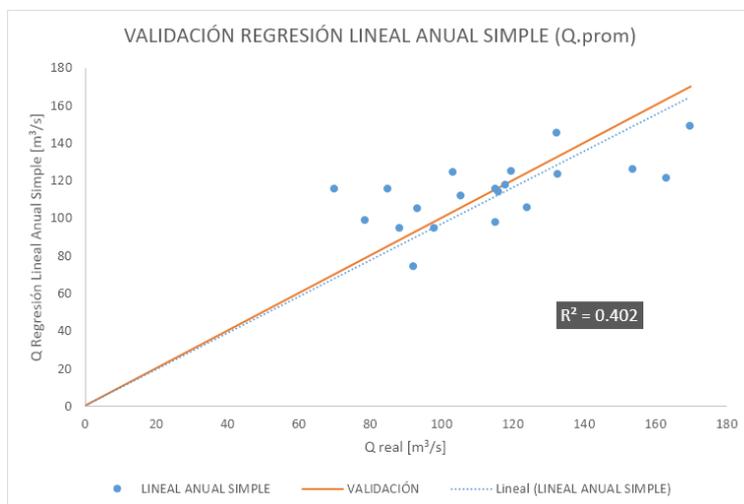


Figura 14. Validación de la ecuación de regresión lineal anual simple para Q_{prom}

Fuente: Autor.

A continuación, se presenta en la siguiente figura la ubicación de la estación hidrológica y las cuatro estaciones meteorológicas con los mejores resultados:

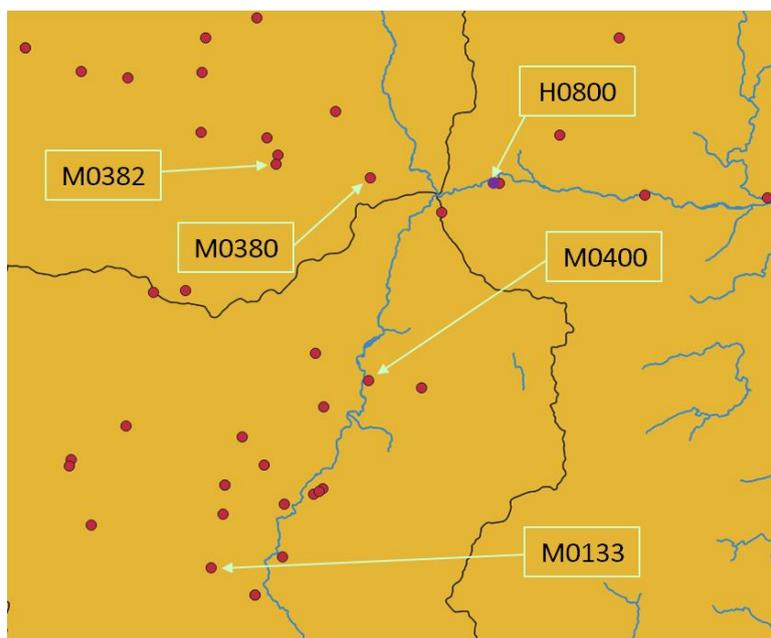


Figura 15. Ubicación de las estaciones hidrológicas y meteorológicas a ser analizadas mediante ecuaciones de regresión lineal múltiple

Fuente: QGIS.

Elaborado por: Autor.

6.3.1.5 Análisis de regresión lineal múltiple anual.

Con los resultados obtenidos de la regresión lineal simple, se realizó regresión lineal múltiple la cual toma como variables independientes a las precipitaciones promedio anuales de dos estaciones meteorológicas y como variable dependiente al caudal registrado por la estación hidrológica. Para el caso de análisis, se realizó la regresión con la estación hidrológica H0800 y las meteorológicas M0380 y M0382, ambas pertenecientes a las cuencas del río Patate. Para el análisis múltiple se decidió no excluir ningún dato de la serie desde 1976 hasta 1990. Los datos registrados para este análisis son los siguientes:

Tabla 12. Valores de caudal medio mensual [m³/s] de datos históricos para la estación H0800 (1976-1990).

	1976	1977	1978	1979	1980	...	1985	1986	1987	1988	1989	1990
ENERO	135,7	57,1	65,6	0,0	46,1	...	61,6	65,0	93,4	92,3	169,0	106,6
FEBRERO	99,2	127,9	107,1	0,0	0,0	...	103,0	49,4	255,6	141,2	139,4	147,6
MARZO	92,8	150,1	148,8	0,0	94,1	...	91,0	96,2	165,5	159,3	216,5	400,5
ABRIL	143,3	149,7	180,2	0,0	104,0	...	75,1	146,1	245,2	220,2	126,7	0,0
MAYO	246,8	102,2	138,3	91,5	93,5	...	188,0	138,2	278,2	230,1	288,3	289,5
JUNIO	314,7	162,4	179,3	93,8	130,3	...	222,2	185,7	174,3	145,3	478,3	492,5
JULIO	304,2	145,1	157,8	85,2	114,0	...	211,9	282,2	180,9	264,4	543,6	280,2
AGOSTO	214,9	122,3	154,3	98,8	87,2	...	225,0	129,0	147,7	141,6	179,8	175,0
SEPTIEMBRE	133,5	127,7	0,0	80,9	89,4	...	128,1	165,1	138,3	108,9	0,0	365,0
OCTUBRE	81,2	104,9	116,3	69,2	96,8	...	124,9	123,4	134,3	144,6	0,0	805,7
NOVIEMBRE	109,8	62,9	59,7	51,5	65,1	...	72,3	131,2	22,0	177,7	0,0	288,4
DICIEMBRE	82,5	70,6	58,2	56,7	50,9	...	55,2	152,1	52,8	85,6	84,0	117,2
PROMEDIO EXCLUYENTE [m³/s]	163,2	115,3	124,1	78,5	88,3	...	129,9	138,6	157,3	159,3	247,3	315,3
CONTEO DE CEROS	0	0	1	4	1	...	0	0	0	0	3	1
MAXIMO	314,7	162,4	180,2	98,8	130,3	...	225,0	282,2	278,2	264,4	543,6	805,7
MINIMO	81,2	57,1	58,2	51,5	46,1	...	55,2	49,4	22,0	85,6	84,0	106,6

Fuente: Autor.

Tabla 13. Valores de precipitación media mensual [mm] de datos históricos para la estación M0382 (1976-1990).

	1976	1977	1978	1979	1980	...	1985	1986	1987	1988	1989	1990
ENERO	42,8	9,9	23,8	25,8	23,2	...	13,6	9,2	24,5	24,2	88,2	3,6
FEBRERO	50,7	48,2	96,2	26,8	57,9	...	12,2	27,0	95,4	95,6	0,0	25,3
MARZO	48,5	101,0	87,2	72,8	29,6	...	41,6	90,2	66,2	38,0	69,3	27,5
ABRIL	59,8	63,1	94,7	106,7	88,4	...	33,2	45,8	123,7	56,9	32,8	557,8
MAYO	76,7	24,4	44,4	54,9	40,2	...	138,7	57,8	49,8	73,1	105,1	454,8
JUNIO	91,5	118,5	97,5	41,5	28,5	...	35,6	55,7	38,0	54,0	0,0	60,9
JULIO	85,4	41,0	25,3	20,8	36,4	...	46,2	0,0	46,7	70,0	230,7	0,0
AGOSTO	64,8	91,2	47,4	57,8	26,6	...	26,7	17,3	58,0	53,8	7,4	0,0
SEPTIEMBRE	23,8	104,0	60,3	53,9	36,0	...	55,3	52,2	33,3	50,2	58,4	0,0
OCTUBRE	32,6	40,2	2,7	31,3	67,7	...	27,1	35,5	52,3	151,7	57,0	0,0
NOVIEMBRE	46,2	44,1	5,9	51,7	35,7	...	15,3	32,5	19,5	85,5	12,1	0,0
DICIEMBRE	39,1	23,2	17,0	31,9	11,8	...	33,4	35,5	0,0	53,0	0,0	0,0
PROMEDIO EXCLUYENTE	55,2	59,1	50,2	48,0	40,2	...	39,9	41,7	55,2	67,2	73,4	188,3
CONTEO DE CEROS	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	...	0,0	1,0	1,0	0,0	3,0	6,0
MAXIMO	91,5	118,5	97,5	106,7	88,4	...	138,7	90,2	123,7	151,7	230,7	557,8
MINIMO	23,8	9,9	2,7	20,8	11,8	...	12,2	9,2	19,5	24,2	7,4	3,6

Fuente: Autor.

Tabla 14. Valores de precipitación media mensual [mm] de datos históricos para la estación M0380 (1976-1990).

	1976	1977	1978	1979	1980	...	1985	1986	1987	1988	1989	1990
ENERO	46,2	13,3	43,8	33,8	23,4	...	14,0	27,9	77,0	24,2	20,0	224,7
FEBRERO	35,3	103,5	90,5	15,0	20,0	...	19,0	5,0	41,5	0,0	32,0	15,0
MARZO	66,2	69,3	121,1	80,8	50,2	...	18,0	30,6	15,0	50,0	143,6	104,2
ABRIL	93,7	94,5	116,4	89,5	92,5	...	50,5	45,8	31,0	23,0	185,6	55,3
MAYO	96,8	60,0	64,6	51,0	69,5	...	260,0	9,0	6,0	31,0	154,7	49,7
JUNIO	148,7	157,6	149,7	43,7	80,0	...	103,7	213,5	50,0	17,5	999,4	144,6
JULIO	139,0	63,7	68,1	44,3	69,1	...	176,0	62,2	32,0	37,0	949,1	7,3
AGOSTO	83,1	125,6	69,2	74,7	70,4	...	47,4	31,5	22,9	56,0	425,0	288,1
SEPTIEMBRE	41,9	108,7	69,7	91,4	41,8	...	50,4	26,0	26,0	40,3	360,8	20,6
OCTUBRE	129,8	57,6	8,1	32,5	87,8	...	29,5	16,0	39,0	36,5	158,8	16,6
NOVIEMBRE	49,4	71,3	2,8	62,1	73,8	...	26,1	30,0	0,0	38,0	13,0	128,1
DICIEMBRE	25,2	25,8	16,5	34,4	8,5	...	49,3	23,5	18,0	21,0	0,0	47,8
PROMEDIO EXCLUYENTE	79,6	79,2	68,4	54,4	57,3	...	70,3	43,4	32,6	34,0	312,9	91,8
CONTEO DE CEROS	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	...	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0
MAXIMO	148,7	157,6	149,7	91,4	92,5	...	260,0	213,5	77,0	56,0	999,4	288,1
MINIMO	25,2	13,3	2,8	15,0	8,5	...	14,0	5,0	6,0	17,5	13,0	7,3

Fuente: Autor.

Con estos datos, se procede a realizar el análisis de regresión lineal múltiple mediante el software Excel y su función de análisis de datos estadísticos, estableciendo un nivel de confianza del 95%. Con esta función se obtienen los resultados de ecuaciones de regresión tanto para caudal promedio excluyente como para caudales máximos y caudales mínimos. Cabe destacar que las celdas resaltadas en celeste son aquellas de mayor aporte a los resultados del análisis estadístico como lo son el coeficiente de determinación R cuadrado ajustado (debido a la regresión lineal múltiple anual), el intercepto de la ecuación y los coeficientes correspondientes a las variables independientes. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 15. Resultados del análisis estadístico para caudales promedio anuales.

	PROMEDIO
Coeficiente de correlación múltiple	0,9217213
Coeficiente de determinación R²	0,849570155
R² ajustado	0,824498515
Error típico	28,05364374
Observaciones	15

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	53336,5649	26668,2824	33,8857023	1,16E-05
Residuos	12	9444,08313	787,006927		
Total	14	62780,648			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	28,9525	15,1906	1,9059	0,0809	-4,1451	62,0500	-4,1451	62,0500
Variable X 1	1,4024	0,2027	6,9194	0,0000	0,9608	1,8441	0,9608	1,8441
Variable X 2	0,3331	0,1148	2,9024	0,0133	0,0830	0,5832	0,0830	0,5832

Fuente: Autor.

Tabla 16. Resultados del análisis estadístico para caudales máximos (picos) anuales.

	MÁXIMO
Coefficiente de correlación múltiple	0,933166572
Coefficiente de determinación R²	0,870799851
R² ajustado	0,849266493
Error típico	73,42913918
Observaciones	15

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	436087,313	218043,657	40,439575	4,65E-06
Residuos	12	64702,0618	5391,83848		
Total	14	500789,375			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	28,7639	31,8366	0,9035	0,3840	-40,6020	98,1298	-40,6020	98,1298
Variable X 1	1,2411	0,1714	7,2397	0,0000	0,8676	1,6146	0,8676	1,6146
Variable X 2	0,2248	0,0916	2,4547	0,0303	0,0253	0,4244	0,0253	0,4244

Fuente: Autor.

Tabla 17. Resultados del análisis estadístico para caudales mínimos (sequías) anuales.

	MÍNIMO
Coefficiente de correlación múltiple	0,525384249
Coefficiente de determinación R²	0,27602861
R² ajustado	0,155366711
Error típico	20,12474737
Observaciones	15

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	1852,99742	926,498709	2,28762031	0,143989
Residuos	12	4860,06548	405,005457		
Total	14	6713,0629			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	54,7250	12,4318	4,4020	0,0009	27,6384	81,8116	27,6384	81,8116
Variable X 1	-1,2661	0,8777	-1,4426	0,1747	-3,1783	0,6462	-3,1783	0,6462
Variable X 2	1,7942	0,8658	2,0723	0,0604	-0,0923	3,6807	-0,0923	3,6807

Fuente: Autor.

Como podemos observar, para el caso de los caudales promedio anuales y máximos anuales el valor del coeficiente de determinación R cuadrado ajustado es alto, siendo este 0,824 y 0,849 respectivamente. Esto indica una alta correlación entre el efecto producido por las variables independientes (precipitación de cada una de las estaciones), para tratar de explicar la variable dependiente (caudal). Por otra parte, para el caso del caudal mínimo anual podemos observar que el valor del coeficiente de determinación R cuadrado es tan solo de 0,155, lo cual sugiere que tan solo una pequeña parte del caudal medido por las estaciones hidrológicas es explicado por la precipitación medida por ambas estaciones meteorológicas.

6.3.1.6 Registro de Resultados de los análisis de regresión lineales anuales.

Al haber realizado los respectivos análisis de regresión lineales simples y múltiples anuales, se presentan los resultados para el periodo comprendido entre 1976 y 1990, obteniendo resultados medianamente satisfactorios en el análisis simple y observando un aumento del coeficiente de determinación ajustado para el análisis múltiple.

Tabla 18. Resultados del análisis de regresión lineal simple anual

HIDROLOGICA											
# ANALISIS	CODIGO	AÑO INICIO REGISTRO	AÑO FINAL REGISTRO	UBICACIÓN	AÑOS NO CONTADOS	EVALUACION SIMPLE	AÑO INICIO ANALIZADO	AÑO FINAL ANALIZADO	AÑOS NO ANALIZADOS	PROMEDIO R ² AJUSTADO	OBSERVACIONES 1
1	H0800	1962	2014	DOWNWATERS	1993, 1998-2009	SI	1976	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	Hidrologica elegida a usar
METEREOLOGICA TOP											
# ANALISIS	CODIGO	AÑO INICIO REGISTRO	AÑO FINAL REGISTRO	UBICACIÓN	AÑOS NO REGISTRADOS	EVALUACION SIMPLE	AÑO INICIO ANALIZADO	AÑO FINAL ANALIZADO	AÑOS NO ANALIZADOS	PROMEDIO R ² AJUSTADO	OBSERVACIONES 1
1	M0382	1976	1990	TOP		SI	1976	1990		74.40%	Meteorologica elegida a usar
2	M0380	1964	2016	TOP		SI	1976	1990		24.94%	Alta correlacion promedio
3	M0381	1975	1988	TOP		SI	1976	1987		-84.52%	Alta correlacion, pero con INCOHERENCIA entre mas llueve hay
4	M0128	1978	2015	TOP	2001	SI	1978	1990		3.64%	Baja correlacion
5	M0258	1986	2016	TOP		NO					No entra en rango
6	M0377	1932	2016	TOP	1943-1963	SI	1976	1990		1.00%	Baja correlacion
7	M0599	1964	1980	TOP		NO					No entra en rango
8	M0390	1964	1986	TOP		NO					No entra en rango

9	M1069	1988	2015	TOP	1993-1996, 1998	NO					No entra en rango
10	M0244	1984	1990	TOP		NO					No entra en rango
11	M0376	1965	2015	TOP		SI	1976	1990		0.30%	Baja correlacion
12	M0089	1984	1984	TOP		NO					No entra en rango
13	M0288	1936	1939	TOP		NO					No entra en rango
14	M0028	1905	1987	TOP		NO					No entra en rango
15	M0289	1935	1937	TOP		NO					No entra en rango
16	M0066	1965	1998	TOP		SI	1976	1990		1.64%	Baja correlacion
17	M0286	1935	1939	TOP		NO					No entra en rango
18	M0127	1931	2014	TOP	1942-1963, 2003	SI	1976	1990		0.36%	Baja correlacion
19	M0126	1932	2015	TOP	1941-1947, 1959-1962	SI	1976	1990		0.13%	Baja correlacion
20	M1243	2012	2015	TOP		NO					No entra en rango
21	M0732	1972	1988	TOP		SI	1976	1988		0.85%	Baja correlacion
22	M0369	1966	2016	TOP		SI	1976	1990		-1.62%	Baja correlacion
23	M0125	1964	1987	TOP	1984	NO					No entra en rango
24	M0268			TOP		NO					Sin datos
25	M0579	1963	1976	TOP		NO					No entra en rango
26	M0004	1976	2016	TOP		SI	1976	1990		0.02%	Baja correlacion

METEREOLÓGICA BOTTOM

# ANALISIS	CODIGO	AÑO INICIO REGISTRO	AÑO FINAL REGISTRO	UBICACIÓN	AÑOS NO REGISTRADOS	EVALUACION SIMPLE	AÑO INICIO ANALIZADO	AÑO FINAL ANALIZADO	AÑOS NO ANALIZADOS	PROMEDIO R ² AJUSTADO	OBSERVACIONES 1
1	M0900	1975	1987	BOTTOM		SI	1976	1987		-11.68%	Baja correlacion
2	M1261	2013	2015	BOTTOM		NO					No entra en rango
3	M0400	1964	1985			NO					No entra en rango
4	M0097	1984	1984	BOTTOM		NO					No entra en rango
5	M0243	1984	2001	BOTTOM		NO					No entra en rango
6	M1034			BOTTOM		NO					Sin datos
7	M0393	1963	2016	BOTTOM		SI	1976	1990		-2.02%	Baja correlacion
9	M0133	1963	2015	BOTTOM		SI	1976	1990		0.16%	Baja correlacion
10	M0094	1984	1984	BOTTOM		NO					No entra en rango
11	M0057	1934	1998	BOTTOM		SI	1976	1990		-8.97%	Baja correlacion
12	M0408	1980	2016	BOTTOM		NO					No entra en rango
13	M0096	1973	1984	BOTTOM	1974-1983	NO					No entra en rango
14	M5111			BOTTOM		NO					Sin datos
15	M0406	1975	1990	BOTTOM		SI	1976	1990		1.77%	Baja correlacion
16	M0857			BOTTOM		NO					Sin datos
17	M0095	1984	1984	BOTTOM		NO					No entra en rango
18	M5108			BOTTOM		NO					Sin datos
19	M1260	2013	2016	BOTTOM		NO					No entra en rango
20	M0407	1976	2016	BOTTOM		SI	1976	1990		1.26%	Baja correlacion
21	M1130	2001	2015	BOTTOM	2002-2007	NO					No entra en rango
22	M5113			BOTTOM		NO					Sin datos
23	M0396	1965	2016	BOTTOM		SI	1976	1990		2.99%	Baja correlacion
24	M1067	1989	1990	BOTTOM		NO					No entra en rango
25	M0395	1965	2016	BOTTOM		SI	1976	1990		14.12%	Media correlacion
26	M0134	1965	2006	BOTTOM	1980-1983, 1996-1998, 2002, 2004	SI	1976	1990	1980-1983	-2.77%	Baja correlacion
27	M1209	2005	2015	BOTTOM		NO					No entra en rango

Tabla 19. Resultados del análisis de regresión lineal doble anual

HIDROLOGICA									
# ANALISIS	CODIGO	UBICACIÓN	EVALUACION DOBLE	AÑO INICIO ANALIZADO	AÑO FINAL ANALIZADO	AÑOS NO ANALIZADOS	PROMEDIO R ² AJUSTADO	OBSERVACIONES 1	OBSERVACIONES 2
1	H0800	DOWNWATERS	SI	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	Hidrologica elegida a usar	
METEREOLÓGICA TOP									
# ANALISIS	CODIGO	UBICACIÓN	EVALUACION DOBLE	AÑO INICIO ANALIZADO	AÑO FINAL ANALIZADO	AÑOS NO ANALIZADOS	PROMEDIO R ² AJUSTADO	OBSERVACIONES 1	OBSERVACIONES 2
1	M0382	TOP	SI	1976	1990		82.45%	Alta correlacion	
	M0380	TOP							
2	M0395	BOTTOM	SI	1976	1990		13.58%	Baja correlacion	
	M0380	TOP							
3	M0382	TOP	SI	1976	1990		71.64%	Alta correlacion	
	M0395	BOTTOM							

Fuente: Autor.

Tabla 20. Resultados del análisis de regresión lineal múltiple (3) anual

HIDROLOGICA									
# ANALISIS	CODIGO	UBICACIÓN	EVALUACION DOBLE	AÑO INICIO ANALIZADO	AÑO FINAL ANALIZADO	AÑOS NO ANALIZADOS	PROMEDIO R ² AJUSTADO	OBSERVACIONES 1	OBSERVACIONES 2
1	H0800	DOWNWATERS	SI	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	Hidrologica elegida a usar	
METEREOLÓGICA TOP									
# ANALISIS	CODIGO	UBICACIÓN	EVALUACION DOBLE	AÑO INICIO ANALIZADO	AÑO FINAL ANALIZADO	AÑOS NO ANALIZADOS	PROMEDIO R ² AJUSTADO	OBSERVACIONES 1	OBSERVACIONES 2
1	M0382	TOP	SI	1976	1990		81.78%	Alta correlacion	
	M0380	TOP							
	M0395	BOTTOM							

Fuente: Autor.

De las tablas 18, 19 y 20 podemos determinar que existe un aumento del coeficiente de determinación ajustado al evaluar las estaciones meteorológicas M0382 y M0380 con la estación hidrológica H0800, llegando a ser este valor de 82.45% lo cual puede llegar a explicar de manera aproximada el caudal del río si se conoce la precipitación. Sin embargo debido a la falta de datos y vacíos en la información, así como la posible mala toma de datos y ausencia de otros parámetros influyentes de la cuenca a la cual pertenece el Río Pastaza hacen que este análisis no prediga de manera confiable el caudal en el río, el cual es necesario para temas de aprovechamiento de energía, construcción de estructuras civiles e hidráulicas y control de inundaciones y sequías.

En la siguiente figura se presenta la validación de la ecuación de regresión lineal anual múltiple para caudal promedio, en la cual comparamos el caudal real medido por las estaciones (x) vs el caudal calculado utilizando la regresión (y).

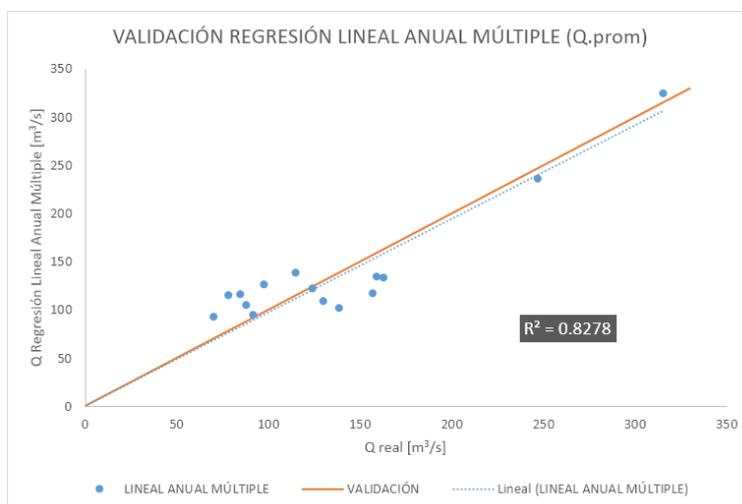


Figura 16. Validación de la ecuación de regresión lineal anual múltiple para caudal promedio.

Fuente: Autor.

6.3.2 Análisis de regresión lineal con datos de precipitación mensuales.

6.3.2.1 Selección de la cuenca hidrográfica.

La selección de la cuenca hidrográfica para el análisis de regresión lineal mensual fue escogida de la misma manera que para el análisis de regresión lineal anual, de tal forma que la cuenca hidrográfica analizada es la misma, lo cual es beneficioso para poder comparar ambos análisis. De igual manera que con el análisis anual, se identificará a la cuenca del Río Patate como “TOP”, mientras que la cuenca del Río Chambo será identificada como “BOTTOM”

6.3.2.2 Selección de estaciones hidrológicas.

Al igual que para el análisis de regresión lineal anual, se decidió escoger una estación hidrológica cercana al cierre de cuenca, de tal manera que se puedan interpretar correctamente los datos debido a la precipitación que se transforma en escorrentía aguas abajo. Por lo que de esta manera se procedió solo con el análisis de la estación hidrológica H0800, ubicada en el inicio del Río Pastaza por la confluencia de los ríos Chambo y Patate.

6.3.2.3 Selección de estaciones meteorológicas.

Para la selección de estaciones meteorológicas se tomaron en cuenta todas las estaciones meteorológicas presentes en las cuencas del Río Chambo y del Río Patate que son llamadas como cuencas “bottom” y “top” respectivamente. A diferencia del análisis anual muy difícilmente se tendrá falta de datos en uno de los meses de las variables independientes. Es decir, en el análisis anual si se tenía cierta cantidad de vacíos en un año en el rango analizado, esa estación era descartada, al contrario del análisis mensual en el cual muy difícilmente se tendrá gran cantidad de vacíos en un mismo mes específico.

6.3.2.4 Análisis de regresión lineal simple mensual

Para el análisis de regresión lineal simple mensual, fue necesario evaluar cada una de las a nuestra estación hidrológica escogida con cada una de las 53 estaciones meteorológicas correspondientes a 27 estaciones de la cuenca del Río Patate y 26 de la cuenca del Río Chambo. Teniendo así al caudal como variable dependiente y la precipitación promedio, máxima o mínima mensual como variable independiente. A continuación se realiza el mismo procedimiento que en el análisis anual, pero sin descartar datos (meses) y tan se procede a realizar un promedio excluyente el cual no toma en cuenta los vacíos en las bases de datos, un conteo de ceros o vacíos en la base de datos y los valores máximos y mínimos tanto de caudal como de precipitación. A continuación se presenta el análisis de regresión lineal simple entre las estaciones H0800-M0380. En este análisis se puede observar no se excluyen datos mensuales.

Tabla 21. Valores de caudal [m³/s] mensual de datos históricos para la estación H0800

							AÑOS	NO			
	1962	1963	1964	...	2013	2014	ESTACION	REGISTR	CEROS	MAX	MIN
							53	13			
							PROM	DATOS			
							EXCLU				
ENERO	0.0	57.5	60.7	...	119.0	85.5	92.2	30	10	169.0	38.8
FEBRERO	0.0	72.6	47.8	...	97.6	73.7	105.3	30	10	255.6	47.8
MARZO	0.0	82.2	89.1	...	109.0	103.8	122.3	32	8	400.5	62.5
ABRIL	0.0	68.3	98.8	...	87.6	0.0	122.0	31	9	245.2	58.5
MAYO	0.0	76.7	121.3	...	84.7	0.0	144.1	33	7	289.5	51.1
JUNIO	0.0	106.8	203.6	...	143.6	0.0	183.7	34	6	492.5	80.6
JULIO	0.0	81.3	121.9	...	166.9	0.0	189.8	33	7	543.6	72.2
AGOSTO	0.0	86.5	174.4	...	128.0	0.0	140.4	34	6	312.5	55.5
SEPTIEMBRE	111.9	64.9	237.0	...	91.0	0.0	126.5	33	7	365.0	59.4
OCTUBRE	115.4	59.0	88.5	...	71.5	0.0	119.9	34	6	805.7	45.3
NOVIEMBRE	104.8	76.4	70.9	...	69.5	0.0	91.5	34	6	288.4	22.0
DICIEMBRE	68.6	111.5	47.9	...	67.7	0.0	82.6	34	6	169.5	31.3

Fuente: Autor

Tabla 22. Valores de precipitación [mm] mensual de datos históricos para la estación M0380

	AÑOS						NO	ESTACION						
	1964	1965	2013	...	2015	2016	53	REGISTR	53	0	PROM	DATOS	CEROS	MAX
ENERO	0	36.5	37.2	...	59.3	25.2	47.894	50	3	224.700	1.200			
FEBRERO	0	13.6	86.7	...	23.3	79.4	49.828	50	3	121.200	1.200			
MARZO	0	45.8	69.3	...	103.7	0	65.170	50	3	204.600	8.300			
ABRIL	0	41.4	49.3	...	76.4	0	79.606	50	3	214.100	20.600			
MAYO	0	111.1	77.7	...	76.9	0	83.372	50	3	260.000	6.000			
JUNIO	0	157.6	78.3	...	190.7	0	128.551	49	4	999.400	17.500			
JULIO	0	154.3	123.2	...	137.1	0	106.973	49	4	949.100	7.300			
AGOSTO	102.4	106.6	58.2	...	85.4	0	83.376	50	3	425.000	21.700			
SEPTIEMBRE	149.9	39	50.8	...	41.6	0	63.220	50	3	360.800	8.400			
OCTUBRE	36.5	88.9	54.9	...	54.5	0	58.584	51	2	218.400	8.100			
NOVIEMBRE	31	54	83.3	...	63.3	0	56.860	48	5	222.200	2.500			
DICIEMBRE	34.2	32.1	40.1	...	42	0	43.443	49	4	155.500	4.600			

Fuente: Autor

Tal como se puede observar, debido a la extensión de las tablas, para la ilustración de estas se decidió cortar los valores. Finalmente, se realizó un análisis de regresión lineal simple mediante el software Excel para los valores de promedio excluyente, máximos y mínimos, obteniendo los siguientes resultados:

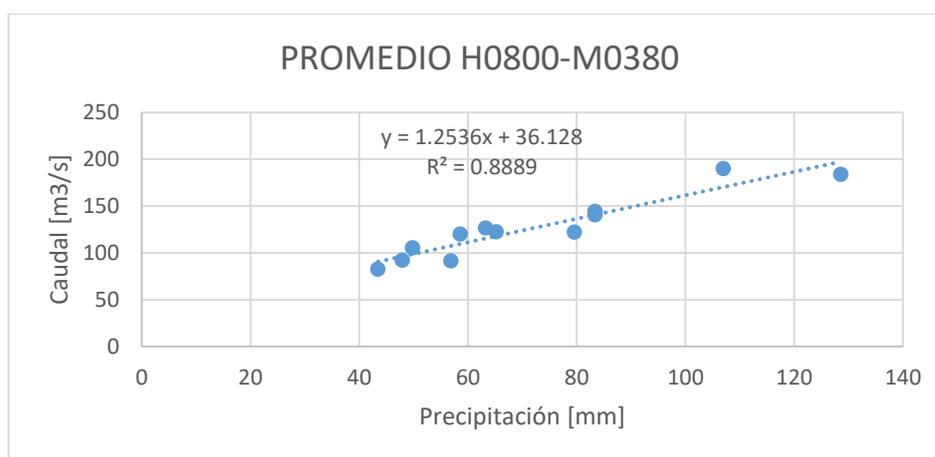


Figura 17. Regresión lineal simple de promedios mensuales entre las estaciones H0800-M0380.

Fuente: Autor.

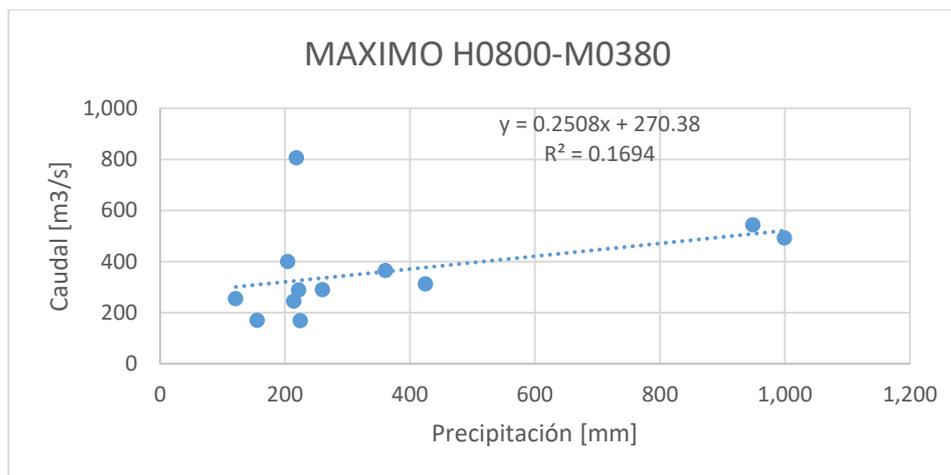


Figura 18. Regresión lineal simple de máximos mensuales entre las estaciones H0800-M0380.

Fuente: Autor.

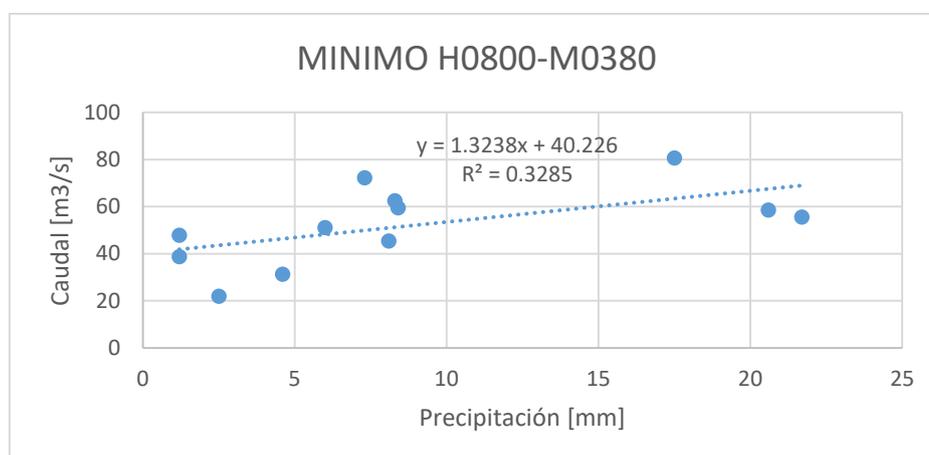


Figura 19. Regresión lineal simple de mínimos mensuales entre las estaciones H0800-M0380.

Fuente: Autor.

De estas gráficas podemos observar que la mayor correlación existente se encuentra en los valores promedios, seguidos de mínimos y finalmente máximos, sin embargo estos valores de coeficiente de determinación R cuadrado podrían aumentar al realizar un análisis múltiple, a pesar de que el valor promedio ya se encuentra con un alto grado de confiabilidad siendo este de 88.89%. Este mismo procedimiento se lo realizó con las demás estaciones y de esta manera se observó que los mejores resultados los obtuvieron las regresiones compuestas por las estaciones:

- H0800-M0380
- H0800-M0396
- H0800-M0126
- H0800-M0097
- H0800-M0381
- H0800-M0258
- H0800-M0377

En la siguiente figura se presenta la validación de la ecuación de regresión lineal mensual simple para caudal promedio, en la cual comparamos el caudal real medido por las estaciones (x) vs el caudal calculado utilizando la regresión (y).

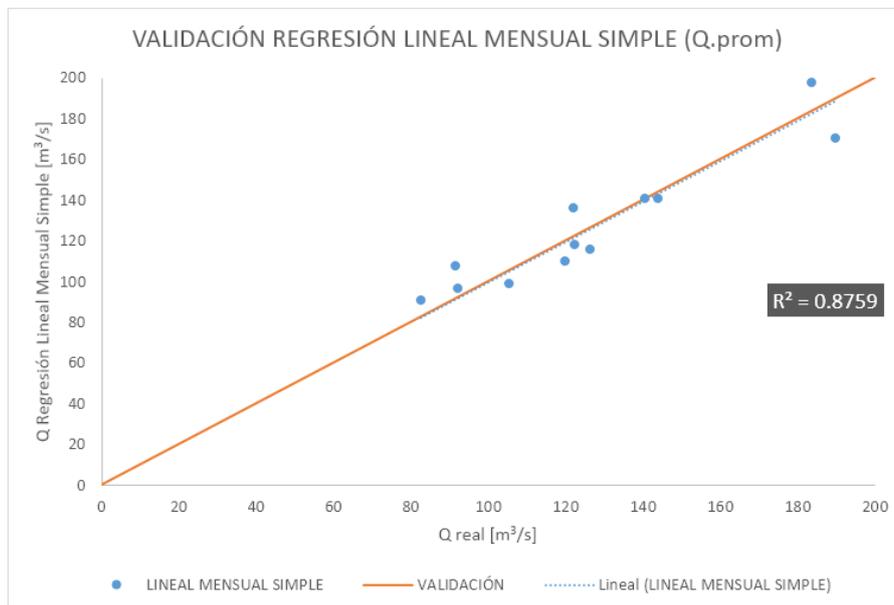


Figura 20. Validación de la ecuación de regresión lineal mensual simple para caudal promedio.

Fuente: Autor.

6.3.2.5 Análisis de regresión lineal múltiple mensual.

Con los resultados obtenidos de la regresión lineal simple, se realizó regresión lineal múltiple la cual toma como variables independientes a las precipitaciones promedio mensuales de dos o más estaciones meteorológicas y como variable dependiente al caudal registrado por la estación hidrológica. Para el caso de análisis, se realizó la regresión con la estación hidrológica H0800 y las meteorológicas M0380 y M0097, pertenecientes a las cuencas del Río Patate y del Río Chambo respectivamente. Para el análisis múltiple se decidió no excluir ningún dato de la serie (excepto ceros que sí son excluidos). Los datos registrados para este análisis son los siguientes:

Tabla 23. Valores de caudal medio mensual [m³/s] de datos históricos para la estación H0800 para análisis múltiple

							AÑOS ESTACION	NO REGISTR				
	1962	1963	1964	...	2013	2014	53	13	PROM EXCLU	CONTEO DE DATOS	CONTEO DE CEROS	MAX
ENERO	0.0	57.5	60.7	...	119.0	85.5	92.2	30	10	169.0	38.8	
FEBRERO	0.0	72.6	47.8	...	97.6	73.7	105.3	30	10	255.6	47.8	
MARZO	0.0	82.2	89.1	...	109.0	103.8	122.3	32	8	400.5	62.5	
ABRIL	0.0	68.3	98.8	...	87.6	0.0	122.0	31	9	245.2	58.5	
MAYO	0.0	76.7	121.3	...	84.7	0.0	144.1	33	7	289.5	51.1	
JUNIO	0.0	106.8	203.6	...	143.6	0.0	183.7	34	6	492.5	80.6	
JULIO	0.0	81.3	121.9	...	166.9	0.0	189.8	33	7	543.6	72.2	
AGOSTO	0.0	86.5	174.4	...	128.0	0.0	140.4	34	6	312.5	55.5	
SEPTIEMBRE	111.9	64.9	237.0	...	91.0	0.0	126.5	33	7	365.0	59.4	
OCTUBRE	115.4	59.0	88.5	...	71.5	0.0	119.9	34	6	805.7	45.3	
NOVIEMBRE	104.8	76.4	70.9	...	69.5	0.0	91.5	34	6	288.4	22.0	
DICIEMBRE	68.6	111.5	47.9	...	67.7	0.0	82.6	34	6	169.5	31.3	

Fuente: Autor.

Tabla 24. Valores de precipitación media mensual [mm] de datos históricos para la estación M0380 para análisis múltiple

							AÑOS ESTACION	NO REGISTR				
	1964	1965	2013	...	2015	2016	53	0	PROM EXCLU	CONTEO DE DATOS	CONTEO DE CEROS	MAX
ENERO	0	36.5	37.2	...	59.3	25.2	47.894	50	3	224.700	1.200	
FEBRERO	0	13.6	86.7	...	23.3	79.4	49.828	50	3	121.200	1.200	
MARZO	0	45.8	69.3	...	103.7	0	65.170	50	3	204.600	8.300	
ABRIL	0	41.4	49.3	...	76.4	0	79.606	50	3	214.100	20.600	
MAYO	0	111.1	77.7	...	76.9	0	83.372	50	3	260.000	6.000	
JUNIO	0	157.6	78.3	...	190.7	0	128.551	49	4	999.400	17.500	
JULIO	0	154.3	123.2	...	137.1	0	106.973	49	4	949.100	7.300	
AGOSTO	102.4	106.6	58.2	...	85.4	0	83.376	50	3	425.000	21.700	
SEPTIEMBRE	149.9	39	50.8	...	41.6	0	63.220	50	3	360.800	8.400	
OCTUBRE	36.5	88.9	54.9	...	54.5	0	58.584	51	2	218.400	8.100	
NOVIEMBRE	31	54	83.3	...	63.3	0	56.860	48	5	222.200	2.500	
DICIEMBRE	34.2	32.1	40.1	...	42	0	43.443	49	4	155.500	4.600	

Fuente: Autor.

Tabla 25. Valores de precipitación media mensual [mm] de datos históricos para la estación M0097 para análisis múltiple

		AÑOS				
		ESTACION	NO			
		1	0			
1984	PROM EXCLU	CONTEO DE DATOS	CONTEO DE CEROS	MAX	MIN	
ENERO	29.3	29.3	1	0	29.3	29.3
FEBRERO	47.9	47.9	1	0	47.9	47.9
MARZO	47.4	47.4	1	0	47.4	47.4
ABRIL	55.6	55.6	1	0	55.6	55.6
MAYO	122.8	122.8	1	0	122.8	122.8
JUNIO	108.7	108.7	1	0	108.7	108.7
JULIO	103.8	103.8	1	0	103.8	103.8
AGOSTO	23.7	23.7	1	0	23.7	23.7
SEPTIEMBRE	95.3	95.3	1	0	95.3	95.3
OCTUBRE	23.2	23.2	1	0	23.2	23.2
NOVIEMBRE	23.7	23.7	1	0	23.7	23.7
DICIEMBRE	1.2	1.2	1	0	1.2	1.2

Fuente: Autor.

Con estos datos, se procede a realizar el análisis de regresión lineal múltiple mediante el software Excel y su función de análisis de datos estadísticos, estableciendo un nivel de confianza del 95%. Con esta función se obtienen los resultados de ecuaciones de regresión tanto para caudal promedio excluyente como para caudales máximos y caudales mínimos mensuales. Cabe destacar que las celdas resaltadas en celeste son aquellas de mayor aporte a los resultados del análisis estadístico como lo son el coeficiente de determinación R cuadrado ajustado (debido a la regresión lineal múltiple mensual), el intercepto de la ecuación y los coeficientes correspondientes a las variables independientes. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 26. Resultados del análisis estadístico para caudales promedio mensuales.

PROMEDIO	
Coefficiente de correlación múltiple	0.953704115
Coefficiente de determinación R ²	0.90955154
R ² ajustado	0.889451882
Error típico	11.27772533
Observaciones	12

ANÁLISIS DE
VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	2	11510.9633	5755.4817	45.2521	0.0000			
Residuos	9	1144.6838	127.1871					
Total	11	12655.6471						

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	40.31446431	10.5764	3.8117	0.0041	16.3889	64.2400	16.3889	64.2400
Variable X 1	1.061423871	0.1891	5.6125	0.0003	0.6336	1.4892	0.6336	1.4892
Variable X 2	0.170507259	0.1190	1.4328	0.1857	-0.0987	0.4397	-0.0987	0.4397

Fuente: Autor.

Tabla 27. Resultados del análisis estadístico para caudales máximos (picos) mensuales.

MAXIMO	
Coefficiente de correlación múltiple	0.415451069
Coefficiente de determinación R²	0.172599591
R² ajustado	-0.01126717
Error típico	182.1149837
Observaciones	12

ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	2	62266.9939	31133.4969	0.9387	0.4263			
Residuos	9	298492.8056	33165.8673					
Total	11	360759.7995						

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	278.8649216	96.7219	2.8832	0.0181	60.0648	497.6650	60.0648	497.6650
Variable X 1	0.276905579	0.2323	1.1922	0.2637	-0.2485	0.8023	-0.2485	0.8023
Variable X 2	-0.31547298	1.7028	-0.1853	0.8571	-4.1676	3.5366	-4.1676	3.5366

Fuente: Autor.

Tabla 28. Resultados del análisis estadístico para caudales mínimos (sequías) mensuales.

MINIMO								
Coefficiente de correlación múltiple	0.848460038							
Coefficiente de determinación R²	0.719884436							
R² ajustado	0.657636533							
Error típico	9.685519781							
Observaciones	12							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	2	2169.7711	1084.8855	11.5648	0.0033			
Residuos	9	844.2836	93.8093					
Total	11	3014.0547						
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	27.51515277	5.8281	4.7211	0.0011	14.3312	40.6992	14.3312	40.6992
Variable X 1	1.101245122	0.4123	2.6709	0.0256	0.1685	2.0340	0.1685	2.0340
Variable X 2	0.258475594	0.0729	3.5463	0.0063	0.0936	0.4234	0.0936	0.4234

Fuente: Autor.

Como podemos observar, para el caso del caudal promedio mensual el valor del coeficiente de determinación R cuadrado ajustado es alto, siendo este 88.95%. Esto indica una alta correlación entre el efecto producido por las variables independientes (precipitación de cada una de las estaciones), para tratar de explicar la variable dependiente (caudal). Por otra parte, para el caso del caudal mínimo mensual podemos observar que el valor del coeficiente de determinación R cuadrado es tan solo del 65.76%, lo cual sugiere que tan solo una parte del caudal medido por las estaciones hidrológicas es explicado por la precipitación medida por ambas estaciones meteorológicas. Y para el caso del caudal máximo mensual, al existir un valor negativo en el coeficiente de determinación R cuadrado podemos afirmar que no hay una relación directa y se deben tomar en cuenta otros parámetros de la cuenca hidrográfica.

6.3.2.6 Registro de Resultados de los análisis de regresión lineales mensuales.

Al haber realizado los respectivos análisis de regresión lineales simples y múltiples mensuales, se presentan los resultados para las 10 estaciones meteorológicas con mejores resultados en el análisis simple, donde se observa que para el caso del promedio excluyente, el valor de R² ajustado va disminuyendo por la excesiva cantidad de estaciones como variables. Mientras que para el caso del caudal mínimo existe un disparo del valor de R² ajustado al usar estas 10 variables, obteniendo un alto grado de confiabilidad.

Tabla 29. Resultados del análisis de regresión lineal simple mensual

HIDROLOGICA												
# ANALISIS	CODIGO	AÑO INICIO REGISTRO	AÑO FINAL REGISTRO	UBICACIÓN	AÑOS NO REGISTRADOS	EVALUACION SIMPLE	# REGISTRADOS	# NO REGISTRADOS	PROMEDIO R ² AJUSTADO	MAXIMO R ² AJUSTADO	MINIMO R ² AJUSTADO	OBSERVACIONES 1
1	H0800	1962	2014	AGUAS ABAJO	1993, 1998-2009	SI	40	13	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	Hidrologica elegida a usar
METEREOLOGICA TOP												
# ANALISIS	CODIGO	AÑO INICIO REGISTRO	AÑO FINAL REGISTRO	UBICACIÓN	AÑOS NO REGISTRADOS	EVALUACION SIMPLE	# REGISTRADOS	# NO REGISTRADOS	PROMEDIO R ² AJUSTADO	MAXIMO R ² AJUSTADO	MINIMO R ² AJUSTADO	OBSERVACIONES 1
1	M0382	1975	1990	TOP	N/A	SI	16	0	12.40%	0.26%	11.80%	
2	M0380	1964	2016	TOP	N/A	SI	53	0	88.89%	16.94%	32.85%	
3	M0381	1936	1988	TOP	1938-1974	SI	16	37	45.45%	0.10%	47.40%	
4	M0128	1978	2015	TOP	2001	SI	37	1	18.61%	0.56%	36.41%	
5	M0258	1979	2016	TOP	1980-1984	SI	33	5	40.25%	1.59%	30.40%	
6	M0377	1932	2016	TOP	1943-1963, 2008	SI	63	22	40.12%	12.40%	32.39%	
7	M0599	1964	1980	TOP	1981-1988	SI	20	8	20.61%	0.04%	21.54%	
8	M0390	1964	1986	TOP	1987-1989, 1991, 1992, 2000, 2001	SI	47	7	0.11%	0.17%	14.60%	
9	M1069	1988	2015	TOP	1993-1996, 1998	SI	23	5	27.61%	1.48%	60.22%	
10	M0244	1984	1990	TOP	N/A	SI	7	0	8.22%	16.72%	23.27%	
11	M0376	1965	2015	TOP	1939-1963	SI	56	25	18.61%	2.55%	52.49%	
12	M0089	1984	1984	TOP	N/A	NO	N/A	N/A				Solo hay datos de 3 meses en 1984
13	M0288	1936	1939	TOP	N/A	SI	4	0	0.42%	10.93%	0.11%	
14	M0028	1905	1987	TOP	1911-1913, 48, 49, 58-61, 88-91	SI	75	13	-11.54%	5.95%	0.45%	
15	M0289	1935	1937	TOP	N/A	SI	3	0	3.64%	2.62%	4.01%	
16	M0066	1965	1998	TOP	N/A	SI	34	0	-9.33%	8.96%	0.15%	
17	M0286	1935	1992	TOP	1938, 1940-1991	SI	5	53	16.74%	5.76%	1.85%	
18	M0127	1931	2014	TOP	1942-1963, 2003, 2005	SI	60	24	-0.23%	-2.21%	9.83%	
19	M0126	1932	2015	TOP	35,37, 41-47, 59-62, 94	SI	70	14	65.76%	-4.95%	10.58%	
20	M1243	2012	2015	TOP	N/A	SI	4	0	-21.25%	-6.71%	-4.26%	
21	M0732	1972	1988	TOP	N/A	SI	17	0	-26.27%	-1.82%	0.25%	
22	M0369	1966	2016	TOP	N/A	SI	54	0	-33.64%	0.01%	0.75%	
23	M0125	1964	1987	TOP	1965, 1967-1974, 1984	SI	14	10	-27.63%	-2.85%	-8.07%	
24	M0268			TOP		NO						No existe registro
25	M0579	1963	1976	TOP	N/A	SI	14	0	-18.66%	0.11%	4.83%	
26	M0004	1976	2016	TOP	N/A	SI	41	0	-45.64%	-0.03%	-2.12%	
METEREOLOGICA BOTTOM												
# ANALISIS	CODIGO	AÑO INICIO REGISTRO	AÑO FINAL REGISTRO	UBICACIÓN	AÑOS NO REGISTRADOS	EVALUACION SIMPLE	# REGISTRADOS	# NO REGISTRADOS	PROMEDIO R ² AJUSTADO	MAXIMO R ² AJUSTADO	MINIMO R ² AJUSTADO	OBSERVACIONES 1
1	M0900	1975	1987	BOTTOM	N/A	SI	13	0	-2.62%	-0.28%	2.40%	
2	M1261	2013	2015	BOTTOM	N/A	SI	3	0	-0.06%	4.95%	-1.44%	
3	M0400	1964	1985	BOTTOM	N/A	SI	22	0	23.59%	3.02%	24.86%	
4	M0097	1984	1984	BOTTOM	N/A	SI	1	0	59.30%	4.19%	49.79%	Solo se registra un año
5	M0243	1984	2001	BOTTOM	1992	SI	17	1	3.12%	0.00%	1.17%	
6	M1034			BOTTOM		NO						No existe registro
7	M0393	1963	2016	BOTTOM	N/A	SI	54	0	-26.88%	1.12%	1.55%	
8	M0394	1963	2001	BOTTOM	N/A	SI	39	0	-14.82%	-8.04%	-21.03%	
9	M0133	1963	2015	BOTTOM	2005	SI	52	1	-15.96%	-1.85%	3.83%	
10	M0094	1984	1984	BOTTOM	N/A	SI	1	0	0.73%	-0.43%	9.09%	Solo se registra un año
11	M0057	1934	1998	BOTTOM	1947-1950, 1953-1957	SI	56	9	-12.81%	-0.96%	10.31%	
12	M0408	1979	2016	BOTTOM	N/A	SI	38	0	-17.87%	-2.71%	0.80%	
13	M0096	1973	1984	BOTTOM	1974-1983	SI	2	10	3.34%	0.04%	4.73%	
14	M5111			BOTTOM		NO						No existe registro
15	M0406	1975	1990	BOTTOM	N/A	SI	16	0	-0.09%	17.68%	1.31%	
16	M0857			BOTTOM		NO						No existe registro
17	M0095	1984	1984	BOTTOM	N/A	SI	1	0	0.84%	-3.83%	4.58%	Solo se registra un año
18	M5108			BOTTOM		NO						No existe registro

19	M1260	2013	2016	BOTTOM	N/A	SI	4	0	11.70%	0.14%	41.82%
20	M0407	1975	2016	BOTTOM	2005	SI	41	1	0.77%	-0.51%	7.87%
21	M1130	2001	2015	BOTTOM	2003-2007, 2010	SI	9	6	-7.25%	-1.50%	-1.62%
22	M5113			BOTTOM		NO					No existe registro
23	M0396	1964	2016	BOTTOM	N/A	SI	53	0	72.18%	2.84%	16.01%
24	M1067	1989	1990	BOTTOM	N/A	SI	2	0	5.55%	3.67%	3.73%
25	M0395	1964	2016	BOTTOM	N/A	SI	53	0	-3.73%	-14.60%	-17.23%
26	M0134	1963	2006	BOTTOM	1981-1983, 1996-1998, 2002, 2004	SI	36	8	-16.41%	-14.12%	1.07%
27	M1209	2005	2015	BOTTOM	N/A	SI	11	0	-22.55%	-20.90%	-4.49%

Fuente: Autor.

Tabla 30. Resultados del análisis de regresión lineal doble mensual

HIDROLOGICA								
# ANALISIS	CODIGO	UBICACIÓN	R^2 SIMPLE	EVALUACION DOBLE	PROM R^2 AJUSTADO	MAX R^2 AJUSTADO	MIN R^2 AJUSTADO	OBSERVACIONES 1
1	H0800	DOWNWATERS	SI	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	Hidrologica elegida a usar
METEREOLÓGICAS DOBLES								
# ANALISIS	CODIGO	UBICACIÓN	PROM R^2 SIMPLE	EVALUACION DOBLE	PROM R^2 AJUSTADO	MAX R^2 AJUSTADO	MIN R^2 AJUSTADO	OBSERVACIONES 1
1	M0380	TOP	88.89%	SI	86.76%	3.03%	19.64%	CAÍDA de R^2 ajustado
	M0396	BOTTOM	72.18%					
2	M0380	TOP	88.89%	SI	86.57%	3.01%	32.25%	CAÍDA de R^2 ajustado
	M0126	TOP	65.76%					
3	M0380	TOP	88.89%	SI	88.95%	-1.13%	65.76%	MEJORA de R^2 ajustado
	M0097	BOTTOM	59.30%					
4	M0396	BOTTOM	72.18%	SI	66.23%	-14.26%	7.78%	CAÍDA de R^2 ajustado
	M0126	TOP	65.76%					
5	M0396	BOTTOM	72.18%	SI	69.07%	-16.19%	45.23%	CAÍDA de R^2 ajustado
	M0097	BOTTOM	59.30%					
6	M0126	TOP	65.76%	SI	64.43%	-4.49%	40.39%	CAÍDA de R^2 ajustado
	M0097	BOTTOM	59.30%					

Fuente: Autor.

Tabla 31. Resultados del análisis de regresión lineal triple mensual

HIDROLOGICA								
# ANALISIS	CODIGO	UBICACIÓN	R^2 SIMPLE	EVALUACION TRIPLE	PROM R^2 AJUSTADO	MAX R^2 AJUSTADO	MIN R^2 AJUSTADO	OBSERVACIONES 1
1	H0800	DOWNWATERS	SI	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	Hidrologica elegida a usar
METEREOLÓGICA TRIPLES								
# ANALISIS	CODIGO	UBICACIÓN	PROM R^2 SIMPLE	EVALUACION TRIPLE	PROM R^2 AJUSTADO	MAX R^2 AJUSTADO	MIN R^2 AJUSTADO	OBSERVACIONES 1
1	M0380	TOP	88.89%	SI	85.10%	-1.07%	24.63%	CAÍDA de R^2 ajustado
	M0396	BOTTOM	72.18%					
	M0126	TOP	65.76%					
2	M0380	TOP	88.89%	SI	90.46%	-8.67%	61.49%	MEJORA de R^2 ajustado
	M0396	BOTTOM	72.18%					
	M0097	BOTTOM	59.30%					
3	M0380	TOP	88.89%	SI	65.27%	-16.99%	40.27%	CAÍDA de R^2 ajustado
	M0126	TOP	65.76%					
	M0097	BOTTOM	59.30%					
4	M0396	BOTTOM	72.18%	SI	57.96%	-27.30%	34.12%	CAÍDA de R^2 ajustado
	M0126	TOP	65.76%					
	M0097	BOTTOM	59.30%					

Fuente: Autor.

Tabla 32. Resultados del análisis de regresión lineal múltiple mensual

HIDROLOGICA								
# ANALISIS	CODIGO	UBICACIÓN	R ² SIMPLE	EVALUACION CUAD	PROM R ² AJUSTADO	MAX R ² AJUSTADO	MIN R ² AJUSTADO	OBSERVACIONES 1
1	H0800	DOWNWATERS	SI	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	Hidrologica elegida a usar
METEREOLOGICA MULTIPLES								
# ANALISIS	CODIGO	UBICACIÓN	PROM R ² SIMPLE	EVALUACION	PROM R ² AJUSTADO	MAX R ² AJUSTADO	MIN R ² AJUSTADO	OBSERVACIONES 1
1	M0380	TOP	88.89%	4	89.23%	-14.27%	59.95%	MEJORA de R ² ajustado
	M0396	BOTTOM	72.18%					
	M0126	TOP	65.76%					
	M0097	BOTTOM	59.30%					
3	M0380	TOP	88.89%	6	87.84%	-24.32%	74.56%	CAÍDA de R ² ajustado
	M0396	BOTTOM	72.18%					
	M0126	TOP	65.76%					
	M0097	BOTTOM	59.30%					
	M0381	TOP	45.45%					
	M0258	TOP	40.25%					
4	M0380	TOP	88.89%	7	85.43%	-55.13%	68.43%	CAÍDA de R ² ajustado
	M0396	BOTTOM	72.18%					
	M0126	TOP	65.76%					
	M0097	BOTTOM	59.30%					
	M0381	TOP	45.45%					
	M0258	TOP	40.25%					
	M0377	TOP	40.12%					
5	M0380	TOP	88.89%	8	80.90%	-77.97%	90.59%	CAÍDA de R ² ajustado
	M0396	BOTTOM	72.18%					
	M0126	TOP	65.76%					
	M0097	BOTTOM	59.30%					
	M0381	TOP	45.45%					
	M0258	TOP	40.25%					
	M0377	TOP	40.12%					
	M1069	TOP	27.61%					
6	M0380	TOP	88.89%	9	71.78%	-165.87%	91.62%	CAÍDA de R ² ajustado
	M0396	BOTTOM	72.18%					
	M0126	TOP	65.76%					
	M0097	BOTTOM	59.30%					
	M0381	TOP	45.45%					
	M0258	TOP	40.25%					
	M0377	TOP	40.12%					
	M1069	TOP	27.61%					
	M0400	BOTTOM	23.59%					
7	M0380	TOP	88.89%	10	66.89%	96.86%	93.39%	CAÍDA de R ² ajustado
	M0396	BOTTOM	72.18%					
	M0126	TOP	65.76%					
	M0097	BOTTOM	59.30%					
	M0381	TOP	45.45%					
	M0258	TOP	40.25%					
	M0377	TOP	40.12%					
	M1069	TOP	27.61%					
	M0400	BOTTOM	23.59%					
	M0599	TOP	20.61%					

Fuente: Autor.

De las tablas 29, 30, 31 y 32 podemos determinar que existe un aumento del coeficiente de determinación ajustado al evaluar las estaciones meteorológicas con los mejores resultados simples hasta un análisis múltiple de 4 estaciones. Sin embargo a partir de esa cantidad de estaciones, si se añade una más al análisis múltiple, entonces el coeficiente R^2 ajustado tiende a disminuir, esto debido a la penalización por utilizar más variables independientes que no explican adecuadamente el comportamiento del sistema. Además se puede observar que el valor de R^2 ajustado para el caudal mínimo tiende a aumentar hasta llegar a un 93.39% en la regresión lineal múltiple mensual de 10 variables. Así mismo podemos destacar que existe un cambio radical en el valor de R^2 ajustado para el caudal máximo ya que este pasa de entregar valores negativos a explicar con un 96.86% de precisión una correlación entre las precipitaciones máximas registradas mensualmente por las 10 estaciones y el caudal máximo medido por la estación H0800.

En la siguiente figura se presenta la validación de la ecuación de regresión lineal mensual múltiple para caudal promedio, en la cual comparamos el caudal real medido por las estaciones (x) vs el caudal calculado utilizando la regresión (y).

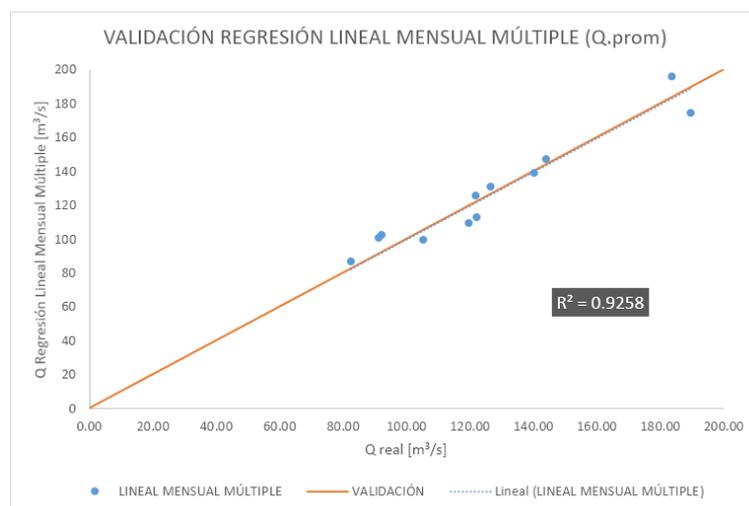


Figura 21. Validación de la ecuación de regresión lineal mensual múltiple para caudal promedio.

Fuente: Autor.

Además, cabe destacar que para el análisis doble y triple se usaron todas las combinaciones posibles de las 4 mejores estaciones. De tal manera que se pudo demostrar que no necesariamente las dos estaciones con el mejor resultado de correlación individualmente, al ser analizadas juntas, van a otorgar un valor más alto de correlación. Es por esto que se procedió a realizar una tabla de posibles combinatorias en donde se puede observar que para la inclusión de una nueva estación, la cantidad de análisis que se deben realizar aumenta en gran medida, por lo cual resulta inviable realizar todas las combinaciones de un análisis múltiple con varias estaciones. De igual manera que con los análisis realizados anteriormente, se identificará a la cuenca del Río Patate como “TOP”, mientras que la cuenca del Río Chambo será identificada como “BOTTOM”

Tabla 33. Posibles combinatorias de estaciones meteorológicas a ser analizadas de manera múltiple

TABLA DE COMBINATORIAS ORDENADA								
#	UBICACION	ESTACION	% PROM	# COMB	2	3	4	5
1	TOP	M0380	88.89%		N/A	N/A	N/A	N/A
2	BOTTOM	M0396	72.18%		1	N/A	N/A	N/A
3	TOP	M0126	65.76%		3	1	N/A	N/A
4	BOTTOM	M0097	59.30%		6	4	1	N/A
5	TOP	M0381	45.45%		10	10	5	1
6	TOP	M0258	40.25%		15	20	15	6
7	TOP	M0377	40.12%		21	35	35	21
8	TOP	M1069	27.61%		28	56	70	56
9	BOTTOM	M0400	23.59%		36	84	126	126
10	TOP	M0599	20.61%		45	120	210	252
11	TOP	M0128	18.61%		55	165	330	462
12	TOP	M0376	18.60%		66	220	495	792

Fuente: Autor.

6.3.3 Análisis de regresión en forma potencial con datos logarítmicos de precipitación mensuales.

Para el análisis de regresión en forma potencial, se realiza el mismo procedimiento que en la sección 6.3.2 en cuanto a la selección de la cuenca hidrográfica, estaciones hidrológicas y estaciones meteorológicas. Sin embargo, la diferencia se encuentra en que para realizar el análisis en forma potencial, se debe transformar los valores de las precipitaciones y de los caudales a valores logarítmicos, de tal manera que al realizar la regresión lineal se obtienen coeficientes diferentes y se puede expresar dicha ecuación tal como en la ecuación 5 o 6 para las formas logarítmicas y potenciales respectivamente.

De esta manera, se realizó el análisis de regresión en forma potencial doble (dos estaciones meteorológicas) para las 3 mejores combinaciones del resultado obtenido en la sección 6.3.2. En las siguientes tablas se presentan comparativos entre el coeficiente de determinación ajustado obtenido en los modelos de regresión lineal y de regresión potencial. De igual manera que con el análisis lineal, se identificará a la cuenca del Río Patate como “TOP”, mientras que la cuenca del Río Chambo será identificada como “BOTTOM”

Tabla 34. Comparativo entre regresión lineal doble y regresión potencial doble

METEOROLOGICAS DOBLES COMPARATIVO EN FORMA POTENCIAL											
# ANALISIS	CODIGO	UBICACION	PROM R ² SIMPLE LINEAL	EVAL DOBLE	PROM R ² AJUST LINEAL	PROM R ² AJUST POTENCIAL	MAX R ² AJUST LINEAL	MAX R ² AJUST POTENCIAL	MIN R ² AJUST LINEAL	MIN R ² AJUST POTENCIAL	OBSERVACIONES 1
1	M0380	TOP	88.89%	SI	86.76%	87.02%	3.03%	12.43%	19.64%	23.11%	
	M0396	BOTTOM	72.18%								
2	M0380	TOP	88.89%	SI	86.57%	86.70%	3.01%	18.23%	32.25%	45.99%	
	M0126	TOP	65.76%								
3	M0380	TOP	88.89%	SI	88.95%	88.62%	-1.13%	16.48%	65.76%	56.01%	
	M0097	BOTTOM	59.30%								

Tabla 35. Comparativo entre regresión lineal triple y regresión potencial triple

METEOROLOGICA TRIPLES COMPARATIVO EN FORMA POTENCIAL											
# ANALISIS	CODIGO	UBICACIÓN	PROM R ² SIMPLE	EVAL TRIPLE	PROM R ² AJUST LINEAL	PROM R ² AJUST POTENCIAL	MAX R ² AJUST LINEAL	MAX R ² AJUST POTENCIAL	MIN R ² AJUST LINEAL	MIN R ² AJUST POTENCIAL	OBSERVACIONES 1
1	M0380	TOP	88.89%	SI	85.10%	86.55%	-1.07%	16.55%	24.63%	40.70%	
	M0396	BOTTOM	72.18%								
	M0126	TOP	65.76%								
2	M0380	TOP	88.89%	SI	90.46%	88.79%	-8.67%	8.32%	61.49%	51.73%	
	M0396	BOTTOM	72.18%								
	M0097	BOTTOM	59.30%								

En las tablas 34 y 45 podemos observar que para el caso del caudal promedio y el caudal mínimo, comparando los análisis lineales donde no se dio un aumento del coeficiente de determinación (no resaltados), tampoco hubo un aumento en la forma exponencial, a pesar de que sí se experimentó un aumento con respecto al caso lineal (resaltados en verde). Por otra parte, observamos que al comparar el análisis lineal que presentó el valor más alto (resaltado en amarillo), no se existe un aumento en el coeficiente de determinación al realizarlo de la forma exponencial.

Por otra parte, al analizar el valor del caudal máximo de dichas tablas, podemos ver que para el análisis de regresión lineal se obtienen resultados de correlación muy bajos. A tal punto que el mayor valor en ambas tablas es de alrededor del 3%, e incluso se presentan valores negativos. Sin embargo, al realizar el análisis de regresión en forma potencial, estos valores crecen considerablemente, llegando a ser valores positivos y de alrededor del 10% al 15%.

Tabla 36. Comparativo entre regresión lineal múltiple y regresión potencial múltiple

METEOROLOGICA MULTIPLES COMPARATIVO EN FORMA POTENCIAL											
# ANALISIS	CODIGO	UBICACIÓN	PROM R ² SIMPLE	EVAL	PROM R ² AJUST LINEAL	PROM R ² AJUST POTENCIAL	MAX R ² AJUST LINEAL	MAX R ² AJUST POTENCIAL	MIN R ² AJUST LINEAL	MIN R ² AJUST POTENCIAL	OBSERVACIONES 1
1	M0380	TOP	88.89%	4	89.23%	88.58%	-14.27%	17.14%	59.95%	64.34%	
	M0396	BOTTOM	72.18%								
	M0126	TOP	65.76%								
	M0097	BOTTOM	59.30%								
2	M0380	TOP	88.89%	5	88.35%	87.94%	-25.39%	3.74%	74.94%	74.75%	
	M0396	BOTTOM	72.18%								
	M0126	TOP	65.76%								
	M0097	BOTTOM	59.30%								
	M0381	TOP	45.45%								
3	M0380	TOP	88.89%	9	71.78%	76.33%	-165.87%	30.14%	91.62%	42.06%	
	M0396	BOTTOM	72.18%								
	M0126	TOP	65.76%								
	M0097	BOTTOM	59.30%								
	M0381	TOP	45.45%								
	M0258	TOP	40.25%								
	M0377	TOP	40.12%								
	M1069	TOP	27.61%								
M0400	BOTTOM	23.59%									

4	M0380	TOP	88.89%	10	66.89%	54.56%	96.86%	74.08%	93.39%	97.91%
	M0396	BOTTOM	72.18%							
	M0126	TOP	65.76%							
	M0097	BOTTOM	59.30%							
	M0381	TOP	45.45%							
	M0258	TOP	40.25%							
	M0377	TOP	40.12%							
	M1069	TOP	27.61%							
	M0400	BOTTOM	23.59%							
	M0599	TOP	20.61%							

De la tabla 36 podemos observar que para el caso de caudal promedio tan solo en el caso que se consideran 9 estaciones meteorológicas existe un mejor desempeño por parte de la regresión en forma potencial. En el caso del caudal máximo, podemos observar que presenta el mismo patrón que en el análisis doble y en el triple, a excepción del análisis con 10 estaciones donde existe una caída del coeficiente. Finalmente, para el caso del caudal mínimo se presentan resultados variados ya que en dos de los casos existió un aumento y en dos de los casos una disminución.

Al haber realizado el análisis de los resultados, se presenta una interpretación de los mismos y el valor máximo de coeficiente de determinación ajustado para el caso de caudales máximos, promedios y mínimos.

Para el caso de caudal máximo: Podemos afirmar que el modelo de regresión en forma potencial explica de mejor manera la correlación entre caudal y precipitación máxima cuando se tiene coeficientes de determinación pequeños en el resultado lineal, mientras que para coeficientes de determinación altos en el resultado lineal, este coeficiente tiende a disminuir. El valor máximo de coeficiente de determinación para el caudal máximo fue de 96.86% para un análisis de regresión lineal múltiple (10 variables).

Para el caso de caudal promedio: Podemos observar que la elección de un modelo o de otro varía sin un patrón determinado, por lo cual se debe tener mucho cuidado en la elección y se recomienda realizar ambos análisis para distintas estaciones. El valor máximo de coeficiente de determinación para el caudal promedio fue de 90.46% para un análisis de regresión lineal múltiple (4 variables).

Para el caso de caudal mínimo: Podemos afirmar que al realizar el análisis de regresión lineal, encontramos un patrón en el coeficiente de determinación ajustado aumenta a medida que se incluyen más variables, lo que indica una mayor correlación entre la precipitación y el caudal. Mientras que para el caso del análisis de regresión en forma potencial no sucede. Además, al igual que en el caso de caudal promedio, se obtuvieron resultados variados en cuanto a la mejora de un método con respecto al otro, por lo que se debe tomar la misma recomendación. El valor máximo de coeficiente de determinación para el caudal mínimo fue de 97.91% para un análisis de regresión en forma potencial múltiple (10 variables). Pero a pesar de que dicho valor sea mayor que para el análisis de regresión lineal, debido a sus altos valores, de igual manera se procederá a presentar la ecuación con el mayor valor del análisis de regresión lineal ya que este modelo explica en un 93.39% la correlación entre caudal y precipitación al realizar el análisis múltiple (10 variables)

En la siguiente figura se presenta la validación de la ecuación de regresión potencial mensual múltiple para caudal mínimo, en la cual comparamos el caudal real medido por las estaciones (x) vs el caudal calculado utilizando la regresión (y).

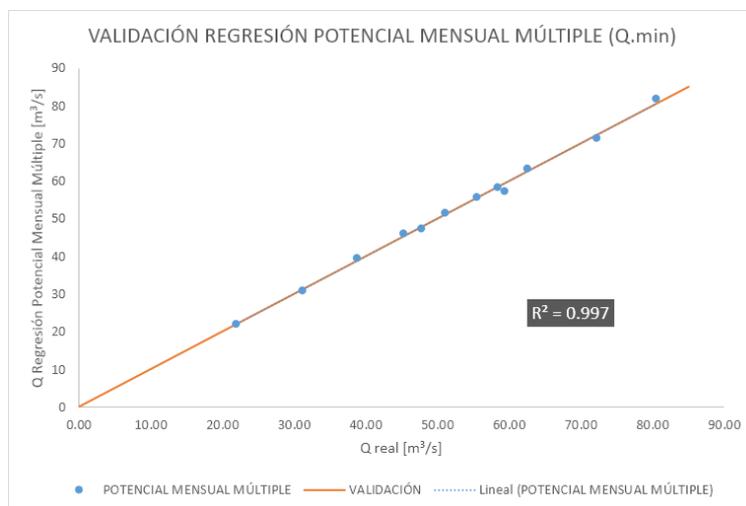


Figura 22. Validación de la ecuación de regresión potencial mensual múltiple para caudal mínimo.

Fuente: Autor.

6.4 Presentación de ecuaciones de regresión

Del análisis estadístico realizado anteriormente, podemos observar el intercepto y los coeficientes correspondientes a cada ecuación, por lo cual al aplicarlos adecuadamente con sus variables independientes correspondientes, obtenemos el valor del caudal respectivo. A continuación, las ecuaciones y sus modelos son presentados.

6.4.1 Modelo general de ecuación de regresión lineal múltiple

Ecuación (9): Modelo general de ecuación de regresión lineal múltiple

$$Y = A + bX_1 + cX_2 + \dots + zX_n$$

Donde:

Y: Variable Dependiente

A: Intercepto de la ecuación

X_1 : Variable independiente 1

X_2 : Variable independiente 2

X_n : Variable independiente n

b: Coeficiente de la variable independiente X_1

c: Coeficiente de la variable independiente X_2

z: Coeficiente de la variable independiente X_n

6.4.2 Modelo general de ecuación de regresión potencial múltiple

Ecuación (10): Modelo general de ecuación de regresión potencial múltiple

$$Y = 10^A \cdot X_1^b \cdot X_2^c \cdot \dots \cdot X_n^z$$

Donde:

Y : Variable Dependiente

A : Intercepto de la ecuación

X_1 : Variable independiente 1

X_2 : Variable independiente 2

X_n : Variable independiente n

b : Coeficiente de la variable independiente X_1

c : Coeficiente de la variable independiente X_2

z : Coeficiente de la variable independiente X_n

6.4.3 Ecuaciones de regresión lineal anual obtenidas

6.4.3.1 Ecuación de regresión lineal anual para caudal promedio

Con un valor de coeficiente de determinación ajustado del 82.45%, siendo este el de mayor valor para análisis de regresión lineal múltiple anual con precipitaciones promedio, se obtuvo la siguiente ecuación.

Ecuación (11): Ecuación de regresión lineal anual para caudal promedio

$$Q_{H0800_{prom}} = A_{prom} + b_{prom}P_{M0382_{prom}} + c_{prom}P_{M0380_{prom}}$$

$$Q_{prom} = 28,9525 + 1,4024 \times P_{M0382_{prom}} + 0,3331 \times P_{M0380_{prom}}$$

Donde:

$Q_{H0800_{prom}}$: Caudal promedio anual en la estación H0800 [m³/s].

A_{prom} : Intercepto de la ecuación de caudal promedio [m³/s].

$P_{M0382_{prom}}$: Precipitación promedio anual de la estación M0382 [mm].

$P_{M0380_{prom}}$: Precipitación promedio anual de la estación M0380 [mm].

b_{prom} : Coeficiente de la precipitación promedio anual (estación M0382).

c_{prom} : Coeficiente de la precipitación promedio anual (estación M0380).

6.4.3.2 Ecuación de regresión lineal anual para caudal máximo (inundación)

Con un valor de coeficiente de determinación ajustado del 84.93%, siendo este el de mayor valor para análisis de regresión lineal múltiple anual con precipitaciones máximas, se obtuvo la siguiente ecuación.

Ecuación (12): Ecuación de regresión lineal anual para caudal máximo (inundación)

$$Q_{H0800_{max}} = A_{max} + b_{max}P_{M0382_{max}} + c_{max}P_{M0380_{max}}$$

$$Q_{max} = 28,7639 + 1,2411 \times P_{M0382_{max}} + 0,2248 \times P_{M0380_{max}}$$

Donde:

$Q_{H0800_{max}}$: Caudal máximo anual en la estación H0800 [m³/s].

A_{max} : Intercepto de la ecuación de caudal máximo [m³/s].

$P_{M0382_{max}}$: Precipitación máxima anual de la estación M0382 [mm].

$P_{M0380_{max}}$: Precipitación máxima anual de la estación M0380 [mm].

b_{max} : Coeficiente de la precipitación máxima anual (estación M0382).

c_{max} : Coeficiente de la precipitación máxima anual (estación M0380).

6.4.3.3 Ecuación de regresión lineal anual para caudal mínimo (sequía)

Con un valor de coeficiente de determinación ajustado del 35.49%, siendo este el de mayor valor para análisis de regresión lineal múltiple anual con precipitaciones mínimas, se obtuvo la siguiente ecuación.

Ecuación (13): Ecuación de regresión lineal anual para caudal mínimo (sequía)

$$Q_{H0800_{min}} = A_{min} + b_{min}P_{M0396_{min}} + c_{min}P_{M0380_{min}}$$

$$Q_{min} = 45,3999 - 0.7204 \times P_{M0396_{min}} + 2.0884 \times P_{M0380_{min}}$$

Donde:

$Q_{H0800_{min}}$: Caudal mínimo anual en la estación H0800 [m³/s].

A_{min} : Intercepto de la ecuación de caudal mínimo [m³/s].

$P_{M0396_{min}}$: Precipitación mínima anual de la estación M0396 [mm].

$P_{M0380_{min}}$: Precipitación mínima anual de la estación M0380 [mm].

b_{min} : Coeficiente de la precipitación mínima anual (estación M0396).

c_{min} : Coeficiente de la precipitación mínima anual (estación M0380).

6.4.4 Ecuaciones de regresión lineal/potencial mensual obtenidas

6.4.4.1 Ecuación de regresión lineal mensual para caudal promedio

Con un valor de coeficiente de determinación ajustado del 90.46%, siendo este el de mayor valor para análisis de regresión lineal múltiple mensual con precipitaciones promedio, se obtuvo la siguiente ecuación.

Ecuación (14): Ecuación de regresión lineal mensual para caudal promedio

$$Q_{H0800_{prom.M}} = A_{prom.M} + b_{prom}P_{M0380_{prom.M}} + c_{prom}P_{M0396_{prom.M}} + d_{prom}P_{M0097_{prom.M}}$$

$$Q_{prom.M} = 64,6795 + 1,4825 \times P_{M0380_{prom.M}} - 0,6646 \times P_{M0396_{prom.M}} + 0,2722 \times P_{M0097_{prom.M}}$$

Donde:

$Q_{H0800_{prom.M}}$: Caudal promedio mensual en la estación H0800 [m3/s].

A_{prom} : Intercepto de la ecuación de caudal promedio [m3/s].

$P_{M0380_{prom.M}}$: Precipitación promedio mensual de la estación M0380 [mm].

$P_{M0396_{prom.M}}$: Precipitación promedio mensual de la estación M0396 [mm].

$P_{M0097_{prom.M}}$: Precipitación promedio mensual de la estación M0097 [mm].

b_{prom} : Coeficiente de la precipitación promedio mensual (estación M0380).

c_{prom} : Coeficiente de la precipitación promedio mensual (estación M0396).

d_{prom} : Coeficiente de la precipitación promedio mensual (estación M0097).

Debido a la cantidad de variables independientes y para poder tener una mejor visualización de la ecuación de regresión correspondiente, se presentan los coeficientes que deben ser multiplicados por la precipitación de cada estación en la siguiente tabla.

Tabla 37. Coeficientes de la ecuación de regresión lineal mensual para caudal promedio

COEFICIENTE	VALOR	ESTACIÓN
A	64.6795	intercepto
b	1.4825	M380
c	-0.6646	M396
d	0.2722	M97

Fuente: Autor.

6.4.4.2 Ecuación de regresión lineal mensual para caudal máximo (inundación)

Con un valor de coeficiente de determinación ajustado del 96.86%, siendo este el de mayor valor para análisis de regresión lineal múltiple mensual con precipitaciones máximas, se obtuvo la siguiente ecuación.

Ecuación (15): Ecuación de regresión lineal mensual para caudal máximo (inundación)

$$\begin{aligned}
 Q_{max.M} = & -2292.1283 + 5.0772 \times P_{M0380_{max.M}} - 2.5003 \times P_{M0396_{max.M}} \\
 & + 4,0051 \times P_{M0126_{max.M}} - 22,3508 \times P_{M0097_{max.M}} + 7,1602 \times P_{M0381_{max.M}} \\
 & + 12,7489 \times P_{M0258_{max.M}} - 2.7323 \times P_{M0377_{max.M}} - 1.3532 \times P_{M1069_{max.M}} \\
 & + 1.3012 \times P_{M0400_{max.M}} + 4,5680 \times P_{M0599_{max.M}}
 \end{aligned}$$

Donde:

$Q_{max.M}$: Caudal máximo mensual en la estación H0800 [m³/s].

$P_{M0380_{max.M}}$: Precipitación máxima mensual de la estación M0380 [mm].

$P_{M0396_{max.M}}$: Precipitación máxima mensual de la estación M0396 [mm].

$P_{M0126_{max.M}}$: Precipitación máxima mensual de la estación M0126 [mm].

$P_{M0097_{max.M}}$: Precipitación máxima mensual de la estación M0097 [mm].

$P_{M0381_{max.M}}$: Precipitación máxima mensual de la estación M0381 [mm].

$P_{M0258_{max.M}}$: Precipitación máxima mensual de la estación M0258 [mm].

$P_{M0377_{max.M}}$: Precipitación máxima mensual de la estación M0377 [mm].

$P_{M1069_{max.M}}$: Precipitación máxima mensual de la estación M1069 [mm].

$P_{M0400_{max.M}}$: Precipitación máxima mensual de la estación M0400 [mm].

$P_{M0599_{max.M}}$: Precipitación máxima mensual de la estación M0599 [mm].

Debido a la cantidad de variables independientes y para poder tener una mejor visualización de la ecuación de regresión correspondiente, se presentan los coeficientes que deben ser multiplicados por la precipitación de cada estación en la siguiente tabla.

Tabla 38. Coeficientes de la ecuación de regresión lineal mensual para caudal máximo (inundación)

COEFICIENTE	VALOR	ESTACIÓN
A	-2292.1283	intercepto
b	5.0772	M380
c	-2.5003	M396
d	4.0051	M126
e	-22.3508	M97
f	7.1602	M381
g	12.7489	M258
h	-2.7323	M377
i	-1.3532	M1069
j	1.3012	M400
k	4.5680	M599

Fuente: Autor.

6.4.4.3 Ecuación de regresión lineal mensual para caudal mínimo (sequía)

Con un valor de coeficiente de determinación ajustado del 93.39%, siendo este el de mayor valor para análisis de regresión lineal múltiple mensual con precipitaciones mínimas, se obtuvo la siguiente ecuación.

Ecuación (16): Ecuación de regresión lineal mensual para caudal mínimo (sequía)

$$\begin{aligned}
 Q_{min.M} = & -2292.1283 + 5.0772 \times P_{M0380_{min.M}} - 2.5003 \times P_{M0396_{min.M}} \\
 & + 4,0051 \times P_{M0126_{min.M}} - 22,3508 \times P_{M0097_{min.M}} + 7,1602 \times P_{M0381_{min.M}} \\
 & + 12,7489 \times P_{M0258_{min.M}} - 2.7323 \times P_{M0377_{min.M}} - 1.3532 \times P_{M1069_{min.M}} \\
 & + 1.3012 \times P_{M0400_{min.M}} + 4,5680 \times P_{M0599_{min.M}}
 \end{aligned}$$

Donde:

$Q_{min.M}$: Caudal mínimo mensual en la estación H0800 [m³/s].

$P_{M0380_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0380 [mm].

$P_{M0396_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0396 [mm].

$P_{M0126_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0126 [mm].

$P_{M0097_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0097 [mm].

$P_{M0381_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0381 [mm].

$P_{M0258_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0258 [mm].

$P_{M0377_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0377 [mm].

$P_{M1069_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M1069 [mm].

$P_{M0400_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0400 [mm].

$P_{M0599_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0599 [mm].

Debido a la cantidad de variables independientes y para poder tener una mejor visualización de la ecuación de regresión correspondiente, se presentan los coeficientes que deben ser multiplicados por la precipitación de cada estación en la siguiente tabla.

Tabla 39. Coeficientes de la ecuación de regresión lineal mensual para caudal mínimo (sequía)

COEFICIENTE	VALOR	ESTACIÓN
A	12.6539	intercepto
b	-4.8345	M380
c	-0.2593	M396
d	-4.6664	M126
e	-0.5721	M97
f	3.4511	M381
g	-2.0126	M258
h	4.8018	M377
i	5.7515	M1069
j	-1.1010	M400
k	-0.8959	M599

Fuente: Autor.

6.4.4.4 Ecuación de regresión potencial mensual para caudal mínimo (sequía)

Con un valor de coeficiente de determinación ajustado del 97.91%, siendo este el de mayor valor para análisis de regresión potencial múltiple mensual con precipitaciones mínimas, se obtuvo la siguiente ecuación.

Ecuación (17): Ecuación de regresión potencial mensual para caudal mínimo (sequía)

$$\begin{aligned}
 Q_{min.M.Pot} = & 10^{0.2329} \times P_{M0380_{min.M}}^{-1.4444} \times P_{M0396_{min.M}}^{0.8490} \\
 & \times P_{M0126_{min.M}}^{-0.5222} \times P_{M0097_{min.M}}^{-0.6387} \times P_{M0381_{min.M}}^{0.8368} \\
 & \times P_{M0258_{min.M}}^{0.1938} \times P_{M0377_{min.M}}^{1.0640} \times P_{M1069_{min.M}}^{1.5182} \\
 & \times P_{M0400_{min.M}}^{-0.4228} \times P_{M0599_{min.M}}^{-0.8890}
 \end{aligned}$$

Donde:

$Q_{min.M.Pot}$: Caudal mínimo mensual en la estación H0800 [m³/s].

$P_{M0380_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0380 [mm].

$P_{M0396_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0396 [mm].

$P_{M0126_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0126 [mm].

$P_{M0097_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0097 [mm].

$P_{M0381_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0381 [mm].

$P_{M0258_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0258 [mm].

$P_{M0377_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0377 [mm].

$P_{M1069_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M1069 [mm].

$P_{M0400_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0400 [mm].

$P_{M0599_{min.M}}$: Precipitación mínima mensual de la estación M0599 [mm].

Debido a la cantidad de variables independientes y para poder tener una mejor visualización de la ecuación de regresión correspondiente, se presentan los coeficientes que deben ser multiplicados por la precipitación de cada estación en la siguiente tabla.

Tabla 40. Coeficientes de la ecuación de regresión lineal potencial para caudal mínimo (sequía)

COEFICIENTE	VALOR	ESTACIÓN
A	0.2329	intercepto
b	-1.4444	M380
c	0.8490	M396
d	-0.5222	M126
e	-0.6387	M97
f	0.8368	M381
g	0.1938	M258
h	1.0640	M377
i	1.5182	M1069
j	-0.4228	M400
k	-0.8890	M599

Fuente: Autor.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

El desarrollo y aplicación de ecuaciones de regresión para la estimación de caudal de ríos en el Ecuador sí es factible. Sin embargo se debe considerar que los registros de caudal y de precipitación disponibles en el país se encuentran con una gran cantidad de vacíos, por lo que se debe tomar a los mismos con criterio para poder desarrollar ecuaciones con un alto grado de confiabilidad.

Las ecuaciones de regresión son propias de cada región y no pueden usarse en otros lugares. Es así que se demostró que las ecuaciones de regresión desarrolladas en Estados Unidos no pueden ser aplicadas en el Ecuador. Esto es debido a que existen demasiadas diferencias geográficas, hidrológicas y meteorológicas, las cuales influyen en los parámetros que se consideran para el desarrollo de dichas ecuaciones. Sin embargo, la aplicación de estas ecuaciones en regiones con características similares puede ser tomada como un punto de partida para el desarrollo de ecuaciones de regresión de la región a ser analizada.

Tanto la selección de la cuenca hidrográfica, como la estación hidrográfica a ser utilizadas son muy importantes ya que son el punto de partida para el desarrollo de las ecuaciones de regresión. De igual manera, se debe tomar en cuenta que la estación hidrográfica puede estar leyendo el caudal de dos cuencas hidrográficas, tal como es el caso del Río Pastaza el cual es producto de la confluencia de los Ríos Chambo y Patate.

El desarrollo de ecuaciones de regresión mensual resulta más viable que el desarrollo de ecuaciones de regresión anual. Esto se debe a que en el análisis anual existen vacíos que se presentes en todos los meses del año analizado, lo que dificulta realizar el análisis con al menos datos de 10 años ininterrumpidos. Por otra parte, para el análisis mensual, no existe gran cantidad de vacíos presentes en los años del mismo mes específico a ser analizado.

Al comparar las ecuaciones de regresión lineal simple con las ecuaciones de regresión lineal múltiple o multicriteria, se pueden observar mejores resultados en aquellas ecuaciones donde existe más de una variable independiente. Es decir, para los tres tipos de caudales analizados, el valor del coeficiente de determinación aumenta con el análisis múltiple. Sin embargo, esto no quiere decir que a mayor cantidad de variables existe un aumento en el coeficiente de determinación ajustado, tal como es el caso del caudal promedio. De igual manera, se puede observar que no necesariamente las estaciones con mejores resultados individuales presentan los mejores resultados al utilizarlas de manera simultánea en el análisis múltiple, por lo que se deberían realizar análisis de la mayor cantidad de combinatorias posibles.

Las ecuaciones de regresión potencial presentan mejores resultados que las ecuaciones de regresión lineal en casos donde el coeficiente de determinación es relativamente bajo. Sin embargo, cuando el coeficiente de determinación en el análisis lineal tiene valores medios y altos, no necesariamente se observa esta mejora en todos los casos. Por lo tanto, es aconsejable realizar ambos análisis para poder escoger la ecuación que presente la mayor correlación posible entre variables. De esta comparación se obtuvo que el análisis de regresión potencial mensual multicriteria para caudal mínimo (sequía) presentó mejores resultados que el análisis lineal, obteniendo un coeficiente de determinación de 97.91%. Al ser un valor tan cercano al 100%, se puede afirmar que la ecuación obtenida estima el caudal de una manera altamente satisfactoria, por lo que se puede considerar que el valor del caudal calculado es sumamente confiable.

Las ecuaciones de regresión lineal mensual presentan resultados altamente satisfactorios para el caudal promedio, el caudal máximo (inundación) y el caudal mínimo (sequía), siendo estos del 90.46%, 96.86% y 93.39% respectivamente. Al ser valores altos, las ecuaciones desarrolladas presentan un elevado grado de correlación entre las variables independientes (precipitaciones) y la variable dependiente (caudal).

Las ecuaciones de regresión lineal anual presentan resultados aceptables para el caso de caudal promedio y para caudal máximo (inundación), siendo estos del 82.45% y del 84.93% respectivamente. Sin embargo, para el caso del caudal mínimo (sequía) se obtuvo un valor de coeficiente de determinación ajustado de tan solo el 35.49%.

Con los resultados obtenidos, se puede concluir que la utilización de aquellas ecuaciones con un alto grado de confiabilidad, es decir con un coeficiente de determinación mayor al 90% es acertada. Por lo tanto es factible y aconsejable la aplicación de la ecuación de regresión potencial mensual, así como las ecuaciones de regresión lineal mensuales mostradas para el diseño y construcción de estructuras civiles e hidráulicas. Por otra parte, se aconseja que para el caudal anual promedio y máximo se utilice la ecuación de regresión correspondiente, pero se compruebe con otro método de estimación. Finalmente, se considera que no es aconsejable la utilización de la ecuación de regresión lineal anual para el caudal mínimo y se deberían emplear otros métodos de estimación de caudal mínimo en este río.

Las ecuaciones que describen el caudal promedio pueden ser aplicadas para tener pleno conocimiento del caudal del Río Pastaza, lo que podría ser de gran utilidad si se planea realizar una presa, hidroeléctrica o la captación para consumo humano. De igual manera, las ecuaciones que describen el caudal máximo pueden ser utilizadas para la prevención de inundaciones y desbordamientos del río, así como también para tener en cuenta la crecida máxima y diseñar adecuadamente estructuras como puentes teniendo en cuenta el gálibo. Por último, las ecuaciones que describen el caudal mínimo pueden ser utilizadas para prevenir el desabastecimiento en épocas de sequía, así como una disminución de la energía que puede generar el río en proyectos hidroeléctricos.

7.2 Recomendaciones

Entre las principales recomendaciones está la utilización de ecuaciones de regresión de regiones similares como punto de partida para el desarrollo de ecuaciones de regresión propios de la región a ser estudiada. Así mismo, se deben conocer los parámetros más influyentes en el caudal del río a ser analizado, tal como es el caso de la precipitación. Si bien la precipitación registrada en diversas estaciones fue el único parámetro utilizado en este estudio, eso no limita o excluye la presencia de otros parámetros como área o elevación que pueden ser utilizados en otro tipo de análisis, especialmente si se toma como set de datos las estaciones y cuencas.

Además se deben utilizar registros actualizados para obtener una información más precisa. De igual manera, se deben tomar en cuenta como datos para las regresiones, aquellos que no presenten una cantidad excesiva de vacíos en sus registros, y en caso de hacerlo, tomarlos con mucho criterio. Se puede realizar un relleno de estos vacíos, así como también promedios excluyentes.

Así mismo en cuanto al análisis de datos, se recomienda la realización de la mayor cantidad de combinaciones posibles para los análisis multicriteria. No siempre aquellas estaciones con los mejores resultados individuales presentan los mejores resultados multicriteria. Finalmente, es de gran importancia realizar el análisis de regresión lineal, así como el análisis de regresión potencial ya que un modelo u otro pueden explicar de mejor manera la correlación entre la variable dependiente con las variables independientes, dependiendo de las estaciones que se escojan para el análisis simple o multicriteria.

8. REFERENCIAS

- Ahearn, E. (2004). *Regression Equations for Estimating Flood Flows for the 2-, 10-, 25-, 50-, 100-, and 500-Year Recurrence Intervals in Connecticut*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004–5160. Recuperado desde: <https://pubs.usgs.gov/sir/2004/5160/pdf/sir2004-5160.pdf>
- Capesius, J. and Stephens, V. (2009). *Regional regression equations for estimation of natural streamflow statistics in Colorado*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2009–5136. Recuperado desde: <https://pubs.usgs.gov/sir/2009/5136/pdf/SIR09-5136.pdf>
- Chow, V., Maidment, D., and Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- García, F. (2015). *Situación Actual del Estado Operativo de los Sistemas de observación y de Información Hidrometeorológicas en el Ecuador*. II Foro Climático Nacional. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Recuperado desde: [http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/ForosClimaticos/Foros%20Nacionales/2015/II%20Foro/SISTEMAS%20DE%20OBSERVACION%20E%20INF.%20HIDROLOGICA%20\(INAMHI\).pdf](http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/ForosClimaticos/Foros%20Nacionales/2015/II%20Foro/SISTEMAS%20DE%20OBSERVACION%20E%20INF.%20HIDROLOGICA%20(INAMHI).pdf)
- Gribbin, J. (2007). *Hidráulica e Hidrología* (3ra Ed.). Quito. Cengage Learning.
- Heras, R. (1972). *Manual de Hidrología*. Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid.
- Hershfield, D. (1961). *Rainfall Frequency Atlas of the United States for Durations from 30 Minutes to 24 Hours and Return Periods of 1 to 100 Years (Tech. Paper 40)*. Silver Spring, MD: U.S. National Weather Service. Recuperado desde: http://www.nws.noaa.gov/oh/hdsc/PF_documents/TechnicalPaper_No40.pdf
- Ibáñez, S. Moreno, H. Gisbert, JM. (2011). *Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía (c)*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Universitat Politècnica de València. España. Recuperado desde: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10781/Coeficiente%20de%20escorrent%20C3%ADa.pdf>
- Jaramillo, S. & Apolo, W. (2015). *Afectaciones por la explotación petrea en el cauce del río Pita, sector Playas de Ojiva, cantón Babahoyo, provincia de los Ríos. Propuesta de soluciones*. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Recuperado desde: <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/90940/D-70131.pdf>
- Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos* (6ta Ed.). México. Pearson Education.

- Ponce, V. (2014). *ENGINEERING HYDROLOGY, PRINCIPLES AND PRACTICES*. Segunda Versión Digital. Recuperado desde: <https://ponce.sdsu.edu/enghydro/>
- Ramirez, J. (s.f). *Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves*. Colorado State University. Hydrologic Science and Engineering. Recuperado desde: http://www.engr.colostate.edu/~ramirez/ce_old/classes/cive322-Ramirez/IDF-Procedure.pdf
- Salas, J. and Obeysekera, J. (2014). *Revisiting the Concepts of Return Period and Risk for Nonstationary Hydrologic Extreme Events*. American Society of Civil Engineers (ASCE). Journal of Hydrological Engineering. Volume 19, Issue 3. Recuperado desde: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000820](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000820)
- SENAGUA (2011). *Base de datos de Información Geográfica*. Quito, Ecuador. Recuperado desde: <http://sni.gob.ec/coberturas>.
- Simon, A. L., and Korom, S. F. (1997). *Hydraulics* (4th Ed.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- USGS. (2017). *Methods for Estimating Selected Low-Flow Frequency Statistics and Mean Annual Flow for Ungaged Locations on Streams in North Georgia*. Georgia, United States. Scientific investigation report.
- Vera, L. (2001). *Análisis de Aforo de la Estación Hidrométrica Obrajillo*. Universidad Mayor de San Marcos. Recuperado desde: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/Vera_H_L/Cap3.pdf
- Williams-Sether, T. (2015). *Regional regression equations to estimate peak-flow frequency at sites in North Dakota using data through 2009*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2015–5096. Recuperado desde: <http://dx.doi.org/10.3133/sir20155096>.
- Yépez, M. (2015). *Los Recursos Naturales y el Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Pontificia Universidad Católica. Recuperado desde: <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8749/LOS%20RECURSOS%20NATURALES%20Y%20EL%20MANEJO%20DE%20CUENCAS%20HIDROGR%C3%81FICAS.pdf;sequence=1>

9. ANEXOS

Anexo 1: Mapa de estaciones hidrométricas operativas, año 2015.

