CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.
POSGRADO

ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR ESCURRIMIENTOS NATURALES EN SITIOS NO AFORADOS DE UNA CUENCA HIDROLÓGICA INSTRUMENTADA

Tesis que como requisito para obtener el grado de :

Maestro en Ciencia y Tecnología Ambiental

Presenta:

I.C. Claudia Annette Fernández Pérez

Directores de tesis:

Dr. Eduardo Florencio Herrera Peraza

Dr. Humberto Silva Hidalgo

Chihuahua, Chih., Diciembre de 2011

Dedicatoria

La tesis la dedico con todo mi amor a ti, mi DIOS.

Gracias por regalarme una familia maravillosa , por tus bendiciones, por darme salud y la fuerza necesaria para poder salir adelante, por tener la oportunidad de alcanzar una meta más y por darme la esperanza de terminar este trabajo.

Agradecimientos

A mis padres pilares fundamentales en mi vida dignos de ejemplo de trabajo, honestidad y constancia, gracias por estar siempre conmigo, por impulsarme día a día, por recordarme que hay que luchar siempre y que todo se consigue con esfuerzo y dedicación, a ustedes les debo todo lo que soy, siempre me he sentido amada y apoyada, los amo.

A mi mamá Nelly Pérez Flores por su amor incondicional, por motivarme, por darme esa energía positiva en todo momento, por ser tan cariñosa conmigo, por preocuparte por mi, por comprenderme y estar conmigo siempre a mi lado, por darme seguridad y transmitirme confianza.

A mi papá Luis Roberto Fernández Guillén por su amor incondicional, gracias porque siempre confiaste en mí, trasmitiéndome siempre una fuerza para cumplir todos mis objetivos, por tu apoyo incondicional, por regalarme tantas palabras de aliento, por tus sabios consejos, siempre me sentí identificada contigo.

A mis hermanos por darme tanta alegría, siempre haciendome reir, por estar conmigo siempre, a Liliana Lizzette Fernández Pérez por todas las bellas etapas que hemos compartido, a Octavio Fernández Pérez por enseñarme a disfrutar cada momento de la vida, hermanos los amo.

A Jesús Rubén Sánchez Navarro el amor de mi vida, por todo su amor, apoyo, comprensión y por la felicidad que me brinda, por conseguir un equilibrio para dar lo que soy. Gordo te amo.

A mi familia, abuelos (†), tíos, tías, primos, primas, sobrinos y sobrinas, por todo su cariño y apoyo a lo largo de mi vida, los quiero mucho.

A mis amigos, por siempre acompañarme, por su comprensión a lo largo de mi vida, siempre dandome cariño y muestras de aliento.

A mi director externo de tesis Dr. Humberto Silva Hidalgo, por su don de gente, sencillez, compartir su tiempo, orientación, consejos, estímulo, atención y compartir sus grandes conocimientos.

A mi director interno de tesis Dr. Eduardo Florencio Herrera Peraza por confiar en mi, por todo su apoyo, interés, comprensión y por todos sus comentarios al dirigir esta tesis.

A todos mis profesores que han ayudado a mi formación Dra. María Elena Montero Cabrera, Dr. Guillermo González Sánchez, Dra. María Teresa Alarcón

Herrera, Dr. Ignacio Martín Domínguez, Dra. Luz Leal Quezada, Dr. Alfredo Campos Trujillo y Dr. José Alberto Duarte Moller.

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) la labor que desarrolla en México para apoyar la investigación y por la beca que me otorgó durante el periodo de 2009-2011 para realizar mis estudios de maestría.

Al Centro de Estudios en Materiales Avanzados, insitución que me brindo la oportunidad de superarme.

CONTENIDO

Índice de figuras……..ix
Índice de Tablas…… ……..xi
ABSTRACT..... xii
Resumen..... xiv

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN 1

1.1.- Antecedentes 1
1.2.- Planteamiento del problema 4
1.3.- Hipótesis de trabajo 4
1.4.- Alcances y Objetivos 4
1.4.1.- Objetivo general..... 4
1.4.2.- Objetivos específicos..... 4
1.5 Justificación 5
1.6.- Metodología..... 5
1.6.1.- Recopilación y análisis de información. 5
1.6.2.- Revisión de métodos existentes para determinar escurrimientos naturales en sitios no aforados de una cuenca instrumentada...... 6
1.6.3.- Aplicación de métodos en la cuenca de estudio 6
1.6.4 Análisis de resultados y formulación de recomendaciones..... 7

CAPÍTULO 2.- Escurrimientos naturales en cuencas hidrológicas 8

2.1.- Definiciones..... 8
2.1.1.- Escurrimiento natural..... 8
2.1.2 Escurrimientos superficiales aforados (registros de hidrometría) 8
2.2.- Importancia de los escurrimientos naturales para fines de planeación..... 9
2.3.- Determinación de escurrimientos naturales en cuencas aforadas 9
2.4.- Determinación de escurrimientos naturales en cuencas no aforadas 11
2.5.- Importancia de la distribución mensual de escurrimientos naturales en una cuenca..... 11

CAPÍTULO 3.- Métodos para determinar escurrimientos naturales en cuencas no aforadas...... 12

3.1.- Clasificación de métodos 12
3.2.- Métodos desarrollados para la escala de tiempo anual..... 13
3.2.1.- Método del área..... 13
3.2.2.- Método de área y precipitación 14
3.2.3.- Método de Heras..... 14
3.2.4.- Método de Becerril..... 16
3.2.5.- Método de Temez 17

3.2.6.- Método de Turc 18
3.2.7.- Método de Coutagne..... 19
3.2.8.- Método de Langbein 20
3.2.9.- Método de Smith..... 21
3.2.10.- Método del coeficiente de escurrimiento 22
3.3.- Métodos desarrollados para la escala de tiempo mensual..... 25
3.3.1.- Método del Balance Hídrico Edafológico..... 25
3.3.2.- Método del U.S. Soil conservation service para zonas agrícolas 31
3.3.3.- Método de los Fragmentos 31
3.4.- Métodos desarrollados originalmente para su aplicación a la escala de tiempo anual, aplicados a la escala de tiempo mensual..... 32
3.4.1.- Problemática que presentan los métodos desarrollados para su aplicación a la escala de tiempo anual cuando se pretende su utilización a la escala de tiempo mensual. 32
3.4.2.- Propuesta de solución 32
3.4.3.- Método de los fragmentos en la cuenca de estudio 33
3.4.4.- Método de los fragmentos en combinación con los métodos de estimaciónde los escurrimientos superficiales anuales, para determinar los escurrimientos superficiales mensuales. 33

CAPÍTULO 4.- Determinación de escurrimientos naturales en un sitio interior de la cuenca media-alta del río Florido, en el Estado de Chihuahua (Caso de estudio)..... 34

4.1.- La cuenca media-alta del río Florido en el Estado de Chihuahua..... 34
4.1.1.- Ubicación..... 34
4.1.2.-Clima 35
4.1.3.- Hidrografía..... 37
4.1.4.- Infraestructura para el almacenamiento de agua 37
4.1.5.- Hidrometría..... 38
4.1.6.-Sitio de interés no aforado..... 38
4.1.7.- Discretización espacial de la zona de estudio 39
4.2.- Características físicas de las cuencas en la zona de estudio..... 40
4.2.1.- Geomorfología de la cuenca..... 40
4.2.1.1.- Área o magnitud de la cuenca (A).-..... 40
4.2.1.2.- Perímetro de la cuenca (P).- 41
4.2.1.3.- Geomorfología del colector principal..... 42
4.2.1.3.1.- Longitud del colector principal..... 42
4.2.1.4.- Parámetros de forma..... 42
4.2.1.4.1.- Índice de pendiente (Ip)..... 42
4.2.1.4.2.- Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (Cc).-43
4.2.2.- Tipo de Suelo..... 43
4.2.3.- Cobertura vegetal 45
4.2.4.- Coeficientes de escurrimiento..... 46
4.3.- Climatología 47

4.3.1.- Estaciones climatológicas en la zona de estudio 48
4.3.2.- Precipitación mensual y anual..... 48
4.3.3.- Temperatura mensual y anual..... 50
4.4.- Escurrimientos naturales restituidos en sitios aforados 51
4.4.1 Escurrimientos naturales restituidos anuales..... 51
4.4.2 Escurrimientos naturales restituidos mensuales 53
4.5.- Escurrimientos naturales anuales estimados por métodos indirectos 55
4.5.1.- Métodos basados en el transporte y similitud de cuencas 55
4.5.1.1.-Importancia de la similitud de cuencas para el empleo de los métodos de transporte 59
4.5.2.-Métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica..... 61
4.6.-Escurrimientos naturales mensuales estimados por métodos indirectos 62
4.6.1.- Métodos desarrollados para escala de tiempo mensual..... 62
4.6.1.1.- Método del Balance Hídrico Edafológico 62
4.6.2.- Métodos originalmente desarrollados para escala de tiempo anual aplicados a la escala mensual 63
4.6.2.1.-Método del área aplicado a la escala de tiempo mensual..... 63
4.6.2.2.- Aplicación del método de los fragmentos en combinación con otros métodos anuales para obtener su distribución mensual .. 65
4.6.2.2.1.- Métodos de transporte y similitud de cuencas 65
4.6.2.2.2.- Métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica..... 67

CAPÍTULO 5.- Modificación y adaptaciones a métodos existentes para la estimación de escurrimientos naturales a las escalas de tiempo anual y mensual. 71

5.1.- Método de área y precipitación..... 71
5.1.1.- Problemática que presenta el método de área y precipitación para su aplicación a la escala de tiempo mensual 71
5.1.2.- Método de área y precipitación Modificado 72
5.2. - Método de Heras..... 73
5.2.1. - Método de Heras Modificado 74
5.3. - Método de Becerril 74
5.3.1. - Método de Becerril Modificado..... 75
5.4.- Método de Smith 75
5.4.1.- Método de Smith adaptado a la zona de estudio..... 76
5.5.- Método del coeficiente de escurrimiento..... 77
5.5.1.- Método del coeficiente de escurrimiento adaptado a la subcuenca de estudio..... 77
5.6.- Métodos de Temez, Turc, Coutagne y Langbein..... 77

5.7.- Resultados de métodos modificados y adaptados a la zona y subcuenca de estudio para la estimación de escurrimientos naturales a las escalas de tiempo anual y mensual 78
5.7.1.- Métodos nuevos desarrollados a escala mensual para determinar escurrimientos naturales en cuencas no aforadas 78
5.7.2.- Métodos de Smith y del coeficiente de escurrimiento (K) adaptados a la zona y subcuenca de estudio 80

CAPÍTULO 6.- Análisis de resultados generados por los diferentes métodos, para determinar escurrimientos naturales en sitios interiores de una cuenca aforada 83

6.1.-Medidas de evaluación del desempeño de los métodos 84
6.2.-Métodos anuales 84
6.3.- Métodos anuales combinados con el método de fragmentos para su aplicación a la escala de tiempo mensual 87
6.4.-Métodos mensuales autocontenidos 89

7.- CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y ÁREAS DE OPORTUNIDAD PARA LA INVESTIGACIÓN 91

7.1.- Conclusiones 92
7.1.1.-Métodos anuales (estado original): 92
7.1.2.-Métodos mensuales: 93
7.1.3.-Métodos anuales combinados con el método de los fragmentos 93
7.1.4.-Métodos modificados y adaptados a la zona y subcuenca de estudio 94
7.2.- Recomendaciones 95
7.3.- Áreas de oportunidad para la investigación 96

REFERENCIAS 97

Índice de figuras

Figura 1.1.- Distribución de agua en el planeta.....1
Figura 3.1.- Métodos para determinar escurrimientos naturales en cuencas no aforadas.....13
Figura 3.2.- Relación entre el índice climático de la cuenca y el coeficiente de escurrimiento (Smith, R. L., 1973).....22
Figura 4.1.- Localización de la cuenca media-alta del río Florido.....35
Figura 4.2 Mapa de climas del Estado de Chihuahua. (INEGI, 2011).....36
Figura 4.4.- Discretización espacial de la zona de estudio.....39
Figura 4.3.- Localización de estaciones hidrométricas e infraestructura.....38
Figura 4.5.- Parámetros geomorfológicos de las subcuencas de las presas San Gabriel y Pico de Águila y de la Estación Hidrométrica Jiménez.....41
Figura 4.6.- Tipo de suelo de la Cuenca media-alta del río Florido.....44
Figura 4.7.- Uso del suelo de la cuenca media alta del río Florido.....46
Figura 4.8.- Precipitación media mensual de la subcuencas de la zona de estudio para el periodo de 1964 al 2002.....48
Figura 4.9.- Precipitación media anual en la zona de estudio.....49
Figura 4.10.- Polígonos de Thiesen para la zona de estudio.....49
Figura 4.11.- Temperatura media mensual de la subcuencas de la zona de estudio para el periodo de 1964 al 2002.....50
Figura 4.12.- Precipitación media anual en la zona de estudio.....50
Figura 4.13.- Polígonos de Thiessen para la zona de estudio.....51
Figura 4.14.- Escurrimientos naturales anuales restituidos en la subcuenca SG para el periodo de 1964 al 2002.....52
Figura 4.15.- Escurrimientos naturales anuales restituidos en la subcuenca EHJ para el periodo de 1964 al 2002.....52
Figura 4.16.- Escurrimientos naturales anuales restituidos en la subcuenca PA para el periodo de 1994 al 2002.....53
Figura 4.17.- Escurrimientos naturales mensuales restituídos en la subcuenca SG para el periodo de 1964 al 2002.....53
Figura 4.18.- Escurrimientos naturales mensuales restituídos en la subcuenca EHJ para el periodo de 1964 al 2002.....54
Figura 4.19.- Escurrimientos naturales mensuales en la subcuenca de la presa Pico de Águila para el periodo de 1994 al 2002.....54
Figura 4.20 Transporte de información hidrométrica.....55
Figura 4.21 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila transportando información hidrométrica de la cuenca de San Gabriel para los años de 1964 al 2002.....56
Figura 4.22 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila transportando información hidrométrica de la cuenca de Estación Hidrométrica Jiménez para los años de 1964 al 2002.....56
Figura 4.23 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila transportando información hidrométrica de la cuenca del área total para los años de 1964 al 2002.....57
Figura 4.24 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila transportando información hidrométrica de la cuenca de San Gabriel para los años de 1994 al 2002.....57
Figura 4.25 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila transportando información hidrométrica de la cuenca de Estación Hidrométrica Jiménez para los años de 1994 al 2002.....58

Figura 4.26 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila transportando información hidrométrica de la cuenca del área total para los años de 1994 al 2002. 58
Figura 4.27 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica de 1964 al 2002....61
Figura 4.28 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica de 1994 al 2002....62
Figura 4.29 Escurrimientos naturales promedio mensuales en la cuenca de Pico de Águila utilizando el método del balance hídrico edafológico para el periodo de 1994 al 2002. 63
Figura 4.30 Promedio del volumen escurrido mensual en el periodo de tiempo de 1994 al 2002, transportando información hidrométrica de EHJ, SG, AT. 64
Figura 4.31 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando el método del Área para el periodo de 1994 al 2002.....64
Figura 4.32 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando el método del Área para el periodo de 1964 al 2002.....65
Figura 4.33 Promedio del volumen natural escurrido mensual en el periodo de tiempo de 1994 al 2002. 66
Figura 4.34 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando los métodos de transporte y similitud de cuencas en combinación con el método de los fragmentos de 1994 al 2002. 66
Figura 4.35 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando los métodos de transporte y similitud de cuencas en combinación con el método de los fragmentos de 1994 al 2002. 67
Figura 4.36 Promedio del volumen natural escurrido mensual en el periodo de 1994 al 2002. 68
Figura 4.37 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica en combinación con el método de los fragmentos de 1994 al 2002. 69
Figura 4.38 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica en combinación con el método de los fragmentos de 1994 al 2002. 69
Figura 4.39 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica en combinación con el método de los fragmentos de 1964 al 2002. 70
Figura 5.1.- Relación entre el índice climático de la cuenca y el coeficiente de escurrimiento en la subcuenca del área total (cuenca media-alta del río Florido).....76
Figura 5.2.- Escurrimientos anuales en la cuenca de Pico de Águila estimados por los diferentes métodos desarrollados para escala de tiempo mensual para el periodo de 1994 al 2002. 78
Figura 5.3.- Promedio del volumen escurrido mensual en el periodo de 1994 al 2002.....79
Figura 5.4.- Escurrimientos naturales mensuales determinados por el método de área y precipitación modificado para el periodo de 1964 al 2002 79
Figura 5.5.- Escurrimientos naturales mensuales determinados por el método de área y precipitación modificado para el periodo de 1994 al 2002 80
Figura 5.6.- Escurrimientos anuales en la cuenca de Pico de Águila estimados por los métodos de Smith y el método del coeficiente de escurrimiento (k) adaptados a la zona de estudio para el periodo de 1994 al 2002 80
Figura 5.7.- Promedio del volumen escurrido mensual en el periodo de tiempo de 1994 al 2002. 81

Figura 5.8.- Escurrimientos naturales mensuales determinados por los métodos de Smith adaptado a la zona de estudio y k adaptado a la subcuenca de estudio para el periodo de 1964 al 2002.....81
Figura 5.9.- Escurrimientos naturales mensuales determinados por los métodos de Smith adaptado a la zona de estudio y k adaptado a la subcuenca de estudio para el periodo de 1994 al 2002.....82
Figura 6.1.- Métodos para determinar escurrimientos naturales.....83

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Parametros mundiales para la evaluación de la disponibilidad de agua 2
Tabla 3.1.- Valores de β (Heras,1976) 16
Tabla 3.2.- Duración promedio máxima diaria de horas de insolación (Martín, 1976) 18
Tabla 3.3.- Relación entre *P* y *Ft* (Langbein *et al.*, 1949).....21
Tabla 3.4.- Tipos de suelo y características (SEMARNAT, 2002).....23
Tabla 3.5.- Valores de k, en función del tipo y uso de suelo (SEMARNAT, 2002).....24
Tabla 3.6.- Fórmulas para el cálculo de escurrimiento anual (SEMARNAT, 2002) 24
Tabla 3.7.- Capacidades de almacenamiento de agua según el suelo y cultivo 27
Tabla 3.8.- Humedad retenida en el suelo según las láminas de agua utilizable en evapotranspiración, suelo con capacidad de agua utilizable de 100mm.....30
Tabla 4.1.- Principales presas de almacenamiento en la cuenca media-alta del río Florido...37
Tabla 4.2.- Subcuencas de la cuenca media-alta del río Florido (Discretización espacial)....40
Tabla 4.3.- Longitudes del colector principal de las subcuencas Pico de Águila, San Gabriel y Estación Hidrométrica Jiménez.....42
Tabla 4.4.- Clasificación de suelos en la cuenca media-alta del río Florido.....44
Tabla 4.5.- Valores de Ce de las subcuencas de la cuenca media-alta del río Florido 46
Tabla 4.6.- Valores de "k" de las subcuencas de la cuenca media-alta del río Florido 47
Tabla 4.7.- Volumenes medios anuales y desviaciones estándar en la presa Pico de Águila, utilizando los métodos de transporte y similitud de cuencas y restituidos para el periodo de 1994 al 2002.....59
Tabla 4.8.- Parámetros Hidroclimatológicos y Geomorfológicos de la zona de estudio.....60

Tabla 6.1.- Análisis de resultados de los métodos de área, área y precipitación, Heras y Becerril con respecto a los de Pico de Águila 85
Tabla 6.2.- Análisis de resultados de los métodos de Temez, Turc, Coutagne, Langbein, Smith y Coeficiente de escurrimiento con respecto a los de Pico de Águila 86
Tabla 6.3.- Análisis de resultados de los métodos de área y precipitación, Heras y Becerril con respecto a los de Pico de Águila 87
Tabla 6.4.- Análisis de resultados de los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica con respecto a los de Pico de Águila 88
Tabla 6.5.- Análisis de resultados de métodos autocontenidos con respecto a los de Pico de Águila 90

ABSTRACT

In our planet, also denominated blue, there is a 2.5% fresh water, but this is unequally distributed in time and space, the average per capita availability of water plays a key role in planning, administration and management integrated watershed in a country.

In arid and semiarid areas, the problem of water scarcity due to the irregular spatial and temporal distribution of rainfall. The water availability is a determining factor in everyday life. The National Water Commission and other government agencies have found that for many states of Mexico the available fresh water is being used at unsustainable levels or inadequate. It is therefore necessary to determine the availability of water with the real value as possible, in each of the areas of the country, through one or more nationally consistent methodologies. The annual average availability of national surface water acts as a technical basis for their operation, use or utilization of rational and equitable manner.

Evaluation of methods for determining runoff in ungauged basins at different scales of time, is very important to design policies for water resource management in the short, medium or long term. Knowing their occurrence in time, it is essential to rethink use policies in a sustainable way watershed.

The monthly time scale to visualize the runoff throughout the year in a more real and objective.

This research analyzes and evaluates the methods for determining runoff in ungauged basins at annual and monthly time.

We applied transport and similiarity of watershed methods and another methods based on physical and climatological information parameters of watershed for annual and monthly time scale.

The annual application of methods in their original condition was performed satisfactorily, but were not monthly time scale, because it was found impossible to use methods originally developed for application to this scale, except for the area method , that work without problems. It also proposes a solution to this problem by combining annual methods with the method of fragments, which is totally feasible when there is a volumetric basin with a close similarity to the ungauged basin that is being studied.

Additionally, we proposed a change to the original methods of precipitation and area, Heras and Becerril, since monthly time scale there is a low or no correlation between the runoff during the months of drought and precipitation in the same period. For one or more of these problems occur, would require that the annual rainfall in one or both basins were zero, which is statistically and physically

improbable.
With these problems identified in the calculations, it was possible to find a better rainfall-runoff relationship with satisfactory results.

The current investigation was the need to adapt two methods to the study area to obtain more consistent results with the observed data. The methods were 1) the method of Smith adapted to the study area and 2) the method runoff coefficient (K) fitted to the watershed, the latter proposed by the Mexican Official Norm NOM-011-CNA-2000.

Adequately determine the runoff in ungauged basins, allows for new patterns of water resource management, as water availability of space and time, you can determine the best way to use it or distribute along the hydrologic watershed , as much as possible to the actual conditions .

Resumen

En nuestro planeta, el denominado azul, solo existe un 2.5% de agua dulce, pero esta se encuentra repartida desigualmente en el tiempo y en el espacio, por ello determinar la disponibilidad media per cápita de agua tiene un papel fundamental en la planeación, administración y manejo integral de las cuencas de un país.

En zonas áridas y semiáridas, el problema de la escasez del agua obedece a la irregular distribución espacial y temporal de lluvia. En vista de lo anterior la disponibilidad de agua es un factor determinante para la vida diaria. La Comisión Nacional de Agua y otras instancias gubernamentales han detectado que para muchos estados de la República Méxicana el agua dulce disponible se está utilizando a niveles insostenibles o inadecuados. Por ello es necesario determinar la disponibilidad de agua con el valor mas real posible, en cada una de las zonas del país, a través de una o varias metodologías consistentes a nivel nacional. La disponibilidad media anual de aguas nacionales superficiales actua como base técnica para su explotación, uso o aprovechamiento, de manera racional y equitativa.

La evaluación de métodos para determinar escurrimientos naturales en cuencas no aforadas a diversas escalas de tiempo, es de suma importancia para diseñar políticas de manejo de los recursos hídricos a corto, mediano o largo plazo. Conocer su ocurrencia en el tiempo, es fundamental para replantear políticas de aprovechamiento de manera sustentable en una cuenca hidrológica.

La escala temporal mensual permite visualizar los escurrimientos naturales a lo largo del año de una manera mas real y objetiva.

La presente investigación analiza y evalúa los métodos para determinar escurrimientos naturales en cuencas no aforadas a escala de tiempo anual y mensual.

Se aplicarón los métodos de transporte y similitud de cuencas y métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica a escala temporal anual y mensual.

La aplicación de los métodos anuales en su condición original se realizó de manera satisfactoria, no siendo así a escala de tiempo mensual, ya que se observó la imposibilidad de emplear los métodos desarrollados originalmente para su aplicación a esa escala, a excepción del método del área, que funcionó sin problemas. Asimismo se propone la solución a este problema combinando los métodos anuales con el método de los fragmentos, lo que resulta totalmente factible cuando existe una cuenca aforada con alto grado de similitud, a la cuenca no aforada que está siendo estudiada.

Adicionalmente se planteó una modificación a los métodos originales de área y precipitación, Heras y Becerril, ya que a escala de tiempo mensual existe una baja o nula correlación entre el escurrimiento durante los meses de estiaje y la precipitación en ese mismo periodo. Para que alguno o varios de estos problemas se presentaran, se necesitaría que la precipitación anual en alguna o ambas cuencas fuese nulo, lo que resulta estadística y físicamente improbable.
Gracias a estos problemas detectados en los cálculos realizados, se logró encontrar una mejor relación de precipitación-escurrimiento obteniendo resultados satisfactorios.

La actual investigación se vio en la necesidad de adaptar dos de los métodos a la zona de estudio, para obtener resultados mas consistentes con los datos observados. Los métodos fueron 1) el método de Smith adaptado a la zona de estudio y 2) el método del coeficiente de escurrimiento (K) adaptado a la subcuenca de estudio, este último propuesto por la norma oficial mexicana NOM-011-CNA-2000.

Determinando de manera adecuada los escurrimientos naturales en cuencas no aforadas, permite establecer nuevos esquemas de manejo del recurso hídrico, ya que conociendo la disponibilidad de agua espacial y temporalmente, se podrá determinar la mejor forma de aprovecharlo o distribuirlo a lo largo de una cuenca hidrológica, apegándose lo mas posible a las condiciones reales actuales.

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Antecedentes

El agua es considerada un factor trascendental que permite o limita el progreso de los países, por esta razón establecer su aprovechamiento sustentable, es indispensable para el desarrollo económico, social y buen funcionamiento de los ecosistemas en el planeta (FNUAP, 2001).

Aunque en la Tierra existen grandes cantidades de agua acumulada, tanto en los océanos como en extensiones continentales, el 97.5% es agua salada. Únicamente el 2.5% del agua en el planeta es dulce, sin embargo, sólo 0.76% está disponible y accesible para consumo humano; el 0.01% es agua superficial y el 0.75% es agua subterránea; el 1.74% es agua dulce acumulada en casquetes polares y glaciares (Ver Figura 1.1) (UNESCO-WWAP, 2006).

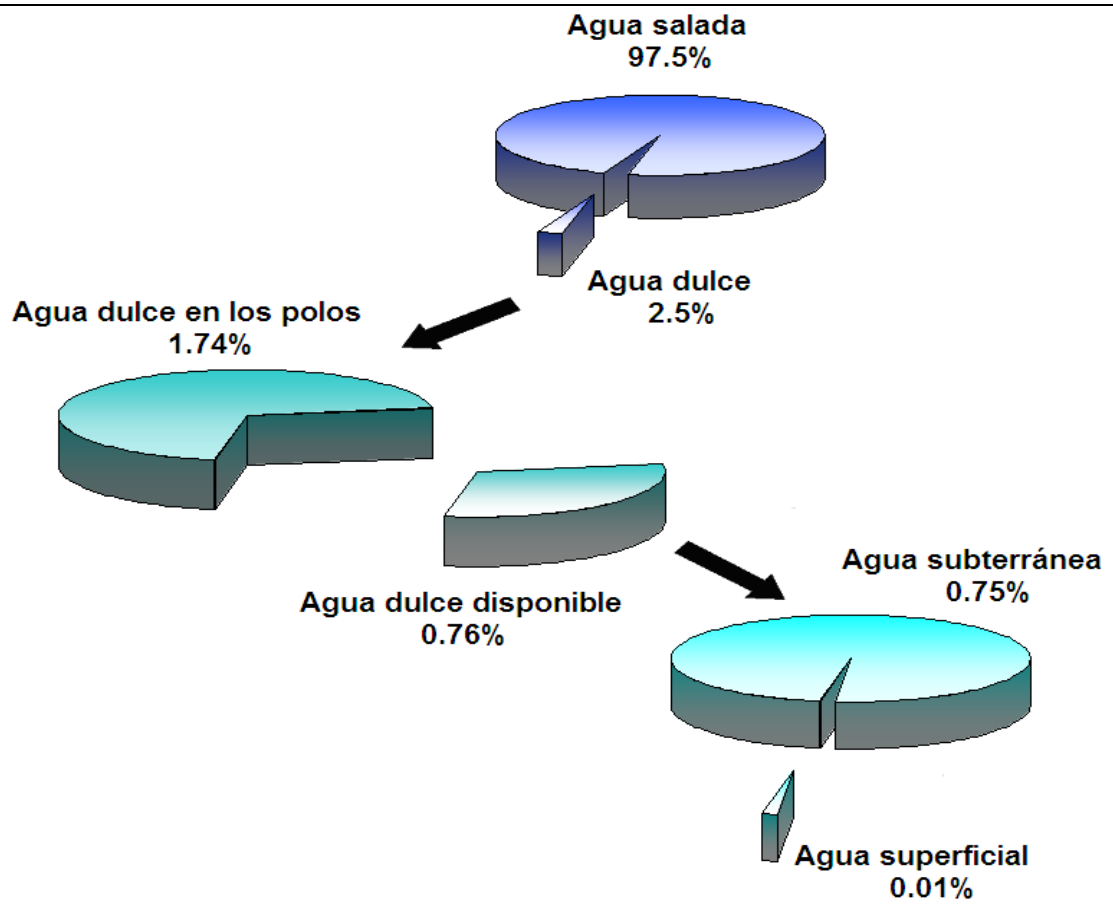


Figura 1.1.- Distribución de agua en el planeta

Es importante tomar conciencia que del volumen total de agua que existe en el planeta, sólo el 0.01% de agua dulce superficial está al servicio de la humanidad, especialmente si consideramos que el agua superficial es la principal fuente de abastecimiento de agua a la población y sus actividades productivas. En nuestro país, poco más del 61 % de la extracción es de agua superficial (CNA, 2000).

La disponibilidad media per cápita de agua tiene un papel muy importante en la planeación, administración y manejo integral de las cuencas hidrológicas de un país (SEMARNAT, 2002).

Tabla 1.1. Parámetros mundiales para la evaluación de la disponibilidad de agua

Categoría	Disponibilidad M^3/Hab/Año	Ejemplos
ALTA	10,000	Canadá y Brasil
MEDIA	5,000-10,000	Estados Unidos
BAJA	1,000-5,000	México y Turquía
MUY BAJA	-1,000	Norte de Africa

Fuente: IDH, 2006

Actualmente, mas de la mitad de los países del mundo tienen una disponibilidad promedio baja y prácticamente la tercera parte de ellos ya padece escaséz (Informe sobre Desarrollo Humano 2006). La República mexicana, se encuentra entre los países con disponibilidad promedio de agua baja (CNA, 2006).

En México la disponibilidad de agua disminuye cada año; en el año 2005 se tenía una disponibilidad per cápita anual de 4,446 m^3, la cual se estima que descenderá para el año 2030 a 3,721 m^3 por habitante por año (CNA, 2006). Ello debido principalmente al crecimiento contínuo de la población y de sus actividades productivas que demanda agua. Pero también incide el uso ineficiente del agua, la falta de planificación, la contaminación del recurso y otros factores derivados de una limitada o inexistente cultura de la sociedad por el cuidado del agua.

El problema de la escaséz de agua es más agudo en regiones áridas y semi-áridas (dos tercios del territorio mexicano) ya que presentan ciertas condiciones naturales que limitan la ocurrencia del agua.

En México destacan dos grandes zonas de disponibilidad de agua: (1) el sureste y (2) el norte, centro y noroeste del país (CNA, 2008). En la zona norte, centro y noreste de la República Mexicana, se estima que la disponibilidad per cápita anual de agua es de 1,724 m^3 por habitante por año, por el contrario para la región sureste se estima que la disponibilidad per cápita anual de agua es del orden de 13,097 m^3 por habitante por año (CNA, 2008), lo que muestra la

importancia de contar con políticas de manejo de recursos hídricos a corto, mediano o largo plazo.

México no es el único país con esta problemática, contar con suficiente agua en calidad y cantidad para las diversas actividades del hombre, es una preocupación cada vez mayor para los países desarrollados y los que aún no lo están (SEMARNAT, 2002), de ahí la importancia de que el hombre lo aproveche de manera eficiente para tratar de asegurar la existencia del recurso en el futuro.

Los escurrimientos naturales son la parte de mayor interés del ciclo hidrológico, para propósitos de planificación, administración y distribución de agua para su uso de forma inmediata, en el abastecimiento de agua a la población y/o riego, o bien, para ser almacenada en presas y ser utilizada posteriormente en diversos fines (Campos, 1992). Determinar la magnitud, la variación temporal y espacial de este recurso, es imprescindible para establecer un aprovechamiento adecuado, especialmente en zonas áridas.

Los escurrimientos naturales pueden determinarse mediante el ajuste de registros de hidrometría, mediante modelos hidrológicos lluvia-escurrimiento o a través de métodos estadísticos en cuencas hidrológicas aforadas (TNRCC, 1997). También existen cuencas no aforadas, sin registros históricos de hidrometría y cuencas pobremente aforadas, que cuentan con registros de un periodo de tiempo muy corto o de un periodo largo con algunos registros tomados intermitentemente. Para estos casos existen métodos o técnicas para determinar la disponibilidad natural utilizando métodos que se basan en el transporte de información hidrométrica y similitud de cuencas y métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica (Campos, 1992).

Para diseñar políticas de gestión de los recursos hídricos de manera adecuada, es necesario contar con las series de tiempo de escurrimientos naturales para periodos de tiempo suficientemente largos, que capturen el comportamiento hidrológico de la cuenca bajo estudio en el largo plazo (Silva, 2010); Adicionalmente, muchas veces se requiere esta información en ubicaciones interiores de una cuenca aforada, en donde no se dispone de estación hidrométrica.

Por lo tanto, surge la necesidad de estimar los escurrimientos naturales en sitios no aforados o en sitios interiores de una cuenca aforada, pero también la disyuntiva de decidir cual de los varios métodos que se encuentran en la literatura científica es conveniente adoptar.

1.2.- Planteamiento del problema

Existe la necesidad de estimar el volumen natural escurrido anual y mensual en sitios no aforados de una cuenca instrumentada por los motivos mencionados anteriormente, por lo que existen varios métodos de cálculo desarrollados para este propósito.

Como una práctica común, se emplean todos los métodos y se escoge un promedio de los resultados o se toma el promedio de los que están mas cerca entre sí o simplemente se selecciona el método que parece a priori, que es mejor. Sin embargo, no existe mayor información en la literatura que sustente las ventajas y desventajas de cada método, así como la forma de seleccionar alguno de ellos de una manera mas apropiada.

Elegir algún método de manera arbitraria, puede aumentar la incertidumbre en los resultados que se obtengan. De ahí surge la importancia de analizar los métodos existentes y formular recomendaciones que faciliten su uso conforme a las condiciones de cada caso particular.

1.3.- Hipótesis de trabajo

Es posible determinar los escurrimientos naturales en sitios no aforados de forma confiable, a partir de relaciones simples o múltiples de variables hidrológicas, climatológicas y geomorfológicas en una cuenca hidrológica.

1.4.- Alcances y Objetivos

El trabajo de investigación que se plantea en esta tesis, es evaluar los resultados que ofrecen las diferentes metodologías para obtener escurrimientos naturales o escurrimientos vírgenes en cuencas no aforadas o sitios interiores de cuencas que si lo están; se incluye un caso de estudio.

1.4.1.- Objetivo general

Evaluar los resultados que ofrecen los métodos existentes para determinar escurrimientos naturales en sitios no aforados de una cuenca hidrológica; definir sus condiciones de aplicabilidad, incluyendo el efecto de la escala temporal (anual-mensual).

1.4.2.- Objetivos específicos

1.- Evaluar si los métodos existentes, desarrollados para su uso a escala de tiempo anual, pueden ser empleados a la escala de tiempo mensual.
2.- Identificar las condiciones de aplicabilidad de los métodos existentes para determinar escurrimientos naturales en sitios interiores de una cuenca aforada.

3.- Emitir recomendaciones que permitan seleccionar el método mas apropiado en función de la información disponible en la cuenca.
4.- Determinar el escurrimiento natural a las escalas de tiempo anual y mensual en la cuenca de estudio.

1.5 Justificación

Existen cuencas o subcuencas que en algún tiempo fueron consideradas de reducida importancia, por lo que se encuentran pobremente aforadas o no aforadas, pero también pueden existir sitios interiores no aforados o parcialmente aforados con respecto al tiempo de una cuenca aforada; en este último caso, con el paso del tiempo puede surgir la necesidad de inferir o estimar sus escurrimientos naturales para satisfacer nuevas demandas de agua (Campos, 1992).

Por otro lado, la Comisión Nacional del Agua debe de publicar la disponibilidad de agua en todas las cuencas nacionales conforme a la Ley de Aguas Nacionales (CNA, 2004); para lo cual existe la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 (SEMARNAT, 2002), que establece el método para determinar la disponibilidad de agua, por medio del método de balance de aguas superficiales en todas las cuencas del país. También debe de reglamentar el aprovechamiento del recurso hídrico principalmente en cuencas sobreexplotadas, por lo anterior, se requiere contar con procedimientos y metodologías que permitan realizar estos trabajos con el nivel de detalle adecuado; lo que necesariamente incorpora nuevos sitios de interés que no están aforados, o lo están para un periodo de tiempo reducido.

Adicionalmente, en cuencas donde la red hidrométrica ha ido creciendo paulatinamente, se necesita estimar su régimen hidrológico para fines de planeación, lo que hace necesario contar con los métodos de estimación de escurrimientos naturales en sitios no aforados, así como recomendaciones para su correcta aplicación, que permitan completar registros faltantes o calcular series de tiempo completas.

1.6.- Metodología

1.6.1.- Recopilación y análisis de información.

Se recabó toda la información de carácter general y la de la zona de estudio que se encuentra disponible en las dependencias gubernamentales e instituciones educativas y de investigación.

a) Información general:

Artículos científicos, monografías, tesis y libros de interés relacionados con la determinación de escurrimientos naturales, normas sobre disponibilidad del agua superficial para su aprovechamiento, información sobre gestión de recursos hídricos en zonas áridas, información técnica de la infraestructura hidráulica para el almacenamiento y derivación de agua superficial.

b) Zona de estudio:

Climatología e Hidrometría (Registros históricos y ubicación de estaciones),climatología e Hidrología de la presa Pico de Águila, presa San Gabriel y Estación Hidrométrica Jiménez, información geográfica digital e impresa cartas edafológicas (Uso o cubierta vegetal), cartas edafológicas (Tipo de suelo), fotografías de la presa Pico de Águila, datos generales de la presa Pico de Águila.

Una vez reunida la información disponible, ésta fue sujeta a un profundo análisis, con el propósito de contar con la información necesaria para la realización de este proyecto de investigación.

1.6.2.- Revisión de métodos existentes para determinar escurrimientos naturales en sitios no aforados de una cuenca instrumentada.

El presente trabajo de investigación, consistió en una revisión detallada de los métodos que existen en la actualidad, para el cálculo de los volúmenes escurridos anual y mensual en cuencas no aforadas o pobremente aforadas (Campos, 1992 y TWRI, 1999). Se identificaron las variables hidrológicas, climatológicas y geomorfológicas que demanda cada uno de ellos, con la finalidad de poder emplearlos en la zona de estudio, la cuenca alta del río Florido.

1.6.3.- Aplicación de métodos en la cuenca de estudio

Los métodos indirectos para la determinación de escurrimientos naturales, fueron aplicados en la cuenca alta del río Florido a escala mensual y anual.
Estos métodos se clasifican en dos grupos (1) Métodos que se basan en el transporte de información hidrométrica de una estación hidrométrica cercana y similitud de cuencas y (2) Métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica disponible (Campos, 1992). El transporte de información climatólogica se realizó a través de estaciones hidrométricas dentro de la cuenca alta del río Florido. Finalmente, los diferentes métodos se subagruparon para la escala de tiempo en que se pueden aplicar.

1.6.4 Análisis de resultados y formulación de recomendaciones

Se utilizaron medidas estadísticas descriptivas de centralización y dispersión de los datos para el análisis de resultados, además se emplearon medidas de evaluación del desempeño, en los métodos de estimación del volumen escurrido natural para determinar el grado de ajuste de los resultados con respecto a los valores observados. El contraste entre los volumenes escurridos observados y los estimados permite detectar similitudes estadísticas a partir de las cuales se formulan recomendaciones y conclusiones (Campos, 2009).

CAPÍTULO 2.- Escurrimientos naturales en cuencas hidrológicas

2.1.- Definiciones

Es importante establecer la diferencia que existe entre los escurrimientos naturales, con respecto a los escurrimientos superficiales que se observan en una estación hidrométrica (registros de hidrometría), que es ubicada sobre el cauce de una cuenca; pueden existir casos en los que la diferencia es nula.

2.1.1.- Escurrimiento natural

Las estructuras hidráulicas modifican el régimen de escurrimiento principalmente en cauces primarios o secundarios (afluentes), mientras que otras acciones antropogénicas como las prácticas agrícolas y la urbanización, propician el desequilibrio natural de la cuenca (Campos, 1992).

El escurrimiento natural o virgen es aquel escurrimiento que no está afectado por la acción antropogénica; estructuras hidráulicas (presas, embalses, distritos de riego, abastecimiento de agua potable), urbanización y prácticas agrícolas construídas en los cauces de la cuenca o en la cuenca (Campos, 1992).

Los escurrimientos naturales son la parte de mayor interés del ciclo hidrológico, ya que son fundamentales para propósitos de planificación, administración y distribución de agua, para su aprovechamiento actual en el abastecimiento de agua a la población, industria, uso pecuario y riego, o bien, para ser almacenada en presas y ser utilizada posteriormente en diversos fines (Campos, 1992).

Los escurrimientos naturales históricos caracterizan la respuesta hidrológica de una cuenca y existe en la literatura científica métodos para su determinación (TNRCC, 1997).

2.1.2 Escurrimientos superficiales aforados (registros de hidrometría)

Son los escurrimientos que resultan de la precipitación y/o caudal lateral que no llegan a infiltrarse sobre la superficie de la tierra y que llegan a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 2006).

Cuando en una cuenca aforada el agua es desviada de manera artificial desde el origen hasta su salida al mar o existe un mediano o alto aprovechamiento en cuanto al uso del agua, se dice que la cuenca se encuentra alterada. En una cuenca con un bajo aprovechamiento de agua se considera que los escurrimientos naturales son iguales a los escurrimientos superficiales (Silva-2010).

2.2.- Importancia de los escurrimientos naturales para fines de planeación

La disponibilidad de agua tiene un papel fundamental en la planeación de todas las actividades que desarrolla el hombre en las cuencas hidrológicas de un país, ya que a partir de su magnitud, se podrán establecer niveles de escaséz o abundancia. Así mismo, se podrá distribuir el agua disponible, de acuerdo a los derechos de cada uno de los usuarios o llevar a cabo la planeación del aprovechamiento del recurso hídrico a corto, mediano o largo plazo (CNA, 2001).

Para poder planificar el aprovechamiento de los recursos hídricos en una región o en una cuenca primero es necesario cuantificarlos en el tiempo y en el espacio. Lo que puede lograrse mediante la determinación de los escurrimientos naturales, los cuales corresponden a la disponibilidad natural de agua superficial en una cuenca hidrológica (SEMARNAP, 2000). Por otra parte, la creciente demanda de agua para satisfacer las necesidades de la humanidad, incluyendo todas sus actividades productivas que demanda agua, nos obliga prever o a resolver conflictos por el uso del agua que se presentan entre los diferentes sectores usuarios de este recurso. Debido a ello, la determinación de los escurrimientos naturales en un punto de interés en una cuenca resulta de vital importancia, como insumo principal en la planeación y reordenamiento del aprovechamiento del recurso agua (Silva-Hidalgo *et al.*, 2008).

2.3.- Determinación de escurrimientos naturales en cuencas aforadas

En una cuenca aforada, los escurrimientos naturales pueden ser determinados a partir de registros de hidrometría (TNRCC, 1997); para lo cual, es necesario contar con registros de hidrometría suficientes, cuando menos 20 años (SEMARNAT, 2002). Este método se basan en el principio de conservación de masa, que puede plantearse mediante la siguiente expresión (Wurbs, 1996):

$$E - S = V_{t+\Delta t} - V_t \qquad (2.1)$$

En donde: $V_{t+\Delta t}$ y V_t son el volumen almacenado final e inicial respectivamente, en un intervalo de tiempo Δt; E y S son los volúmenes que entraron y salieron del sistema en ese Δt.

Silva (2010) analizó diversas publicaciones que proveen expresiones matemáticas, deducidas a partir de la de conservación de masa (Ec.(2.1)), para determinar el escurrimiento medio natural. Los planteamientos revisados fueron: La Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 (SEMARNAT,2002); El modelo de disponibilidad de agua de Texas, E.U.A. (TNRCC, 1997, TNRCC, 1998 y Wurbs, 2006); El Manual de evaluación de los recursos hídricos integrado por cuencas hidrográficas, del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación,

la Ciencia y la Cultura (UNESCO-PHI,2006) y el manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos en la Republica de Chile (MOP-DGA, 2002); El manual de Evaluación de los Recursos Hídricos para la Estimación de las Capacidades Nacionales, elaborado por la Organización Mundial Metereológica y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (OMM-UNESCO, 1998). En general se encontró que aunque todas las ecuaciones partían de la ley de conservación de masa, el número de variables en cada una es diferente. Algunas expresiones no incorporan flujos de retorno y ninguna de ellas incorpora los volúmenes de pérdidas a lo largo del cauce.

En ese mismo trabajo, Silva (2008) realizó un análisis matemático detallado de las variables (gastos de entrada y de salida) que intervienen en la ecuación de balance de un segmento del cauce de un río. Los resultados de esa investigación muestran que el volumen de escurrimiento restituido neto por cuenca propia está dado por la suma del volumen de escurrimiento directo y el volumen de escurrimiento base menos las pérdidas; por lo que es consistente definir el estimador aposteriori del volumen de escurrimiento restituido neto por cuenca propia, $[E_{cp,j}^{n,r,(k)}]^{apos}$, para el mes *k* del año *j*, como sigue:

$$\begin{aligned}[E_{cp,j}^{n,r,(k)}]^{apos} &= H\{[E_{d,j}^{(k)}]^{apos} - \hat{V}_{pg,j}^{(k)}\}\{[E_{d,j}^{(k)}]^{apos} - \hat{V}_{pg,j}^{(k)}\} \\ &= H\{[E_{d,j}^{(k)}]^{apos} - C_{ar}^{(k)} A_{r,j}^{(k)} - C_{ab}^{(k)} \tilde{A}_{b,j}^{(k)} - D^{(k)}\}\{[E_{d,j}^{(k)}]^{apos} - C_{ar}^{(k)} A_{r,j}^{(k)} - C_{ab}^{(k)} \tilde{A}_{b,j}^{(k)} - D^{(k)}\}\end{aligned} \tag{2.2}$$

En donde:

$$\hat{V}_{pg,j}^{(k)} \equiv C_{ar}^{(k)} A_{r,j}^{(k)} + C_{ab}^{(k)} \tilde{A}_{b,j}^{(k)} + D^{(k)} \tag{2.3}$$

$$\begin{aligned}[E_{d,j}^{(k)}]^{apos} &= H[\tilde{R}_{e,j}^{(k)} - \rho E_{xtr,j}^{(k)} + C_{ar}^{(k)} A_{r,j}^{(k)} + C_{ab}^{(k)} \tilde{A}_{b,j}^{(k)} + D^{(k)}][\tilde{R}_{e,j}^{(k)} - \rho E_{xtr,j}^{(k)} \\ &\quad + C_{ar}^{(k)} A_{r,j}^{(k)} + C_{ab}^{(k)} \tilde{A}_{b,j}^{(k)} + D^{(k)}]\end{aligned} \tag{2.4}$$

$$\tilde{R}_{e,j}^{(k)} = \Delta V_j^{(k)} A_{r,j}^{(k)} - I_{m,j}^{(k)} + A_{b,j}^{(k)} + E_{x,j}^{(k)} + E_{xt,j}^{(k)} + E_{v,j}^{(k)} \tag{2.5}$$

H (.)representa la función escalón unitario de Heaviside:

$$H(\zeta) = \begin{cases} 1 \text{ si } \zeta \geq 0 \\ 0 \text{ si } \zeta < 0 \end{cases} \tag{2.6}$$

En donde, A_r es el volumen anual aforado desde la cuenca aguas arriba, A_b es el volumen anual aforado de la cuenca hacia aguas abajo, E_{xt} es el volumen anual de extracción de agua superficial, E_v es la evaporación anual, E_x es el volumen anual de exportaciones, I_m es el volumen anual de importaciones, R el volumen anual de retornos y ΔV es el cambio en el almacenamiento anual, r es la fracción desconocida que el volumen de retorno representa en relación al volumen de agua empleado en irrigación (E_{xtr}), C_{ar}, C_{ab} y D representan parámetros constantes propios del mes k $(k=1\ldots 12)$.

2.4.- Determinación de escurrimientos naturales en cuencas no aforadas

Cuando en una cuenca hidrológica los registros de hidrometría están incompletos o simplemente no existen, se puede recurrir a modelos hidrológicos (lluvia- escurrimiento), métodos estadísticos (TNRCC, 1997) y a métodos indirectos para determinar el escurrimiento natural. En este último caso, un grupo de estos métodos se basan el transporte de información hidrométrica de una estación de aforo cercana al sitio de interés; a estos procedimientos también se les conoce como de similitud de cuencas. El otro grupo de métodos se basan en la evaluación de parámetros físicos de la cuenca (geomorfología) e información climatológica disponible (valores de temperatura y precipitación), estableciendo relaciones entre dichas variables que permiten estimar el volumen de escurrimiento natural (Campos, 1992). Precisamente, los métodos indirectos son los de mayor interés en el desarrollo de la presente investigación.

2.5.- Importancia de la distribución mensual de escurrimientos naturales en una cuenca

La determinación de los escurrimientos naturales a una escala temporal mensual, proporciona mayor información respecto a escalas anuales, debido a que se observa el comportamiento hidrológico de la cuenca a lo largo del año.

La planificación del aprovechamiento del agua superficial en una cuenca requiere de un análisis detallado que demanda cuando menos del uso de la escala mensual. Por ejemplo, para distribuir el agua que se requiere para irrigación en una cuenca es necesario tomar en cuenta la distribución temporal de la demanda y del escurrimiento natural, de lo contrario a la escala anual, parece que la demanda y el escurrimiento natural ocurren en el mismo tiempo, cuando en la realidad se sabe que la mayor demanda para irrigación ocurre cuando durante el estiaje, que es precisamente cuando los escurrimientos naturales en los cauces naturales son mínimos.

En función de una clara y detallada evaluación, a la escala de tiempo y espacio pertinentes, es como se podrá estimar en forma mas apropiada la relacion oferta-demanda de agua en una cuenca hidrológica (CNA, 2001).

CAPÍTULO 3.- Métodos para determinar escurrimientos naturales en cuencas no aforadas.

Por cuenca no aforada se entenderá, además de aquellas en la cuales no existen registros de medición de caudal en sus cauces, las subcuencas o sitios interiores de cuencas aforadas que no cuentan con estaciones hidrométricas.

3.1.- Clasificación de métodos

Los métodos para determinar escurrimientos naturales se pueden clasificar en dos grupos:

- **Métodos basados en el transporte de información hidrométrica y similitud de cuencas.** Estos procedimientos también son conocidos como métodos de analogía hidrológica, se fundamentan en establecer relaciones entre parámetros geomorfológicos de la cuenca aforada y de la que no tiene información.

- **Métodos que se basan en los parámetros físicos de la cuenca e información climatológica.** Estos métodos se fundamentan en establecer relaciones entre parámetros físicos de la cuenca (geomorfológicos) y parámetros climatológicos como son la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración con el volumen de escurrimiento que se puede generar (Campos, 1992).

Adicionalmente los diferentes métodos pueden subagruparse conforme a la escala de tiempo en que se pueden aplicar en: anuales, mensuales y diarios.

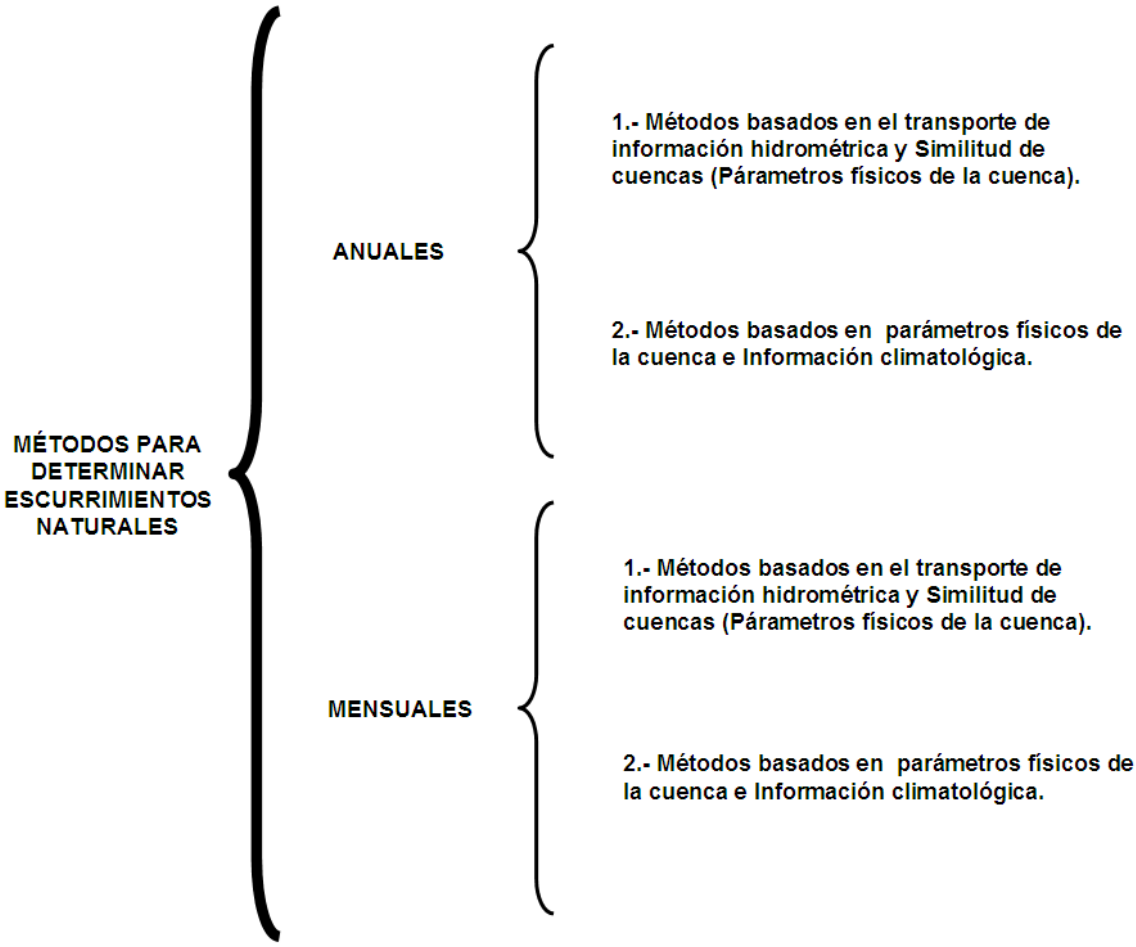


Figura 3.1.- Métodos para determinar escurrimientos naturales en cuencas no aforadas

3.2.- Métodos desarrollados para la escala de tiempo anual

3.2.1.- Método del área

Este método, también conocido como "Transporte de información hidrométrica" (Campos, 1992) ó "Distribución de flujo en proporción al área de drenaje" (TWRI, 1999), consiste en estimar el volumen escurrido en la cuenca sin datos, transfiriendo el escurrimiento natural de la estación hidrométrica de la cuenca aforada, basándose en una proporcionalidad de superficie de las cuencas que se expresa matemáticamente como:

$$V_x = \left(\frac{A_x}{A_d}\right) V_d = F_1(V_d) \qquad (3.1)$$

Donde V_x es el volumen escurrido anual de la cuenca no aforada en Hm^3; A_x el área de la cuenca no aforada en Km^2; A_d el área de la cuenca de la estación hidrométrica en Km^2; V_d el volumen escurrido anual en la estación hidrométrica en Hm^3 y F_1 el factor de transporte que es el cociente del área de la cuenca no aforada entre el área de la cuenca de la estación hidrométrica, adimensional.

3.2.2.- Método de área y precipitación

Si la cuenca de la estación hidrométrica y la cuenca sin aforos están dentro de la misma región fisiográfica y se encuentran próximas entre sí, se puede establecer una relación entre el área, la precipitación y el escurrimiento. La ecuación que incorpora la precipitación queda (Campos, 1992):

$$V_x = F_1\left(\frac{P_x}{P_d}\right)\left(\frac{F_2}{F_3}\right)(V_d) \qquad (3.2)$$

Donde V_x es el volumen escurrido anual de la cuenca no aforada en Hm^3; V_d el volumen escurrido anual en la estación hidrométrica en Hm^3; F_1 el Factor de trasporte, adimensional, definido en la ecuación (3.1); P_x la precipitación en la estación pluviométrica auxiliar de la cuenca de la estación sin aforos en mm; P_d la precipitación en la estación pluviométrica auxiliar de la cuenca de la estación de aforos en mm; F_2 el factor de transporte, igual al cociente entre la lluvia promedio anual en la cuenca sin datos y la lluvia promedio anual de su estación pluviométrica auxiliar, adimensional y F_3 el factor de transporte, igual al cociente entre la lluvia promedio anual en la cuenca de la estación de aforos y la lluvia promedio anual de su estación pluviométrica auxiliar, adimensional.

Cuando se emplea la técnica de los polígonos de Thiessen para el cálculo de la precipitación no es necesario determinar los factores F_2 Y F_3 (Campos, 1992).

3.2.3.- Método de Heras

Heras (1976) estableció una relación para el cálculo del coeficiente de escurrimiento anual en la cuenca sin datos, a partir del volumen específico anual en la estación hidrométrica de la cuenca aforada, el cual depende del área de la cuenca, del volumen escurrido anual y de la precipitación media anual obtenida por la técnica de los polígonos de Thiessen. Adicionalmente, se considera el índice de pendiente y el coeficiente de compacidad de la cuenca instrumentada y la cuenca sin datos.

$$C_x = K\left(\frac{V'}{P}\right) \tag{3.3}$$

$$K = \frac{\left[2\left(\frac{Ip_x}{Ip_d}\right)+\left(\frac{Cc_x}{Cc_d}\right)\right]}{3} \tag{3.4}$$

Para el cálculo del índice de pendiente se utiliza la siguiente fórmula:

$$I_p = 100\sqrt{\frac{H}{L}} \tag{3.5}$$

El coeficiente de compacidad utiliza la siguiente expresión:

$$Cc = \frac{0.282P}{\sqrt{A}} \tag{3.6}$$

La fórmula para la estimación del volumen escurrido anual es la siguiente:

$$V = \frac{\mathrm{V}'(A)}{1{,}000} \tag{3.7}$$

Donde C_x es el coeficiente de escurrimiento anual en la cuenca no aforada, adimensional; *K* el factor correctivo, adimensional; *V '* el volumen específico anual en la estación hidrométrica en mm; *P* la precipitación anual en la cuenca de la estación hidrométrica en mm; Ip_x el índice de pendiente de la cuenca no aforada, adimensional, Ip_d el índice de pendiente de la cuenca de la estación hidrométrica, adimensional; Cc_x el coeficiente de compacidad de la cuenca sin datos, adimensional; Cc_d el coeficiente de compacidad de la cuenca de la estación hidrométrica, adimensional y *A* el área de la cuenca en Km^2.

3.2.4.- Método de Becerril

En este método se considera que el volumen específico anual es igual al coeficiente de proporcionalidad (*β*) por la precipitación elevada a las tres medios (Heras, 1976).

$$V' = \beta P^{3/2} \tag{3.8}$$

Donde *V '* es el volumen específico anual en la estación hidrométrica en mm; *β* el coeficiente de proporcionalidad adimensional y *P* la precipitación anual en mm.

El coeficiente de proporcionalidad (*β*) se determina anualmente despejándolo de la ecuación (3.8), en base a la información hidrométrica disponible cercana a la zona de estudio, para posteriormente aplicarlo a las lluvias de la cuenca sin datos y obtener la estimación del volumen específico anual. El coeficiente de proporcionalidad también puede ser calculado sin ayuda de información hidrométrica, en función del clima de la cuenca, utilizando la Tabla 3.1 (Heras, 1976):

Tabla 3.1.-Valores de β (Heras,1976)

Región	Valores
Regiones muy secas	0.005 a 0.010
Regiones secas	0.010 a 0.012
Regiones intermedias	0.012 a 0.014
Regiones húmedas	0.014 a 0.018
Regiones muy húmedas	0.018 a 0.025

3.2.5.- Método de Temez

Temez (1973) estableció dos fórmulas para el cálculo del volumen específico anual, utilizando parámetros físicos de la cuenca y datos climatólogicos.

Si $P \leq P_o$ $$V' = 0 \quad (3.9)$$

Para $P > P_o$ $$V' = \frac{(P - P_o)^2}{P + ETP - 2P_o} \quad (3.10)$$

Donde *V'* es el volumen específico anual en la cuenca no aforada en mm; *P* la precipitación anual en la cuenca no aforada en mm; P_o la precipitación mínima eficaz (lluvia que no produce escurrimiento) en mm.

La evapotranspiración potencial, ETP, es un parámetro climático que mide la capacidad máxima de evaporación y transpiración, dados los diferentes usos de suelo que puedan existir en una cuenca y depende de variables meteorológicas como la temperatura, número de horas de sol y humedad relativa (CEDEX, 2006).

Thornthwaite (1948), relacionó la temperatura media mensual con la evapotranspiración determinada por medio de balances hídricos, la fórmula para el cálculo de evapotranspiración potencial es la siguiente:

$$ETP = ETP'\left(\frac{d}{30}\right)\left(\frac{N}{12}\right) \quad (3.11)$$

$$ETP' = 16(10T / I)^a \quad (3.12)$$

$$I = \sum_{1}^{12} i \quad (3.13)$$

$$i = (T / 5)^{1.514} \quad (3.14)$$

$$a = 6.75(10^{-7})I^3 - 7.71(10^{-5})I^2 + 1.792(10^{-2})I + 0.49239 \quad (3.15)$$

Donde *ETP'* es la evapotranspiración potencial mensual en mm, también conocida como evapotranspiración potencial sin corregir; *T* la temperatura media mensual del aire en ºC ; *I* el índice de calor anual, igual a la suma de los doce índices mensuales del año en análisis ; *d* la duración real del mes; *N* el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar (Ver Tabla 3.2) y "a" es un exponente que depende del índice de calor anual.

TABLA 3.2.- Duración promedio máxima diaria de horas de insolación (Martín, 1976)

LATITUD NORTE	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP	OCT.	NOV.	DIC.
0º	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
5º	11.9	12.0	12.1	12.2	12.4	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
10º	11.6	11.8	12.1	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.2	11.9	11.7	11.5
15º	11.4	11.6	12.1	12.4	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
20º	11.1	11.4	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
25º	10.8	11.3	12.0	12.8	13.4	13.7	13.6	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
30º	10.5	11.1	12.0	12.9	13.7	14.1	13.9	13.2	12.4	11.5	10.7	10.2
35º	10.2	10.9	12.0	13.1	14.1	14.6	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
40º	9.7	10.6	12.0	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.4
45º	9.2	10.4	11.9	13.6	14.9	15.6	15.3	14.1	12.5	11.0	9.5	8.8
50º	8.6	10.1	11.9	13.8	15.5	16.3	15.9	14.5	12.6	10.8	9.1	8.1
55º	7.7	9.6	11.8	14.2	16.4	17.5	17.0	15.1	12.7	10.4	8.4	7.2
60º	6.8	9.1	11.8	14.6	17.2	18.7	18.0	15.6	12.7	10.1	7.6	6.3

3.2.6.- Método de Turc

Este método se basa en la correlación entre la precipitación como única recarga y la evaporación, por lo tanto, el escurrimiento específico anual es igual a la precipitación menos la evapotranspiración real en la cuenca (Remenieras, 1974).

$$E = P - ETR \tag{3.16}$$

Donde *E* es el volumen específico anual en mm; *P* la precipitación anual en mm y *ETR* la evapotranspiración real en la cuenca en mm/año.

Experimentando en un gran número de cuencas en distintas partes del mundo, Turc (1954) definió la siguiente expresión: (Turc, 1954).

$$ETR = \left(\frac{P}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2}{L^2} \right)}} \right) \tag{3.17}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \tag{3.18}$$

Donde *ETR* es la evapotranspiración real en la cuenca en mm; *P* la precipitación anual en mm y *T* la temperatura media anual en ºC.

Si P<0.31 L $\qquad ETR=P \qquad$ (3.19)

Como la evapotranspiración es igual a la precipitación, el volumen específico anual es cero.

3.2.7.- Método de Coutagne

Es un Método empírico que se basa en el balance hídrico de la cuenca, tomando como entradas a la precipitación y como salida a la evapotranspiración real en la cuenca (Sánchez, 1992).

$$E = P - ETR \tag{3.20}$$

Donde *E* es el volumen específico anual en mm, *P* la precipitación anual en m y *ETR* la evapotranspiración real en la cuenca en m.

La fórmula de la evapotranspiración real en la cuenca descrita por Coutagne es:

$$ETR = P - \lambda P^2 \tag{3.21}$$

$$\lambda = \left(\frac{1.00}{0.80 + 0.14T} \right) \tag{3.22}$$

Rango de validez $\frac{1}{8\lambda} \leq P \leq \frac{1}{2\lambda}$

Si P< $\frac{1}{8\lambda}$ *ETR=P* (3.23)

Como la evapotranspiración es igual a la precipitación, el volumen específico anual es cero.

Si P> $\frac{1}{2\lambda}$ $ETR = 0.20 + 0.035T$ (3.24)

La evapotranspiración real es prácticamente independiente de *P* y se determina por la ecuación anterior (3.24).

Donde *ETR* es la evapotranspiración real en la cuenca en m; *P* la precipitación anual en m y *T* la temperatura media anual en ºC.

3.2.8.- Método de Langbein

La temperatura controla el escurrimiento al influir en la evapotranspiración y en el tipo y cubierta vegetal, por lo que el método propuesto por Langbein está basado en una relación simple del cociente de la precipitación (*P*) entre el factor de temperatura (F_t) así como del cociente del volumen de escurrimiento específico anual (*V'*) entre F_t (Véase Tabla 3.3). El cálculo de F_t se realiza mediante la Ecuación (3.25), en donde se muestra la importancia de la temperatura media anual (*T*) en este método (Langbein *et al*., 1949).

$$F_t = 10^{(0.027T + 1.886)} \tag{3.25}$$

Donde F_t es adimensional, P esta en mm; V' en mm y T ºC.

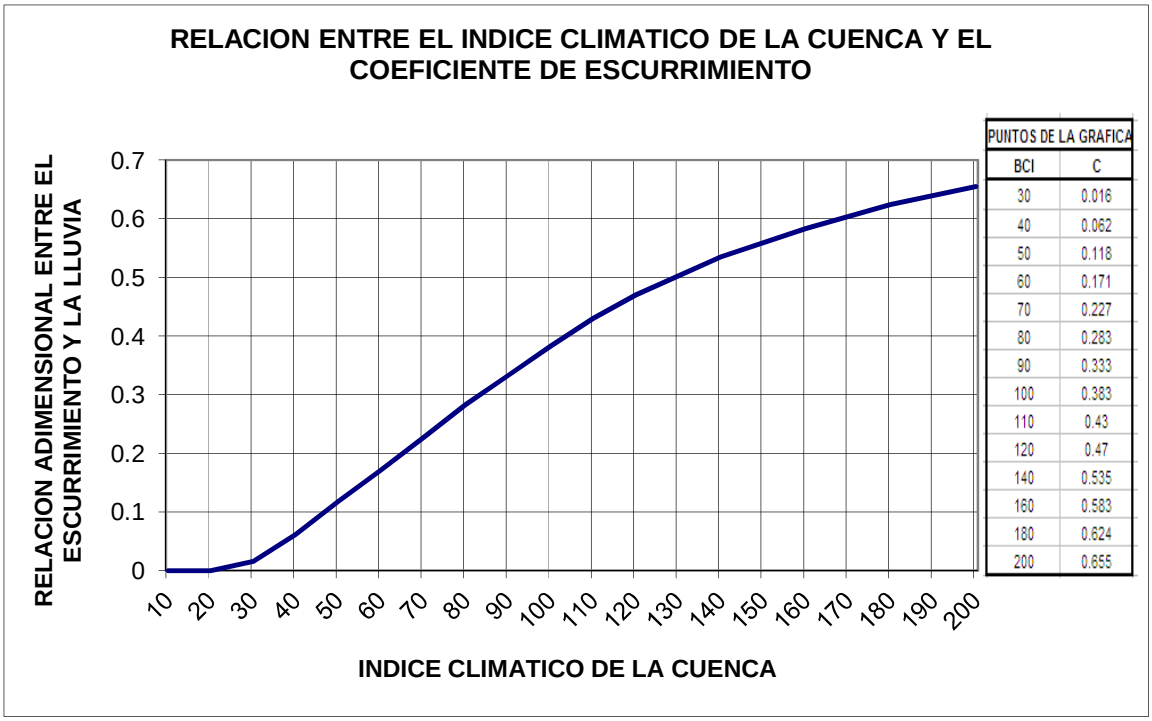
Tabla 3.3.- Relación entre *P* y *Ft* (Langbein *et al.,* 1949)

$\frac{P}{Ft}$	$\frac{V'}{Ft}$
0	0.009
1	0.026
2	0.075
3	0.200
4	0.475
5	1.000
6	1.900
7	2.700
8	3.400
10	5.000
12	7.000
14	9.000

3.2.9.- Método de Smith

Este método se basa en relacionar empíricamente el coeficiente de escurrimiento medio anual, con la precipitación y la temperatura, estos últimos parámetros climáticos fundamentales.
En base a la experiencia y aplicando el método a numerosas cuencas en U.S.A. y Puerto Rico, se encontró una relación entre el coeficiente de escurrimiento y el índice climático de la cuenca (Ver Figura 3.2); relación que está basada en el balance hídrico de la cuenca (Smith, R. L.,1973).

Figura 3.2.- Relación entre el índice climático de la cuenca y el coeficiente de escurrimiento (Smith, R. L., 1973)



$$BCI = 40.90\sum_{1}^{12}\left(\frac{pi}{18ti+220}\right)^{1.11} \qquad (3.26)$$

Donde *BCI* es el Índice climático de la cuenca, adimensional; *pi* la precipitación mensual en mm y *ti* la temperatura media del mes en ºC.

3.2.10.- Método del coeficiente de escurrimiento

La norma oficial mexicana NOM-011-CNA-2000 (SEMARNAT, 2002) provee en su Anexo A, un método para determinar el escurrimiento natural medio anual, en cuencas no aforadas o pobremente aforadas; el método también es llamado "**Precipitación-Escurrimiento**".

El volumen medio anual de escurimiento natural se determina indirectamente y depende de la precipitación anual de la cuenca, el área de la cuenca y el coeficiente de escurrimiento. Para su cálculo se presenta la siguiente fórmula:

Volumen anual de escurrimiento natural de la cuenca = Precipitación anual de la cuenca* Área de la cuenca* Coeficiente de escurrimiento (3.27)

La precipitación anual en la cuenca (mm) se determina mediante el método de los Polígonos de Thiessen. El coeficiente de escurrimiento se determina en función del tipo y uso de suelo, asi como del volumen de precipitación anual de la cuenca.

Los suelos son clasificados en tres tipos A, B Y C que se especifican en la Tabla 3.4.

TABLA 3.4.- Tipos de suelo y características (SEMARNAT, 2002)

TIPOS DE SUELO	CARACTERISTICAS
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas

En una cuenca puede existir diferentes tipos y usos del suelo, el parámetro "*k*" de la cuenca corresponde al valor ponderado para los diferentes tipos y usos de suelo (Véase Tablas 3.4, 3.5 y 3.6) (SEMARNAT, 2002)**.** La siguiente expresión matemática permite obtener el valor de k ponderado (TWRI, 1999):

$$k = k_1(\%area_1) + k_2(\%area_2) + ...k_N(\%area_N) \quad (3.28)$$

TABLA 3.5.- Valores de k, en función del tipo y uso de suelo (SEMARNAT, 2002)

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
BARBECHO, ÁREAS INCULTAS Y DESNUDAS	0.26	0,28	0.30
CULTIVOS:			
En Hilera	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
PASTIZAL:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más de 75%- Poco-	0.14	0.20	0.28
Del 50 al 75%- Regular-	0.20	0.24	0.30
Menos del 50%- Excesivo-	0.24	0.28	0.30
BOSQUE:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.30
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30

TABLA 3.6.- Fórmulas para el cálculo de escurrimiento anual (SEMARNAT, 2002)

K: PARAMETRO QUE DEPENDE DEL TIPO Y USO DE SUELO	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO ANUAL (Ce)
Si $k \leq 0$	$Ce = k\left(\frac{P-250}{2,000}\right)$
Si $k > 0.15$	$Ce = k\left(\frac{P-250}{2,000}\right) + \left(\frac{k-0.15}{1.5}\right)$

Las fórmulas son válidas para valores de precipitación anual entre 350 y 2,150 milímetros

Donde *k* es el parámetro que depende del uso y tipo de suelo, adimensional; *Ce* es el coeficiente de escurrimiento anual, adimensional y *P* la precipitación anual en mm.

3.3.- Métodos desarrollados para la escala de tiempo mensual

3.3.1.- Método del Balance Hídrico Edafológico

Thornthwaite (1948) definió el término de "Balance Hídrico", refiriéndose a la contabilidad de las entradas de agua, debidas a la precipitación y fusión de nieve y a las salidas, como son la evapotranspiración, recarga de agua subterránea y el escurrimiento.

El balance hídrico edafológico se puede aplicar a un perfil de suelo, a una parcela o a toda una cuenca partiendo del conocimiento de las precipitaciones medias mensuales y de la evapotranspiración mensual (Thornthwaite, 1972). Este balance permite el cálculo mensual de la evapotranspiración potencial y real; el propio método define las épocas de lluvias y de estiaje (Dunne y Luna, 1978).

La cantidad de agua que es retenida en el suelo se estima mediante el método de Thornthwaite, la cual depende de la pérdida potencial acumulada de húmedad y su capacidad de retención. Adicionalmente, contabiliza la humedad en exceso, es decir, cuando se supera la capacidad del suelo y existe un balance positivo entre la lluvia y la evapotranspiración potencial, se tiene el escurrimiento superficial (Thornthwaite, 1972). Este método es aplicable a cuencas de gran extensión (más de 2,500 km^2).

El procedimiento para aplicar este método se describe a continuación:

1. Determinar la retención de húmedad aplicable al suelo de cada una de las unidades suelo-cobertura vegetal, existentes en la cuenca hidrológica (Dunne y Luna, 1978).

2. Si la capacidad de retención de las unidades suelo-cobertura vegetal identificados en una cuenca, difieren entre sí en más de 100% de la capacidad menor o mas de 25 milímetros, se tendrá que realizar el análisis por subcuencas (Mockus, 1972).

3. Los valores de capacidad de retención se toman de la Tabla 3.7 desarrollada por Dunne y Luna, (1978).

4. Se estima la evapotranspiración potencial para cada mes del registro anual por analizar, para la cual se utiliza la Ecuación (3.11) del apartado 3.2.5 de la presente tesis. La temperatura media es un parámetro climatológico fundamental para el cálculo (Thornthwaite, 1948).

5. La precipitación mensual sobre la cuenca, se determina mediante la técnica de los polígonos de Thiessen. Si la precipitación varía en las diferentes zonas principales de la cuenca, se tendrá que utilizar el balance hídrico por subcuencas (Campos,1992).

6. Para el cálculo de la evapotranspiración real se tienen dos casos, el primero se presenta cuando la precipitación menos la evapotranspiración potencial es positiva, presentándose el período húmedo, la precipitación cubre la demanda potencial y la evapotranspiración real es igual a la potencial. El segundo caso es cuando la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial es negativa, correspondiente a un período seco; el agua que se evapora será el agua de la lluvia mas la que se extrae del suelo ó variación de la reserva (Almorox, 2010).

TABLA 3.7.- Capacidades de almacenamiento de agua según el suelo y cultivo

(**Dunne y Luna 1978)**

TEXTURA DEL SUELO	AGUA UTILIZABLE mm	PROFUNDIDAD RADICULAR M	RETENCION DE HUMEDAD APLICABLE AL SUELO mm
Cultivos de raíces someras (espinacas, guisantes, judias, remolacha, zanahoria,etc).			
Arenoso fino	100	0.50	50
Franco arenoso fino	150	0.50	75
Franco limoso	200	0.62	125
Franco arcilloso	250	0.40	100
Arcilloso	300	0.25	75
Cultivos de raíces de profundidad moderada (maíz, algodón, tabaco, cereales).			
Arenoso fino	100	0.75	75
Franco arenoso fino	150	1.00	150
Franco limoso	200	1.00	200
Franco arcilloso	250	0.80	200
Arcilloso	300	0.50	150
Cultivos de raíces profundas (alfalfa, praderas, arbustos).			
Arenoso fino	100	1.00	100
Franco arenoso fino	150	1.00	150
Franco limoso	200	1.25	250
Franco arcilloso	250	1.00	250
Arcilloso	300	0.67	200
Arboles frutales.			
Arenoso fino	100	1.50	150
Franco arenoso fino	150	1.67	250
Franco limoso	200	1.50	300
Franco arcilloso	250	1.00	250
Arcilloso	300	0.67	200
Bosque cerrado.			
Arenoso fino	100	2.50	250
Franco arenoso fino	150	2.00	300
Franco limoso	200	2.00	400
Franco arcilloso	250	1.60	400
Arcilloso	300	1.17	350

El balance hídrico consiste en definir mes a mes los siguientes parámetros (en mm, a excepción del último parámetro):

1.-Precipitación media del mes (P)
2.-Evapotranspiración potencial (ETP)
3.-P-ETP
4.-Pérdida potencial acumulada
5.-Humedad retenida en el suelo (Hs)
6.-Variación de reserva (ΛHs)
7.-Evapotranspiración real
8.-Deficiencia de Humedad (DH)
9.-Humedad en exceso (Exc)
10.-Total disponible para escurrimiento
11.-Escurrimiento en milímetros (E)
12.-Determinación del porcentaje (D)
13.-Escurrimiento en hectómetros cúbicos (E)

El balance hídrico inicia con el estiaje, esto significa que es al final de la época de lluvias del año cronológico anterior (Campos, 1992).

Obtención de los parámetros:

1.-La precipitación media, se obtiene a partir de los polígonos de Thiessen.

2.-La evapotranspiración potencial utiliza la fórmula 3.11 del presente capítulo.

3.-Diferencia algebraica entre 1 y 2 (Precipitación-Evapotranspiración potencial).

4.-Se acumulan los valores negativos seguidos de P-ETP, es decir, los valores correspondientes al estiaje y se denomina pérdida potencial acumulada.

5.-La humedad retenida en el suelo utiliza la Tabla 3.8 según las láminas de agua utilizable en evapotranspiración, suelo con capacidad de agua utilizable en 100 mm. Según la pérdida potencial acumulada y su capacidad de retención se determina la humedad en el suelo, para valores negativos de pérdida potencial acumulada. Para valores positivos de pérdida potencial acumulada se suma la humedad del suelo del mes anterior mas la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial del mes estimado.

6.-La variación de la reserva (ΛHs), es la diferencia entre la reserva del mes en el que estamos realizando el cálculo y la reserva del mes anterior.

7.-La evapotranspiración real se puede obtener de dos formas, la primera se presenta cuando la precipitación menos la evapotranspiración potencial es positiva, asumiendo que la evapotranspiración real es igual a la evapotranspiración potencial, y la segunda es cuando la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial es negativa, la evapotranspiración real es igual a la suma de la precipitación mas la variación de la reserva.

8.-La deficiencia de humedad es la diferencia entre la evapotranspiración potencial y la real.

9.-Es el agua que excede de la reserva máxima y que se habrá perdido por escurrimiento superficial o subterráneo:

Si $(P-ETP)>0$ $E=(P-ETP-\Lambda Hs)$

$(P-ETP)\leq 0$ $E=0$

10.-El cálculo del total disponible para escurrimiento es igual a los escurrimientos del paso 9.

11.-Para la determinación del escurrimiento se sigue la recomendación de Thorntwaite y Mather para grandes cuencas: aproximadamente el 50% de EXC es disponible para el escurrimiento E y el resto se detiene en el subsuelo, apareciendo como contribución al escurrimiento del mes siguiente, el cual nuevamente se vuelve a distribuir.

12.-La determinación del porcentaje que se considera adecuado para la humedad retenida puede ser estimada por tanteos, el método tiene que ser calibrado para uno o varios años del registro de la estación hidrométrica auxiliar, en donde concuerde los meses de escurrimientos y sus magnitudes.

TABLA 3.8.- Humedad retenida en el suelo según las láminas de agua utilizable en evapotranspiración, suelo con capacidad de agua utilizable de 100mm

P-ETP Acum.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
AGUA RETENIDA EN EL SUELO (SM)										
0	100	99	98	97	96	95	94	93	92	91
10	90	89	88	88	87	86	85	84	83	82
20	81	81	80	79	78	77	77	76	75	74
30	74	73	72	71	70	70	69	68	68	67
40	66	66	65	64	64	63	62	62	61	60
50	60	59	59	58	58	57	56	56	55	54
60	54	53	53	52	52	51	51	50	50	49
70	49	48	48	47	47	46	46	45	45	44
80	44	44	43	43	42	42	41	41	40	40
90	40	39	39	38	38	38	37	37	36	36
100	36	35	35	35	34	34	34	33	33	33
110	32	32	32	31	31	31	30	30	30	30
120	29	29	29	28	28	28	27	27	27	27
130	26	26	26	26	25	25	25	24	24	24
140	24	24	23	23	23	23	22	22	22	22
150	22	21	21	21	21	20	20	20	20	20
160	19	19	19	19	19	18	18	18	18	18
170	18	17	17	17	17	17	16	16	16	16
180	16	16	15	15	15	15	15	15	14	14
190	14	14	14	14	14	14	13	13	13	13
200	13	13	12	12	12	12	12	12	12	12
210	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11
220	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
230	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
240	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
250	8	8	8	7	7	7	7	7	7	7
260	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6
270	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
280	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5
290	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
300	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
310	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
320	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
330	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
340	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
350	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
360	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
370	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
380	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
390	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
400	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
410	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
420	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
500	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

3.3.2.- Método del U.S. Soil conservation service para zonas agrícolas

Este método fue desarrollado por los hidrólogos del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América, (SCS por sus siglas en inglés). El procedimiento consiste en estimar la lluvia en exceso ocasionada por una tormenta y se aplica generalmente en los estudios de avenidas máximas en cuencas sin aforos (Mockus, 1969). Para ello, se determina el valor de la curva número, *N,* como un parámetro hidrológico de una cuenca, que indica el potencial para generar escurrimiento.

Para aplicar este método se requiere disponer de las precipitaciones diarias en la cuenca, y a partir de ésta se estima la lluvia en exceso de acuerdo al tipo y uso de suelo (empleando el valor de N). La sumatoria de la precipitación en exceso que se genera en un mes en análisis, permite la estimación del volumen escurrido mensual. De acuerdo con Campos (1992) la aplicación de este método se circunscribe a cuencas pequeñas, preferentemente rurales y con un alto porcentaje de área cultivada (Campos, 1992).

En nuestro caso de estudio, para la subcuenca de Pico de Águila no fue posible disponer de los datos de precipitación diaria completos y confiables . Además, la subcuenca de estudio no es pequeña y tampoco tiene el mayor porcentaje de su extensión dedicada a la actividad agrícola. Debido a estas limitaciones, este método no fue analizado.

3.3.3.- Método de los Fragmentos

Método propuesto por Svandize en el año de 1964, más que un procedimiento para estimar los volúmenes de escurrimiento mensual, permite distribuir mensualmente, los volúmenes de escurrimiento anual obtenidos por los métodos expuestos en el apartado 3.2 de esta tesis.

La distribución de volúmenes se realiza asignado fluctuaciones mensuales, mismas que se obtienen de un registro histórico, como cocientes adimensionales respecto al volumen escurrido anual. A estas fluctuaciones también se le llaman “fragmento” y se tendrán tantos fragmentos como años de registros se tengan (Campos, 1992).

3.4.- Métodos desarrollados originalmente para su aplicación a la escala de tiempo anual, aplicados a la escala de tiempo mensual

De la revisión de los métodos presentados en el apartado 3.2 de esta tesis, desarrollados para obtener los escurrimientos “anuales” superficiales en una cuenca hidrológica, se observó la imposibilidad de emplearlos en su condición original para la determinación de los escurrimientos mensuales, con excepción del método de área que fue usado directamente a la escala de tiempo mensual.

3.4.1.- Problemática que presentan los métodos desarrollados para su aplicación a la escala de tiempo anual cuando se pretende su utilización a la escala de tiempo mensual.

En el caso de los métodos basados en el transporte de información hidrométrica y similitud de cuencas, los métodos establecen relaciones entre la precipitación y el escurrimiento anuales en una cuenca, así como otras variables geomorfológicos como son el área y el índice de pendiente. El problema estriba que los métodos contabilizan el escurrimiento anual (que es la suma de los volúmenes mensuales), el cual se compone del escurrimiento directo más el flujo base, el primero es el que se genera directamente a partir de la precipitación que ocurre en cada mes, mientras que el segundo es debido a las aportaciones del agua subterránea, de flujos subsuperficiales o de ambos a los cauces de los ríos (Silva, 2010). Así, en una estación hidrométrica se observa la totalidad del escurrimiento superficial, es decir flujo base más escurrimiento directo y corresponderá al escurrimiento natural si el aprovechamiento y retención de agua superficial es inexistente, o corresponderá simplemente al escurrimiento superficial cuando la cuenca presenta obras para la retención y derivación del recurso.

Considerando que a lo largo de un año puede ocurrir que la precipitación sea nula (lo que es normal durante los meses de estiaje en zonas áridas o semi-áridas); que no todos los eventos de precipitación producen escurrimiento (solo aquellos que son mayores a la precipitación efectiva de una cuenca, (Campos, 1992 y Aparicio, 2006); y que existen escurrimientos superficiales que son producto de las aportaciones de agua subterránea (o retornos de los aprovechamientos), se ve con claridad la improcedencia de relacionar el escurrimiento base con la precipitación nula o con la inferior al la efectiva (que no produce escurrimiento directo).

3.4.2.- Propuesta de solución

Considerando lo expuesto en el apartado anterior y consistentemente con lo que plantea Campos (1992), la alternativa para determinar los escurrimientos mensuales a partir de los métodos desarrollados para usarse a la escala de tiempo anual, es combinarlos con el método de los fragmentos (véase apartado 3.3.3, del capitulo 3). Lo que resulta totalmente factible cuando existe una

cuenca aforada con alto grado de similitud a la cuenca no aforada que está siendo estudiada.

En este caso, los escurrimientos anuales calculados mediante los métodos presentados en el capitulo 3, se distribuirán mensualmente empleando el patrón histórico observado en la estación de la cuenca aforada; cabe señalar que la similitud de cuencas cobra todavía mayor importancia ya que además de la incertidumbre que se asocia con el transporte de escurrimientos anuales, ahora se adiciona incertidumbre debida al transporte de la respuesta hidrológica de la cuenca (fluctuaciones mensuales de escurrimiento).

3.4.3.- Método de los fragmentos en la cuenca de estudio

Considerando que para la zona de estudio se dispone del escurrimiento natural restituido mensual, la estimación de los fragmentos se determina mediante la siguiente expresión matemática:

$$f_{m,j}^{(k)} = \{e_{n,j}^{(k)} / E_{n,j}\}_{j=1}^{N_a}; \quad E_{n,j} = \sum e_{n,j}^{(k)}; \quad k = 1,2,...,12 \qquad (3.29)$$

En donde $f_{m,j}^{(k)}$ es la fluctuación mensual o fragmento, siendo el índice *j* el número consecutivo del año y el índice *k* el del mes; $e_{n,j}^{(k)}$ es el escurrimiento natural restituido mensual de la cuenca aforada en el mes *k* del año *j*, finalmente $E_{n,j}$ es el escurrimiento natural restituido anual en el año *j*.

3.4.4.- Método de los fragmentos en combinación con los métodos de estimación de los escurrimientos superficiales anuales, para determinar los escurrimientos superficiales mensuales.

Una vez determinado el escurrimiento superficial anual V_j , ya sea por alguno de los métodos basados en la similitud de cuencas (área, área-precipitación, Heras o Becerril) o por alguno basado en información climatológica (Temez, Turc, Coutagne, Langbein, Smith y del Coeficiente de escurrimiento), la estimación de los escurrimientos mensuales se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$V_{m,j}^{(k)} = \{V_j \; f_{m,j}^{k}\}_{j=1}^{N_a}; \quad k = 1,2,...,12 \qquad (3.30)$$

En donde N_a representa el número de años; $V_{m,j}^{(k)}$ es el escurrimiento mensual correspondiente al mes *k* del año *j*; y $f_{m,j}^{k}$ es el fragmento mensual correspondiente al mes *k* del año *j* determinado mediante la ecuación (3.29).

CAPÍTULO 4.- Determinación de escurrimientos naturales en un sitio interior de la cuenca media-alta del río Florido, en el Estado de Chihuahua (Caso de estudio)

4.1.- La cuenca media-alta del río Florido en el Estado de Chihuahua

Con la finalidad de evaluar los resultados que ofrecen los diferentes métodos presentados en el capítulo anterior, se seleccionó un sitio interior de la cuenca del río Florido en el Estado de Chihuahua y se determinaron los escurrimientos naturales por cada uno de ellos.

4.1.1.- Ubicación

La cuenca media-alta del río Florido (zona de estudio) se localiza en la porción sureste del Estado de Chihuahua, al norte del Estado de Durango, entre las las latitudes 27.17º y 26.07º Norte y las longitudes 106.08º y 104.88º Este (Véase Figura 4.1). Tiene una extensión de 7,395.498 Km^2 y pertenece a la región hidrológica Bravo-Conchos (Fernández, 2003).

El río Florido es tributario del río Conchos, que a su vez es tributario del río Bravo. El río Bravo constituye una gran parte del límite geográfico entre México y los Estados Unidos de América (Silva-Hidalgo *et al*., 2008b).

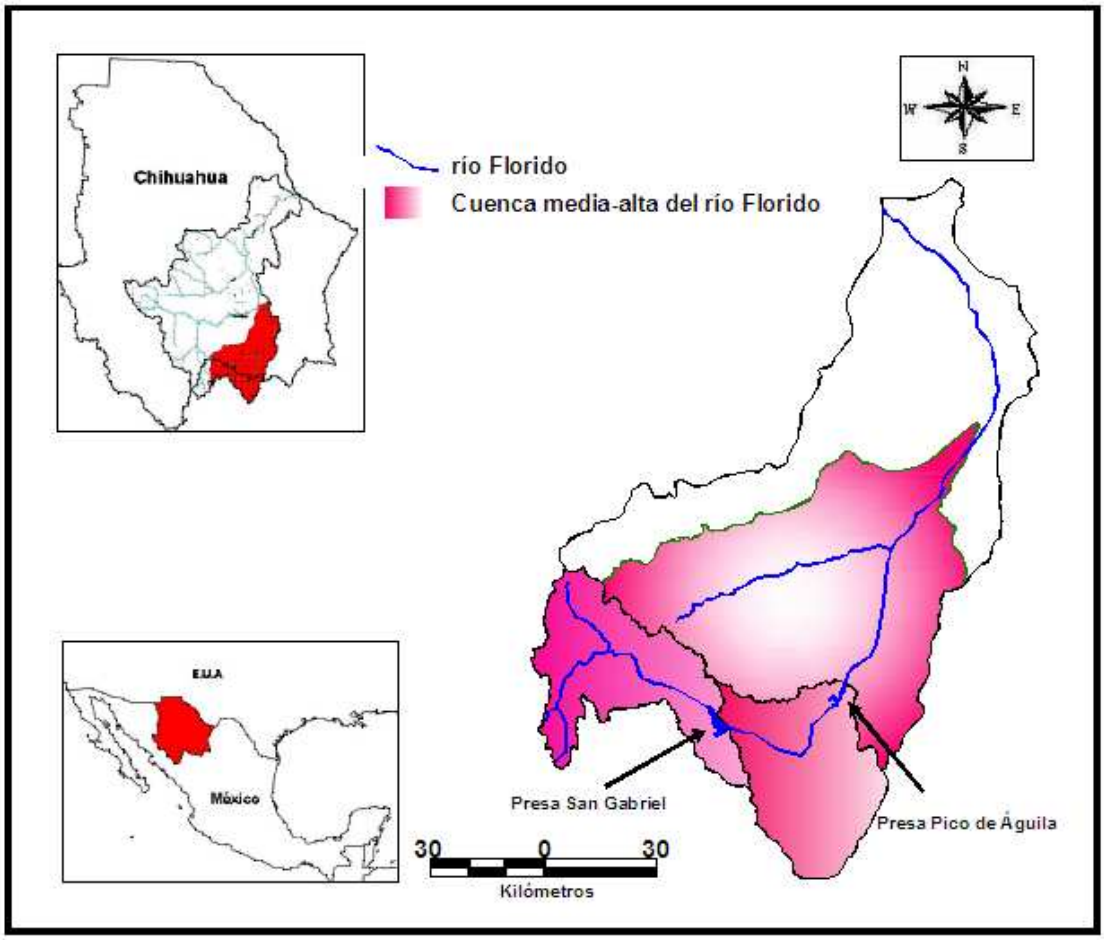


Figura 4.1.- Localización de la cuenca media-alta del río Florido

4.1.2.-Clima

La cuenca media-alta del río Florido tiene una precipitación media anual que oscila entre los 300 a 500 milímetros (CNA,1997). En la mayor parte de la cuenca se presentan las precipitaciones en verano (del mes de junio a principios del mes de octubre), las cuales producen la mayor parte de los escurrimientos superficiales, sin embargo, también las precipitaciones invernales en forma de lluvia, nieve o granizo contribuyen, en menor medida, a la generación de flujos superficiales (Silva, 2010).

La temperatura media anual en la zona de estudio es de 17ºC. La temperatura media mensual mas alta es mayor de 27ºC y se presenta en los meses de mayo a agosto y la media mensual mas baja, alrededor de 7ºC, en el mes de enero.

La cuenca media-alta del río Florido del Estado de Chihuahua presenta diversos climas: semiseco, seco y muy seco, como se observa en la Figura 4.2 (CNA, 1997). En la región oeste de la cuenca de estudio se presenta el clima

semiseco, cambiando a seco en la zona de transición topográfica (cuenca media), estableciéndose el clima muy seco en la porción este de la misma.

El clima muy seco se presenta en las zonas de valles (mas planas), en donde a pesar de que la escasez de agua, se tiene lugar casi la totalidad de la actividad agrícola, ya sea temporal o de riego. También en esta zona se asientan los mayores centros de población (Silva, 2010).

Parte de la zona de estudio queda inserta en la región conocida como el desierto chihuahuense, que se alinea geográficamente en la franja de los grandes desiertos del mundo (Silva, 2010).

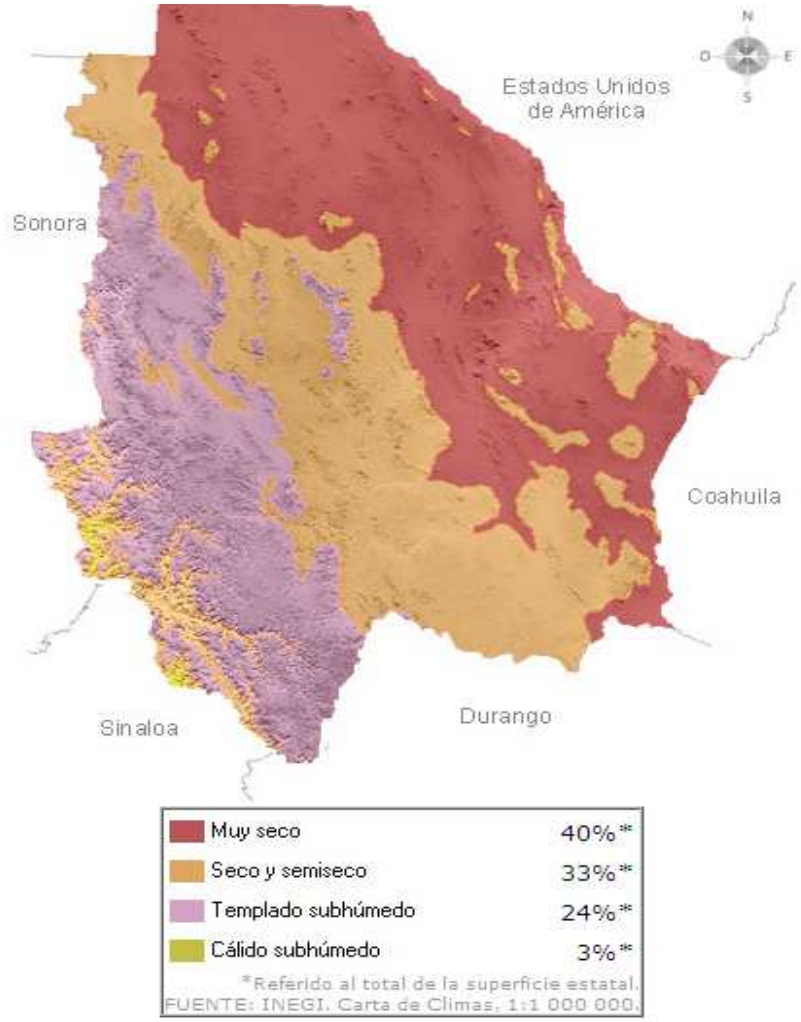


Figura 4.2 Mapa de climas del Estado de Chihuahua. (INEGI, 2011)

4.1.3.- Hidrografía

El río Florido se origina en la altitud 2,880m sobre el nivel del mar, de la Sierra Madre Occidental en el extremo noroeste del municipio de Ocampo (Durango) y fluye en sentido principalmente oeste-este descendiendo desde la sierra y formando un valle en donde se concentran las mayores poblaciones del municipio como Villa Ocampo y Las Nieves, tras pasar por esta última población se desvía hacia el norte y se interna en el Estado de Chihuahua, pasando por las localidades de Coronado y López, antes de llegar a Ciudad Jiménez. El río Florido continúa al norte de Jiménez hacia Camargo, recibiendo apenas aguas arriba de esta última y por la márgen izquierda, al río Parral. Inmediatamente aguas abajo de Camargo el río Florido descarga en la márgen derecha del río Conchos. El río Conchos es afluente del río Bravo, por lo que pertenece a la vertiente del Golfo de México (CNA, 2003).

4.1.4.- Infraestructura para el almacenamiento de agua

La única forma de contar con un volumen de agua superficial disponible en época de estiaje es mediante las presas de almacenamiento, ya que una de sus funciones es la regulación de ríos. En la cuenca media-alta del río Florido existen 2 presas de almacenamiento que por su tamaño son de mayor importancia, ya que satisfacen en su mayoria a la demanda de agua superficial que tiene lugar en ella. Ver Tabla 4.1 (Silva, 2010).

Tabla 4.1.- Principales presas de almacenamiento en la cuenca media-alta del río Florido

Comisión Nacional del Agua y SEMARNAP (1999)

Presa	Río	Inicio de Operación	Capacidad total (hm^3)	Propósito
San Gabriel	Florido	1981	255	Irrigación
Pico de Águila	Florido	1993	50	Irrigación

La presa San Gabriel se encuentra en el municipo de Ocampo, en el Estado de Durango, sobre el cauce del río Florido y riega la superficie agrícola en los Estados de Durango y Chihuahua. La presa Pico de Águila se ubica en el municipio de Coronado, en el Estado de Chihuahua.

4.1.5.- Hidrometría

En el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (IMTA y CNA, 2000), existen datos de 3 estaciones hidrométricas (EH) ubicadas sobre los ríos principales de la cuenca del río Florido (Ver Figura 4.3). Las estaciones registradas son (1) Estación Jiménez (EHJ), (2) Estación Puente Ferrocarril (EHPF) y (3) Estación San Antonio (EHSA). Además, se realizan mediciones de hidrometría en las presas San Gabriel y Pico de Águila, desde su puesta en operación para la primera en 1981 y poco tiempo después del inicio de operación para la segunda en 1994. La EHPF mide los volúmenes de agua superficial que ingresan a San Gabriel y por su proximidad se consideran como un solo punto de control para el periodo de 1964 al año 2002 (Silva, 2010).

Del análisis de la información hidrométrica disponible en la zona de estudio, se observa que existen registros completos de 1964 al año 2002 en el sitio en donde se ubica la presa San Gabriel y en la EHJ. En el sitio en donde se encuentra la Presa Pico de Águila únicamente existen registros desde el año 1994.

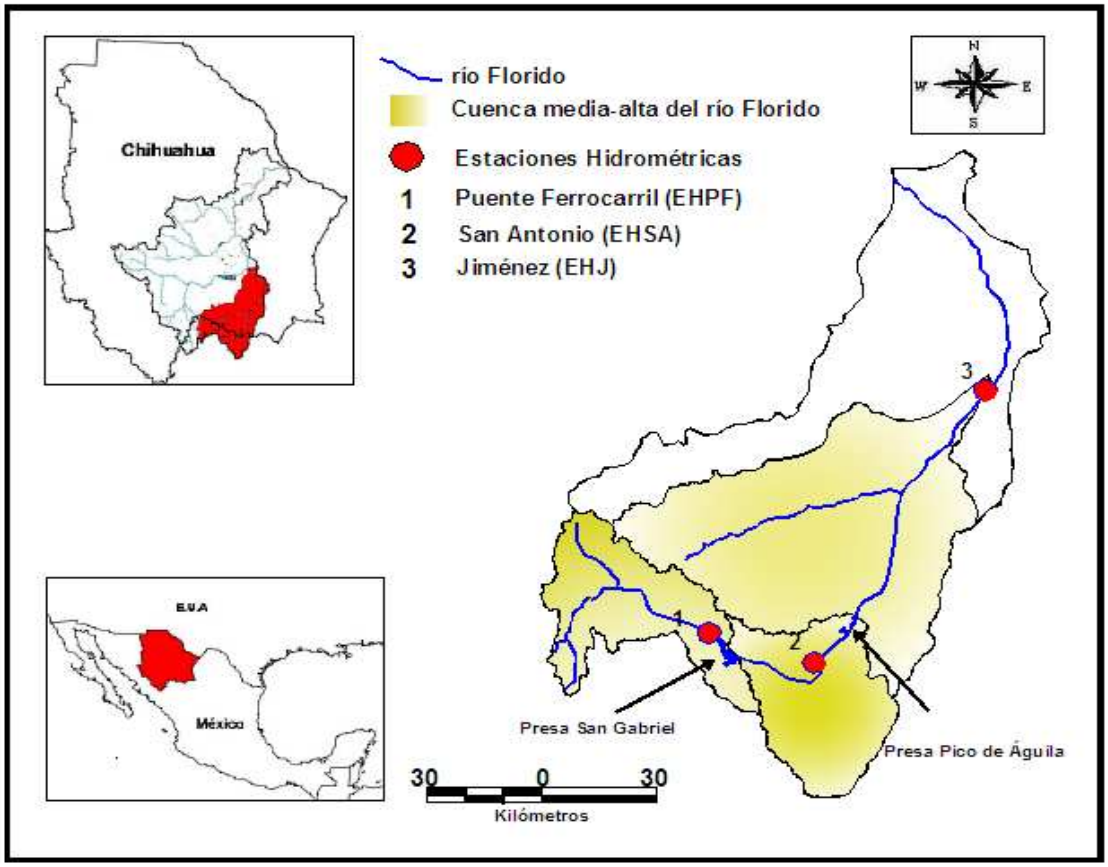


Figura 4.3.- Localización de estaciones hidrométricas e infraestructura

4.1.6.-Sitio de interés no aforado

El sitio interior, de nuestro particular interés en la cuenca media-alta del río Florido, corresponde a la subcuenca de la presa Pico de Águila (PPA), localizada entre la presa San Gabriel (PSG) y la Estación Hidrométrica Jiménez (EHJ), (Véase Figura 4.4). Existen registros históricos suficientemente largos en los últimos dos lugares, sin embargo, en la presa Pico de Águila existen únicamente registros desde 1994, poco después de su inicio de operación.

En el caso de la cuenca de la presa San Gabriel y en la EHJ se dispone de los escurrimientos naturales restituidos para el periodo de 1964 al año 2002. Para fines de planificación del aprovechamiento del agua superficial en la cuenca del río Florido es deseable contar con los registros completos también para la presa Pico de Águila.

4.1.7.- Discretización espacial de la zona de estudio

De acuerdo con el análisis de los registros de hidrométria disponibles, la cuenca media-alta del río Florido se dividió en tres subcuencas (SC) que se muestran en la Figura 4.4 y Tabla 4.2.

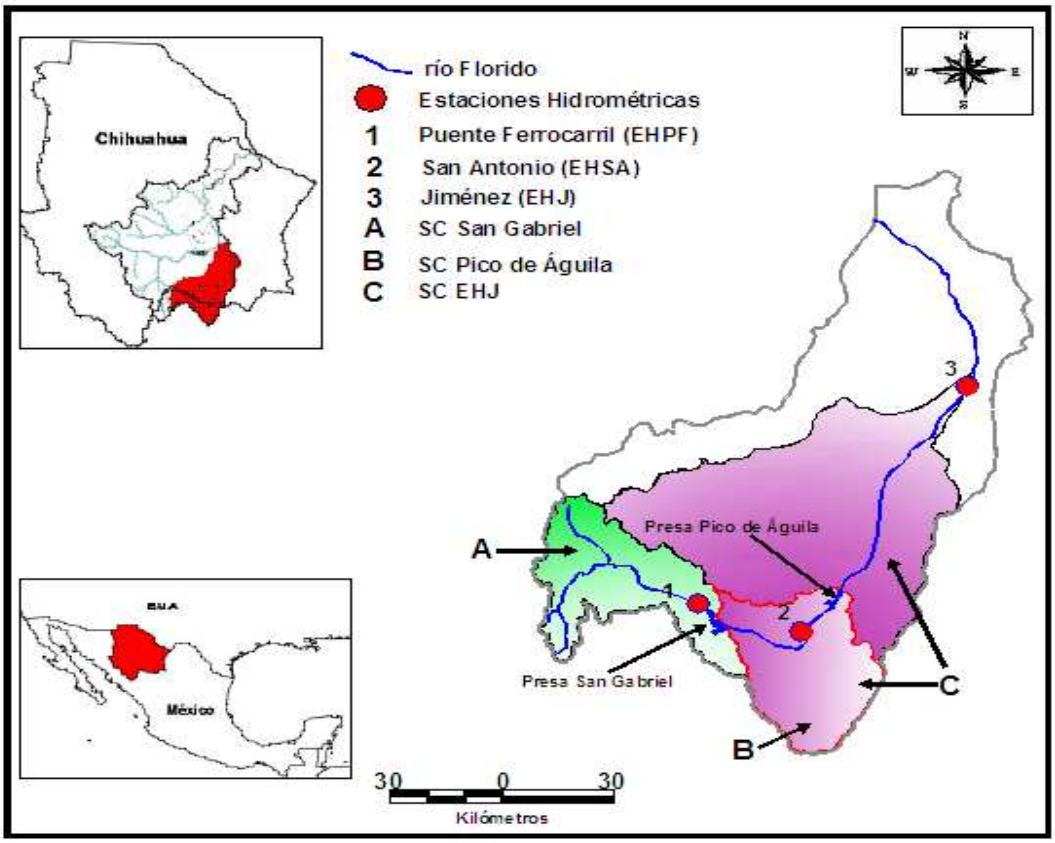


Figura 4.4.- Discretización espacial de la zona de estudio

Tabla 4.2.- Subcuencas de la cuenca media-alta del río Florido (Discretización espacial)

Clave	Subcuenca (SC)	Descripción	Tipo de subcuenca (Geomorfología)
A	SC-SG	Inicio río Florido hasta Presa San Gabriel	Cabecera
B	SC-PA	Aguas abajo de la presa San Gabriel hasta la Presa Pico de Águila	Intermedia
C	SC-EHJ	Aguas abajo Presa San Gabriel hasta EHJ	Intermedia
D	SC-AT	Inicio del río Florido hasta la EHJ (área total)	Intermedia

4.2.- Características físicas de las cuencas en la zona de estudio

Los parámetros físicos de las cuencas son de gran utilidad en la práctica de la hidrología superficial, ya que influyen en el comportamiento hidrológico de la cuenca (Jardí, 1985). A partir de estos parámetros y apoyándose en información climática es posible inferir la respuesta hidrológica de una cuenca. También son de gran utilidad para la transferencia de información hidrométrica de una cuenca a otra cercana que presente características similares (Campos, 1992).

4.2.1.- Geomorfología de la cuenca

La geomorfología de una cuenca depende de la interacción de la geología, el clima y el movimiento de agua sobre la superficie terrestre (Jardí,1985). Para la estimación de los parámetros geomorfológicos de la cuenca y del cauce principal de la misma, se recurrió a las cartas topográficas vectoriales escala 1: 250,000, construidas a partir de los modelos digitales de elevación del Estado de Chihuahua, así como al programa de cómputo AutoCad versión 2006.

4.2.1.1.- Área o magnitud de la cuenca (A).-

Es la superficie plana en proyección horizontal delimitada por una línea imaginaria llamada parteaguas o divisoria. Para el cálculo del área es necesario delimitar su superficie por los puntos de mayor altura topografíca (Aparicio, 2006).

El área de la cuenca es el parámetro geomorfológico más importante para el cálculo de escurrimiento en modelos de hidrología, pero también existen otros parámetros que tienen su influencia en el escurrimiento como la longitud del colector principal, pendiente del cauce principal, pendiente de la cuenca, forma de la cuenca, coeficiente de compacidad y la densidad de drenaje (Jardí, 1985).

4.2.1.2.- Perímetro de la cuenca (P).-

Magnitud Fundamental correspondiente a la longitud de la frontera de la cuenca (Aparicio, 2006).

En la Figura 4.5 se encuentran los valores de superficie y perímetros de subcuencas de Pico de Águila, San Gabriel y Estación Hidrométrica Jiménez.

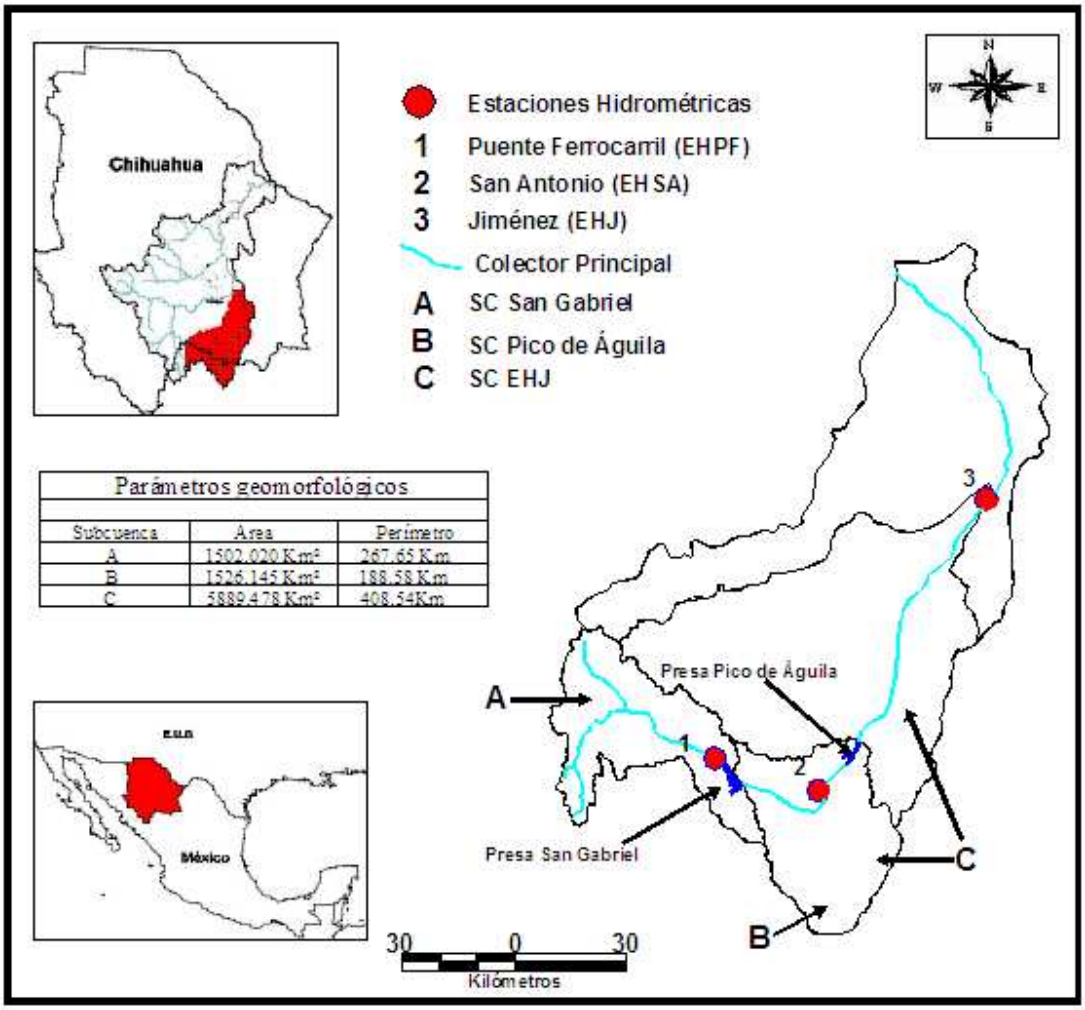


Figura 4.5.- Parámetros geomorfológicos de las subcuencas de las presas San Gabriel y Pico de Águila y de la Estación Hidrométrica Jiménez

4.2.1.3.- Geomorfología del colector principal

El colector principal, cauce principal o río principal es el que pasa por la salida de una cuenca exorréica, siendo el curso fluvial de mayor longitud (Aparicio, 2006).

4.2.1.3.1.- Longitud del colector principal

Es la distancia entre el punto de salida de la cuenca y el nacimiento (Campos, 1992). En la Tabla 4.3 se presentan las distancias de los colectores principales de las subcuencas de la zona de estudio y en la Figura 4.5 se observa el cauce principal de la cuenca media-alta del río Florido.

Tabla 4.3.- Longitudes del colector principal de las subcuencas Pico de Águila, San Gabriel y Estación Hidrométrica Jiménez

Subcuenca	Longitud del colector principal, en metros
SC SG	89,197.74
SC PA	77,278.55
SC EHJ	170,415.02
SC AT	236,871.37

4.2.1.4.- Parámetros de forma

La forma de la cuenca incide en eventos de avenidas máximas, por lo que es importante para las características (forma y duración) el hidrograma de descarga de un cauce. En general las cuencas se comportan hidrológicamente de diferente manera; aunque dos cuencas sean del mismo tamaño (igual superficie), al tener diferente forma, los hidrogramas de las tormentas serán diferentes. Para determinar la forma de la cuenca utilizamos diferentes parámetros que se describen a continuación (Campos, 1992):

4.2.1.4.1.- Índice de pendiente (Ip)

El índice de pendiente es un parámetro de forma utilizado en el método de Heras para el cálculo del volumen escurrido anual (Campos, 1992).

$$I_p = 100\sqrt{\frac{H}{L}} \qquad (3.5)$$

Donde Ip es el índice de pendiente de la cuenca, adimensional; L la longitud del colector principal, en m y H el desnivel total de la cuenca, en m.

4.2.1.4.2.- Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (Cc).-

El coeficiente de compacidad (Cc), es el índice adimensional que define la forma de la cuenca y es la relación entre el perímetro de la cuenca (P) en Km y el perímetro (Pc) de un círculo en Km con área igual al tamaño (A) de la cuenca en Km^2 y está dado por la siguiente fórmula (Campos, 1992):

$$Cc = \frac{P}{Pc} = \frac{0.282P}{\sqrt{A}} \tag{3.6}$$

Si el coeficiente de compacidad tiene valor de uno, la forma de la cuenca es totalmente circular, siendo la unidad el límite inferior (Campos, 1992).

4.2.2.- Tipo de Suelo

Debido a la ubicación geográfica, a su topografía y a sus condiciones climáticas, los suelos de México son complejos, pues se encuentran al menos 15 tipos (INEGI, 2010). En la cuenca media-alta del río Florido se tienen los siguientes tipos de suelo: Regosol, Litosol, Xerosol, Vertisol, Feozem, Rendzina, Chernozem, Yermosol y Planosol, que por sus características granulométricas y de permeabilidad se clasifican como: Tipo A a los suelos permeables, Tipo B a los medianamente permeables y Tipo C a los que son casi impermeables (SEMARNAT, 2002).

En la Tabla 4.4 se presenta la clasificación según el tipo de suelos y en la Figura 4.6 se presenta el plano de suelos para la cuenca media-alta del río Florido. Por la superficie que ocupan en la zona de estudio destacan los Xerosoles, Feozems y Litosoles.

Tabla 4.4.-Clasificación de suelos en la cuenca media-alta del río Florido

Nombre	Tipo
Regosol	A
Litosol	B
Xerosol	C
Vertisol	C
Feozem	C
Rendzina	B
Chernozem	C
Planosol	B
Yermosol	C

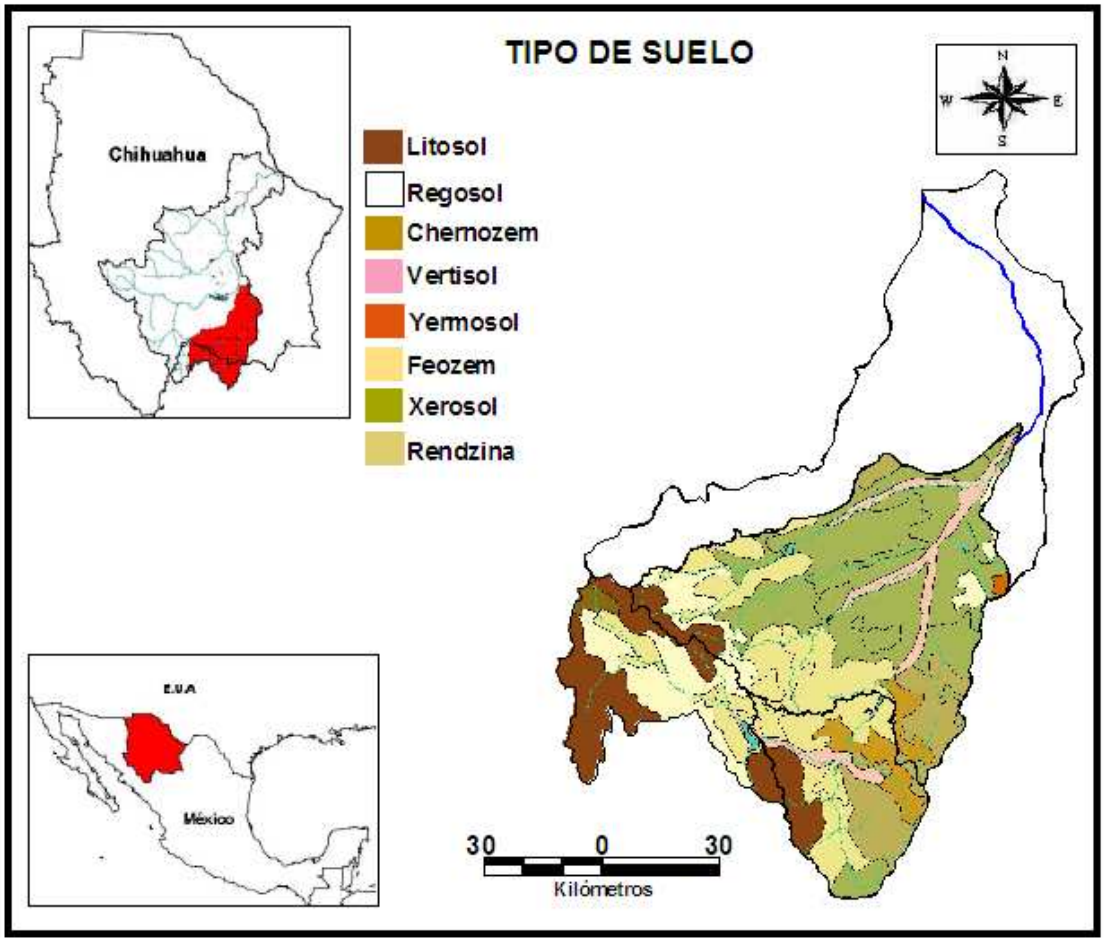


Figura 4.6.- Tipo de suelo de la Cuenca media-alta del río Florido

4.2.3.- Cobertura vegetal

La cobertura vegetal y el uso de suelo en la cuenca, incluye cualquier tipo de vegetación como pastizal, bosque, barbecho y cultivos, así como los usos no agrícolas como son aguas superficiales (embalses, lagos, pantanos, manantiales, etc.) (Campos, 1992).

Se determinaron los usos de suelo para las subcuencas de la cuenca media-alta del río Florido basados en las coberturas de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2010) (Ver Figura 4.7).

La subcuenca de Pico de Águila tiene 4 diferentes usos de suelo según INEGI (2010): pastizal natural, agricultura temporal, agricultura riego y bosque bajo-abierto. El pastizal natural predomina en la mayor parte de la cuenca con un 46% del total, siguiendo el bosque bajo-abierto y la agricultura temporal y de riego con un 28% y 26% respectivamente.

La subcuenca de la presa San Gabriel presenta diferentes usos de suelo y vegetación: bosque encino-pino, bosque pino-encino, bosque pino, bosque bajo-abierto, agricultura temporal y pastizal natural. El bosque en sus diferentes subgrupos: bosque encino-pino, bosque pino-encino, bosque pino, bosque bajo-abierto, predominan en esta subcuenca con un 61% del total, seguida del pastizal natural con un 33% y por último la agricultura temporal con un 6%.

En la subcuenca de Estación Hidrométrica Jiménez, se presentan las siguientes coberturas vegetales: bosque pino-encino, bosque bajo-abierto, pastizal natural, agricultura temporal, agricultura de riego, matorral desértico rosetófilo y matorral desértico micrófilo, predominando en la mayor parte de la cuenca el pastizal natural.

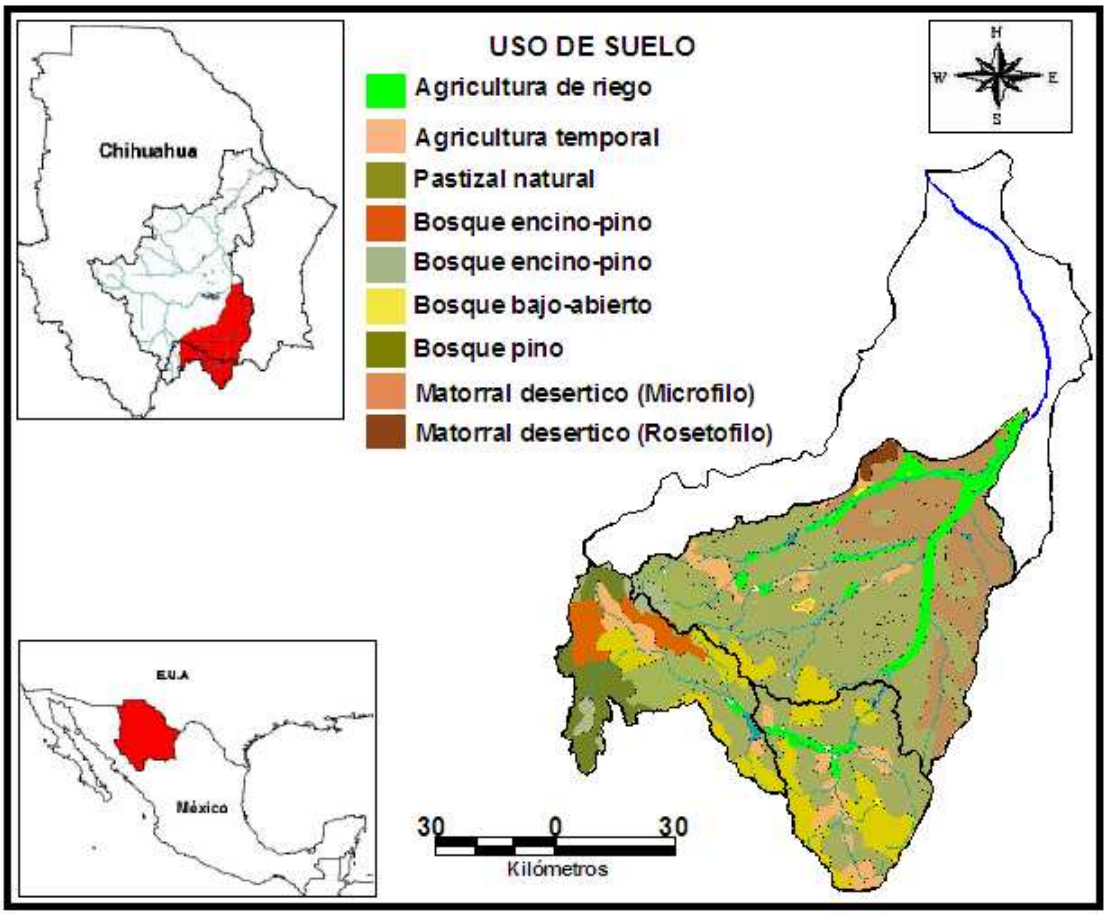


Figura 4.7.- Uso del suelo de la cuenca media alta del río Florido

4.2.4.- Coeficientes de escurrimiento

a) Se determino el coeficiente de escurrimiento (Ce) utilizando el procedimiento de transporte de información hidrométrica y climatológica de cuencas vecinas, hidrológicamente homogéneas en las subcuencas de Pico de Águila, San Gabriel y Estación Hidrométrica Jiménez (Véase Tabla 4.5) (SEMARNAT, 2002).

Tabla 4.5 Valores de Ce de las subcuencas de la cuenca media-alta del río Florido

Subcuenca	Ce
SC -SG	0.157955
SC-EHJ	0.022903
SC-AT	0.051483

b) En función del tipo, uso de suelo y el volumen de precipitación anual se clasificarón los suelos de la cuenca de estudio (Véase Capítulo 3, Método del Coeficiente de Escurrimiento) y se obtuvieron los parámetros k para las subcuencas de la cuenca media-alta del río Florido (SEMARNAT, 2002).

Con el valor k, el coeficiente de escurrimiento anual (Ce), se calcula con la Tabla 3.6 del Capítulo 3, en donde la evapotranspiración está incluida en el coeficiente de escurrimiento (Ver Tabla 4.6).

Tabla 4.6 Valores de "k" de las subcuencas de la cuenca media-alta del río Florido

Subcuenca	Parámetro "k"
SC -SG	0.2432
SC -PA	0.2581
SC-EHJ	0.2626
SC-AT	0.2573

c) Existen cuencas que cuentan con estudios hidrológicos en donde se conocen los coeficientes de escurrimiento, estos podrán utilizarse para el cálculo de escurrimiento.

El programa hidráulico de gran visión provee en el capítulo 5, el apartado 5.1.1.b el coeficiente de escurrimiento para la cuenca del río Conchos con un valor de 0.015, cabe hacer notar que el análisis de la cuenca del río Conchos involucra a la cuenca del río Florido (CNA, 2003).

Se utilizó el procedimiento 4.2.4 inciso b), para determinar los coeficientes anuales para el periodo de tiempo 1964 al 2002 (SEMARNAT, 2002).

4.3.- Climatología

Actualmente, la Comisión Nacional del Agua se encarga de proporcionar el servicio público de información meteorológica, climatológica e hidrométrica en todo el País.

Aunque el Estado de Chihuahua tiene una amplia extensión de 247, 455 Km^2 existen 121 estaciones climatológicas tradicionales, de las cuales apenas algunas 30 cuentan con registros completos para un periodo de tiempo de largo plazo. La información recabada en estas estaciones se concentra en la Gerencia Estatal de la Comisión Nacional del Agua. Esta información se remite a las oficinas del servicio meteorológico nacional, donde se incorpora al banco de datos climatológicos nacional (CNA, 2003).

4.3.1.- Estaciones climatológicas en la zona de estudio

En la zona de estudio existen varias estaciones climatológicas, sin embargo, no todas cuentan con registros confiables y completos. Para fines de la presente tesis se emplearon las series de tiempo de precipitación mensual y anual de 6 estaciones (Véase Figura 4.10). Los registros de temperatura media mensual y anual se obtuvieron de 5 estaciones que se presentan en la Figura 4.13. Aunque son las estaciones con mayor cantidad de registros, aún así fue necesario completar registros faltantes mediante técnicas estadísticas desarrolladas para este propósito (Campos, 1992).

4.3.2.- Precipitación mensual y anual

La cuenca media-alta del río Florido cuenta con suficiente información pluviométrica (mas de 20 años), la precipitación mensual y anual se determina a partir del análisis de registros de las estaciones ubicadas dentro de la cuenca, mediante el método de los Polígonos de Thiessen, según la norma oficial mexicana NOM-011-CNA-2000 (SEMARNAT, 2002)

Para la estimación de la precipitación promedio en la zona de estudio se utilizaron seis estaciones con información disponible: cinco se ubican en el Estado de Chihuahua: Jiménez, Parral, Escalón, El Vergel y Coronado y la otra se localiza en el Estado de Durango: San Gabriel, para un periodo de tiempo 1964 al 2002 (Ver Figura 4.10).

Las Figuras 4.8 y 4.9 muestran la precipitación media mensual y anual de las subcuencas de la zona de estudio.

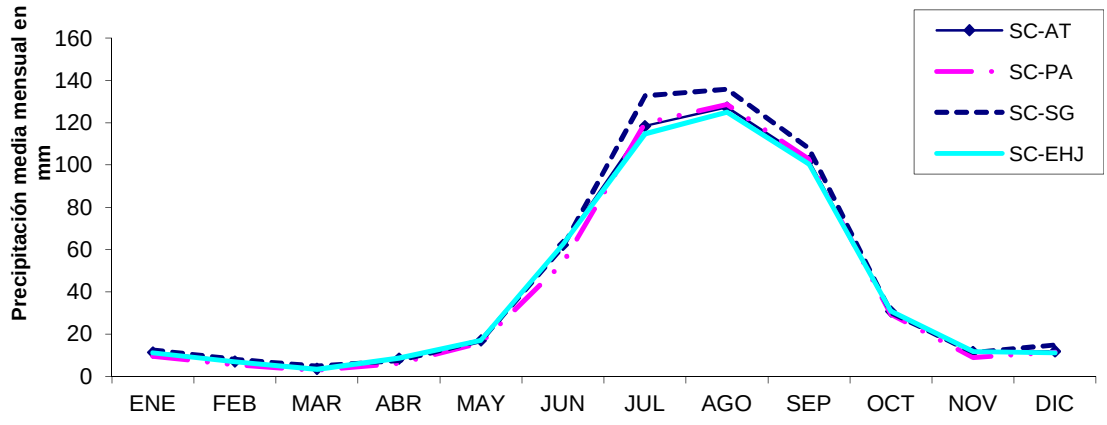


Figura 4.8.- Precipitación media mensual de la subcuencas de la zona de estudio para el periodo de 1964 al 2002

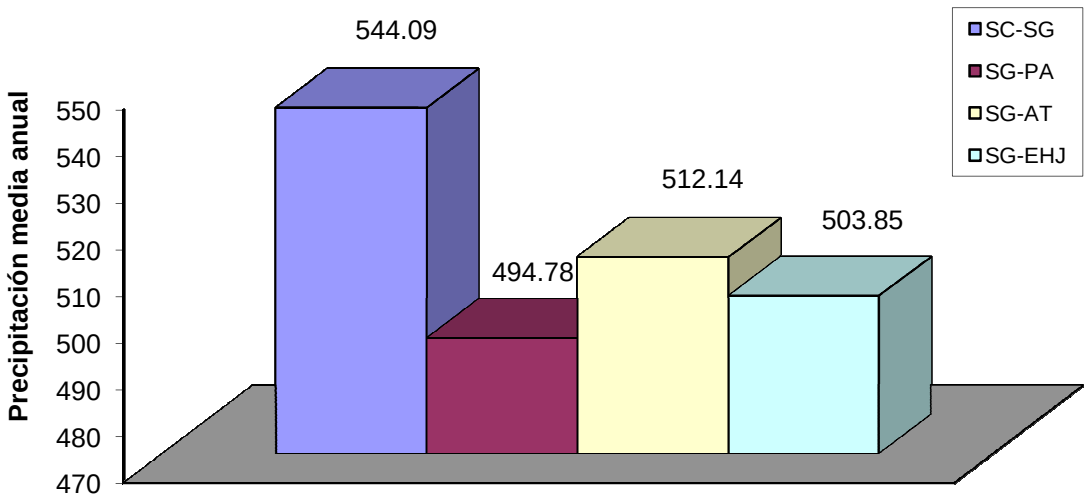


Figura 4.9.- Precipitación media anual en la zona de estudio

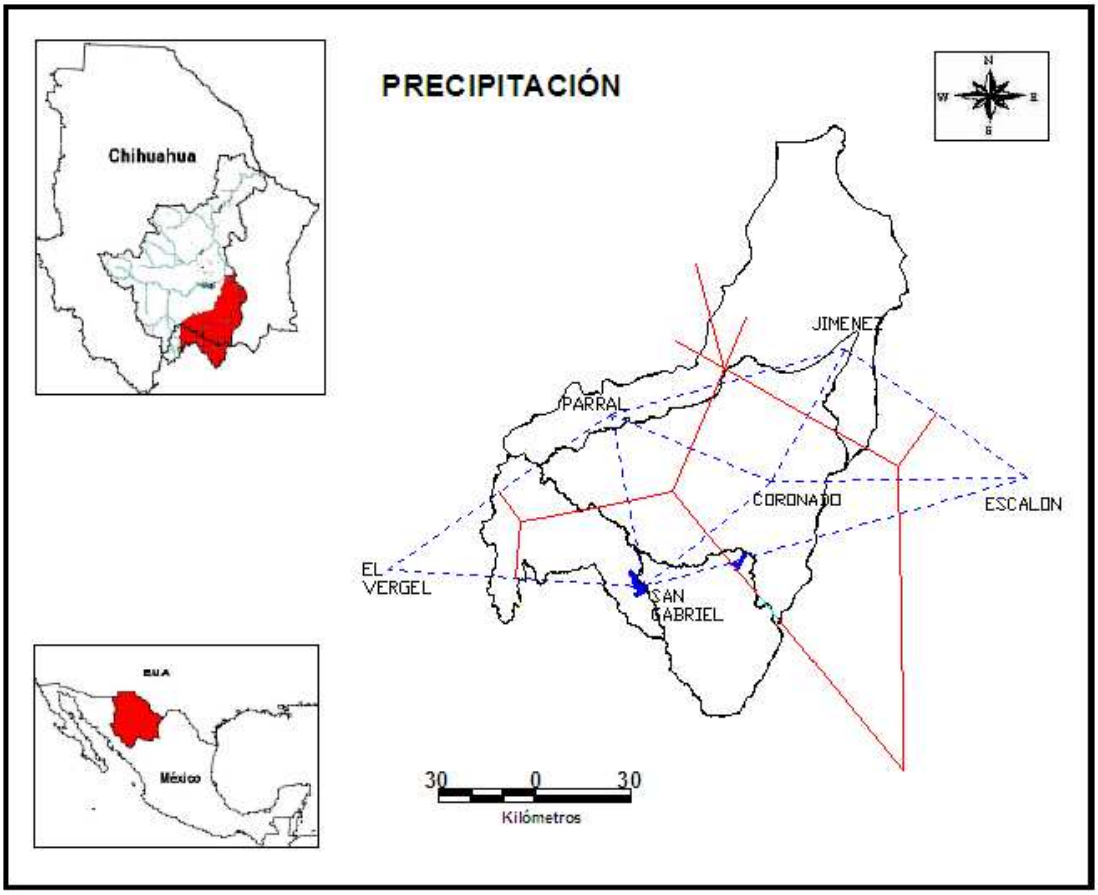


Figura 4.10.- Polígonos de Thiesen para la zona de estudio

4.3.3.- Temperatura mensual y anual

La cuenca media-alta del río Florido cuenta con 5 estaciones climatológicas para medir la temperatura, cuatro se ubican en el Estado de Chihuahua: Jiménez, Parral, Escalón y El Vergel y la otra se localiza en el Estado de Durango: San Gabriel, en el periodo de tiempo 1964 al 2002 (Véase Figura 4.13).

Las Figuras 4.11 a la 4.12 muestran la temperatura media mensual y anual de las subcuencas de la zona de estudio.

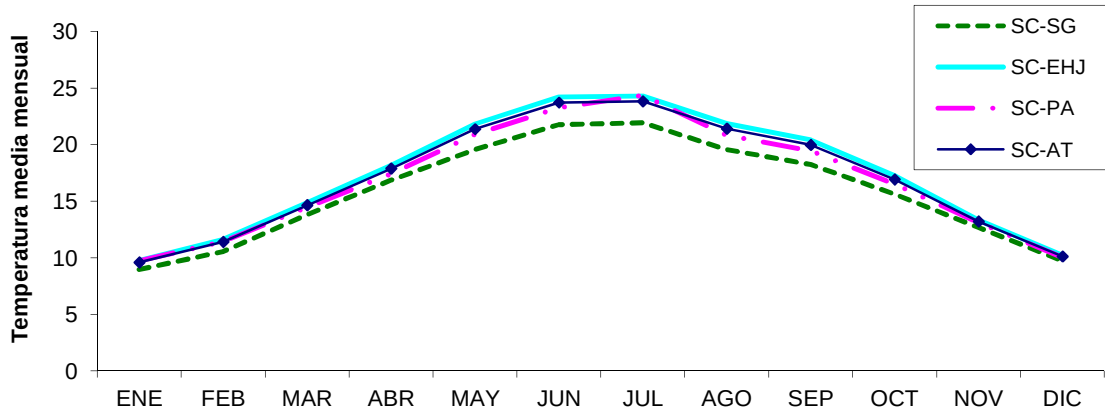


Figura 4.11.- Temperatura media mensual de la subcuencas de la zona de estudio para el periodo de 1964 al 2002

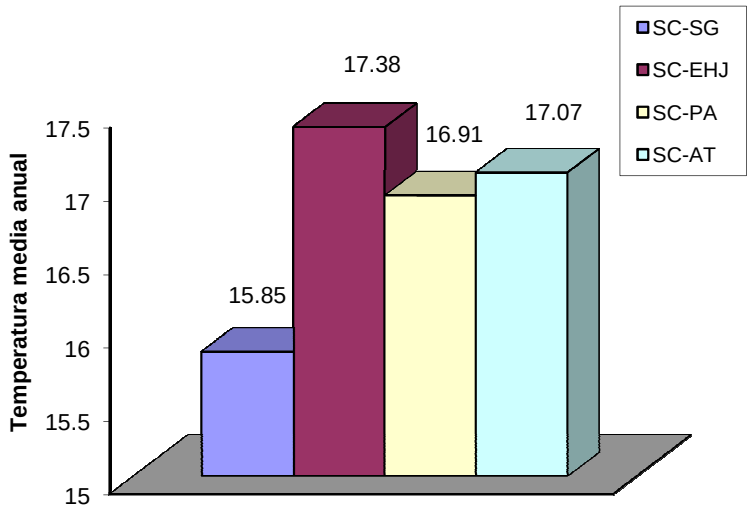


Figura 4.12.- Precipitación media anual en la zona de estudio

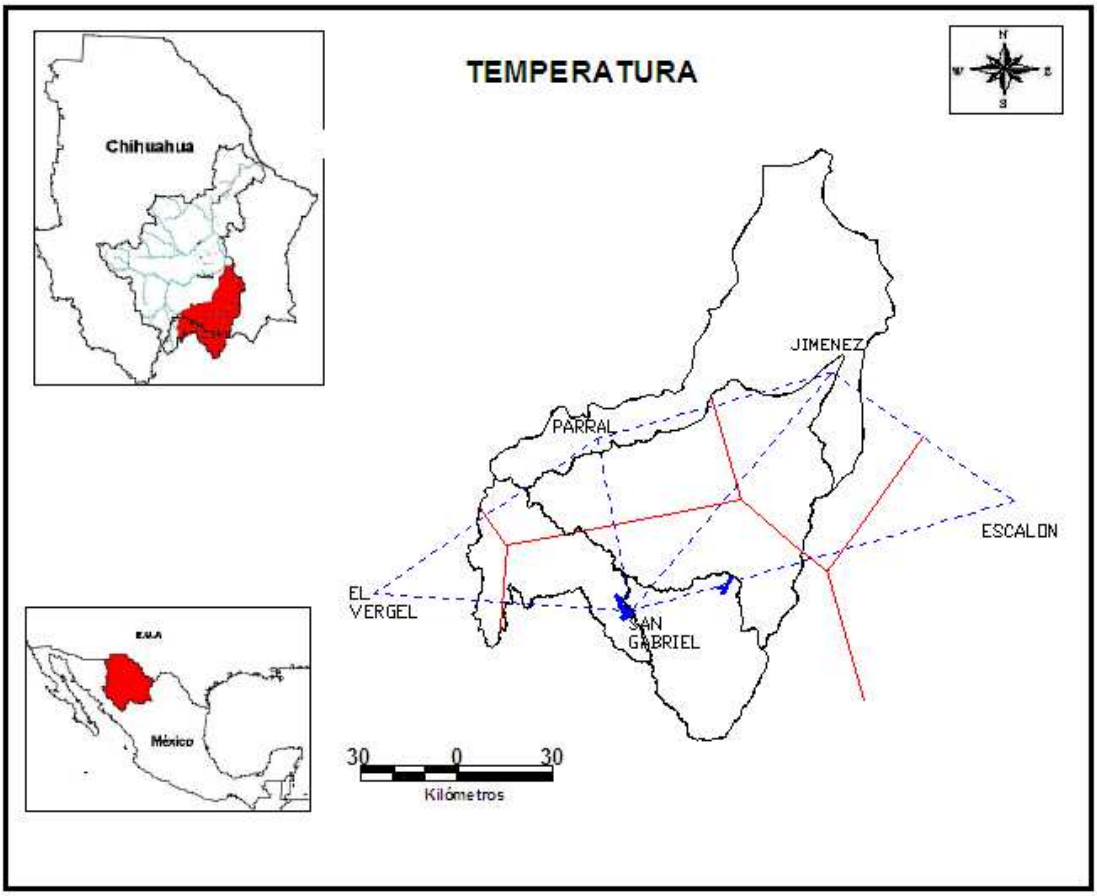


Figura 4.13.- Polígonos de Thiessen para la zona de estudio

4.4.- Escurrimientos naturales restituidos en sitios aforados

Los escurrimientos naturales restituídos fueron tomados del trabajo de investigación desarrollado por Silva (2010). En el Anexo 1, se presentan las tablas A.1 Y A.2 de los escurrimientos naturales de las subcuencas: (1) desde el inicio del río Florido hasta la presa de San Gabriel, (2) aguas abajo de la presa de San Gabriel hasta Estación hidrométrica Jiménez y (3) aguas abajo de la presa san Gabriel hasta presa Pico de Águila. Para las dos primeras subcuencas se cuentan con series de tiempo para el periodo de 1964 al año 2002, mientras que para la última sólo de 1994 al 2002.

4.4.1 Escurrimientos naturales restituidos anuales

La variabilidad hidrológica que se presenta en la cuenca media-alta del río Florido, se debe principalmente al régimen de precipitaciones, ya que éstas se presentan de manera erratica en la misma, lo cual se refleja en los volumenes de escurrimiento anuales (Véase Figuras 4.14 a la 4.16).

Los volumenes medio anuales que se presentan en las subcuencas San Gabriel y Estación Hidrométrica Jiménez para el periodo 1964 al 2002 son 140.20 hm^3 y 74.40 hm^3, mientras que para el periodo de 1994 al 2002 para la cuenca de Pico de Águila es 28.32 hm^3, con desviaciones estandar de 126 hm^3 y 61 hm^3 para las dos primeras y 11.36 hm^3 para la última; lo que constata la alta variabilidad, muy evidente en las dos primeras cuencas y enmascarada en la última debido al corto periodo de registro histórico disponible.

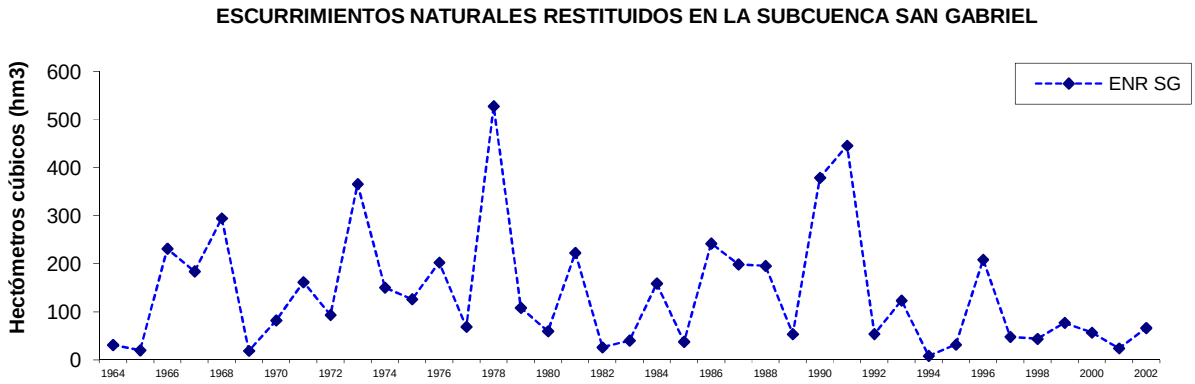


Figura 4.14.- Escurrimientos naturales anuales restituidos en la subcuenca SG para el periodo de 1964 al 2002.

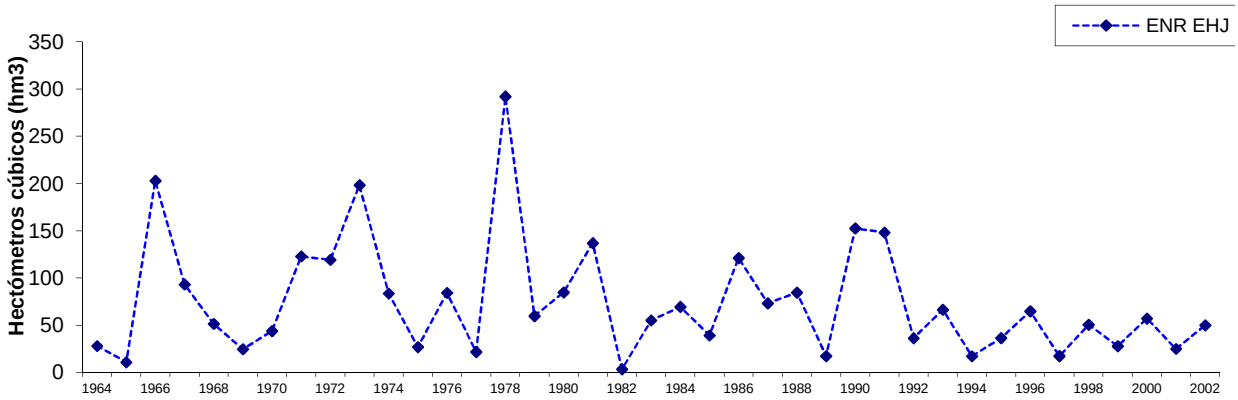


Figura 4.15.- Escurrimientos naturales anuales restituidos en la subcuenca EHJ para el periodo de 1964 al 2002.

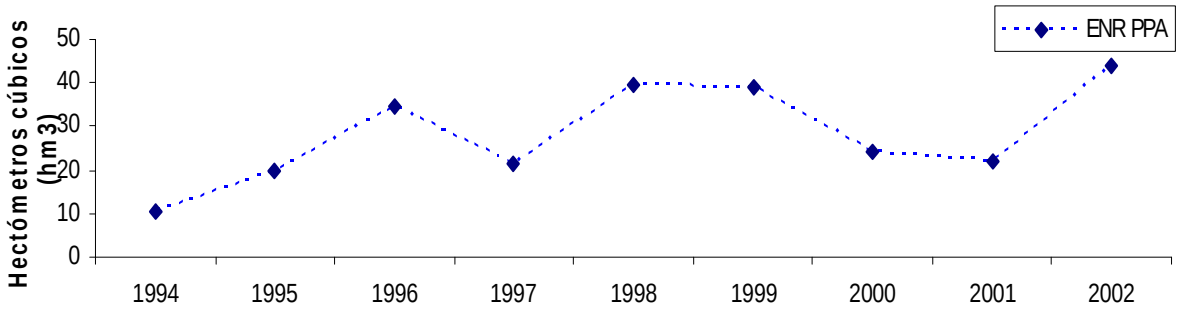


Figura 4.16.- Escurrimientos naturales anuales restituidos en la subcuenca PA para el periodo de 1994 al 2002.

4.4.2 Escurrimientos naturales restituidos mensuales

La distribución de los escurrimientos mensuales ayuda a percatarse del comportamiento hidrológico a lo largo del año (Véase Figuras 4.17 a la 4.19), en donde para la cuenca media-alta del río Florido los escurrimientos se presentan principalmente durante y ligeramente posterior a la temporada de lluvias, del mes de junio al mes de octubre (en las cuencas de la zona de estudio). En el resto del año se presentan escurrimientos mínimos asociados con el flujo base y en menor medida a flujos de retornos.

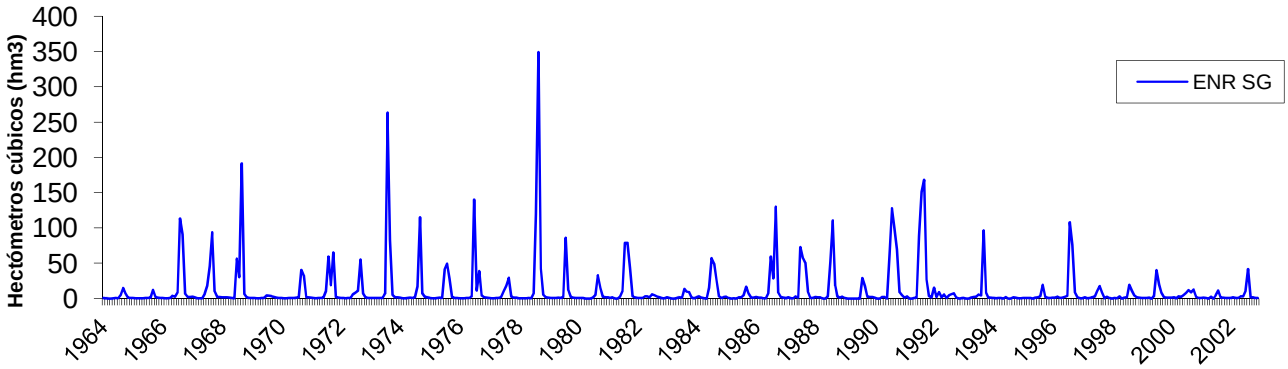


Figura 4.17.- Escurrimientos naturales mensuales restituídos en la subcuenca SG para el periodo de 1964 al 2002.

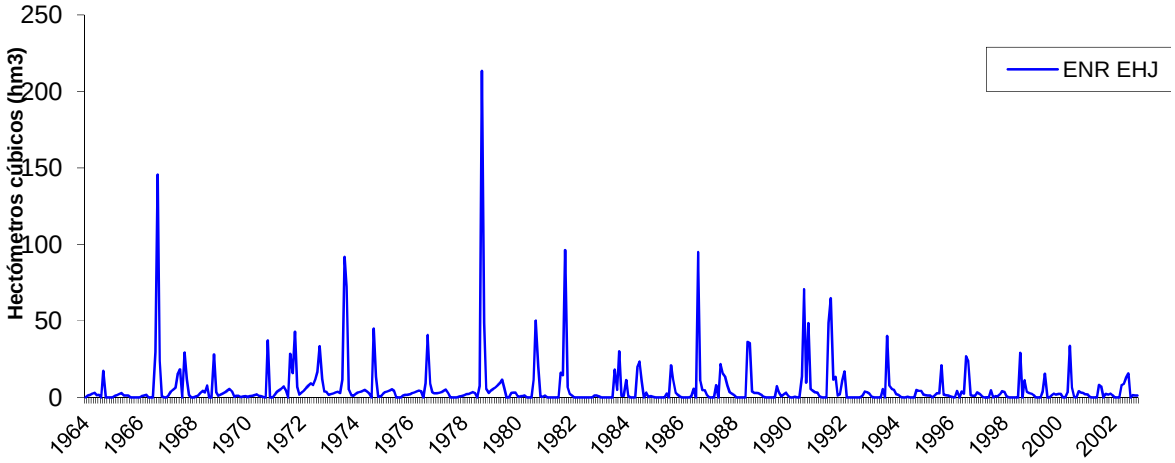


Figura 4.18.- Escurrimientos naturales mensuales restituídos en la subcuenca EHJ para el periodo de 1964 al 2002.

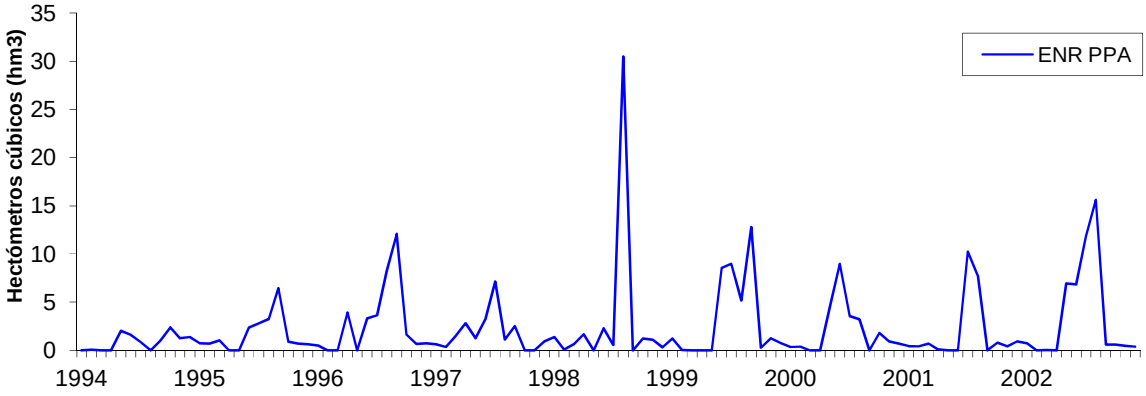


Figura 4.19.- Escurrimientos naturales mensuales en la subcuenca de la presa Pico de Águila para el periodo de 1994 al 2002.

4.5.- Escurrimientos naturales anuales estimados por métodos indirectos

4.5.1.- Métodos basados en el transporte y similitud de cuencas

Los métodos de transporte de infomación hidrométrica y similitud de cuencas utilizados en la presente investigación fueron: Área, Área y Precipitación, Heras y Becerril.

Para nuestro caso de estudio, la inferencia o transporte de información hidrométrica, hacia la subcuenca de la presa Pico de Águila se realizó de tres subcuencas: (1) Estación Hidrométrica Jiménez (EHJ), (2) Presa San Grabiel y (3) Área total; siendo esta última el escurrimiento natural restituído total de la cuenca media-alta del río Florido desde su inicio hasta la EHJ (Ver Figura 4.20).

Figura 4.20 Transporte de información hidrométrica

En Figuras 4.21 a 4.26 se muestran los escurrimientos naturales obtenidos por los diferentes métodos al ser transportados de las tres subcuencas antes identificadas. Las Figuras 4.21 a 4.23 muestran los escurrimientos para el periodo de análisis completo (1964 al 2002), mientras que las Figuras 4.24 a 4.26 para el periodo de 1994 al 2002, lo que facilita el análisis de los resultados.

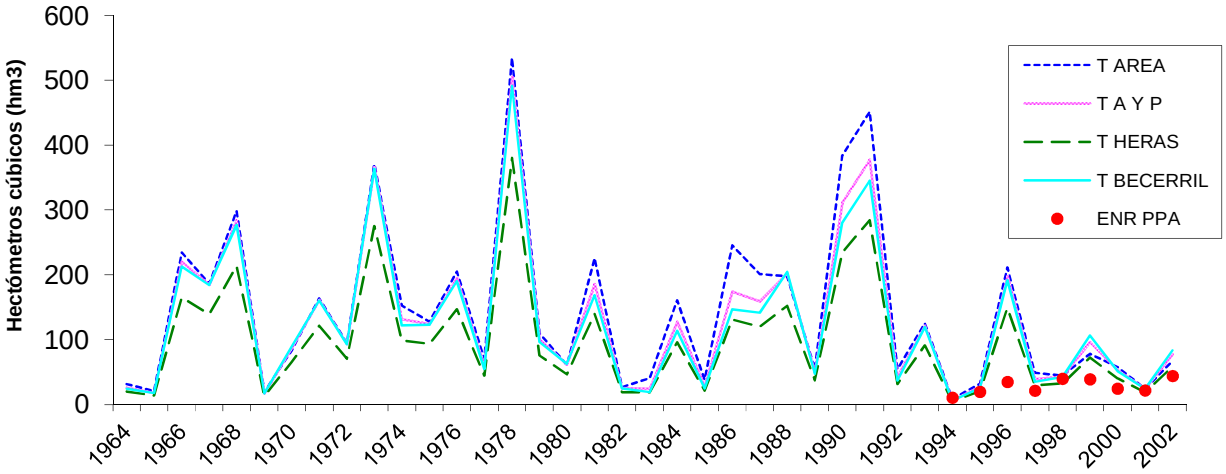


Figura 4.21 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila transportando información hidrométrica de la cuenca de San Gabriel para los años de 1964 al 2002.

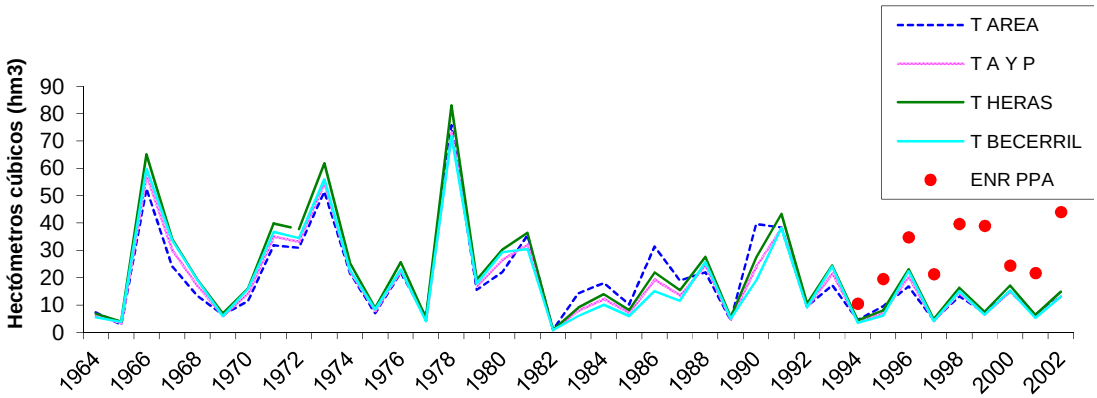


Figura 4.22 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila transportando información hidrométrica de la cuenca de Estación Hidrométrica Jiménez para los años de 1964 al 2002.

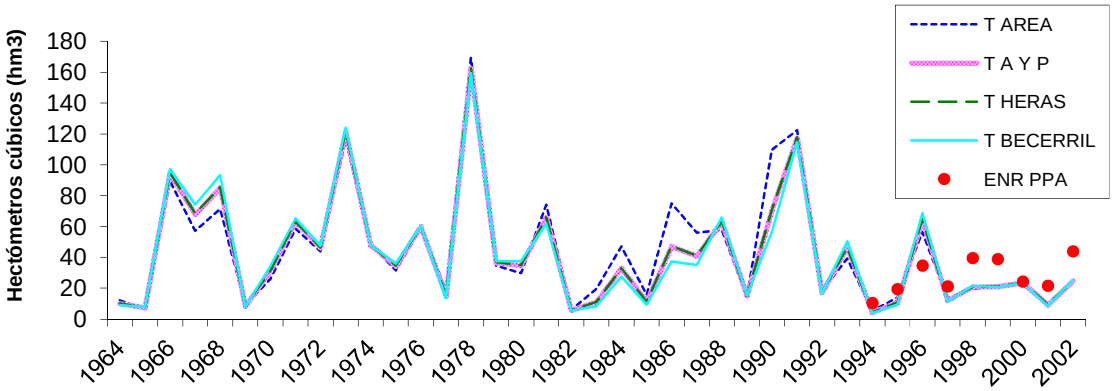


Figura 4.23 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila transportando información hidrométrica de la cuenca del área total para los años de 1964 al 2002.

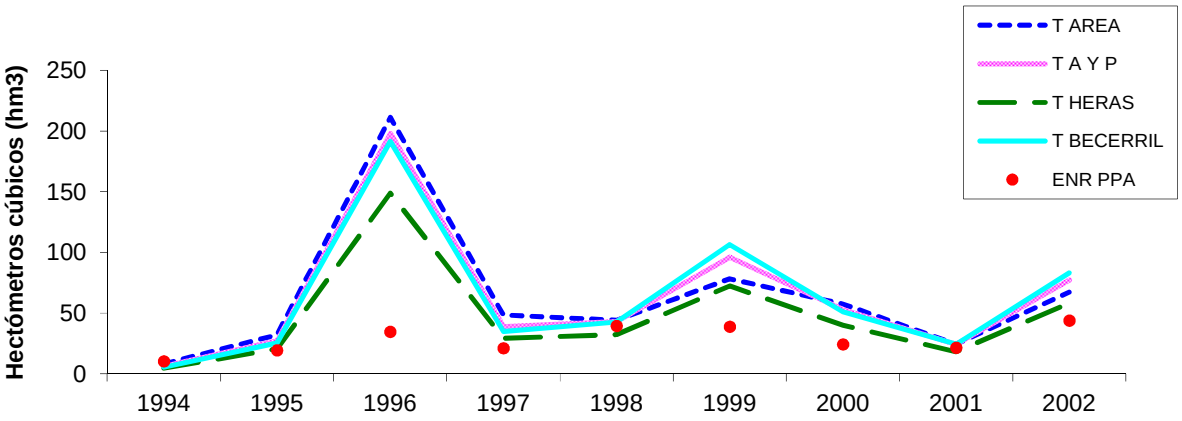


Figura 4.24 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila transportando información hidrométrica de la cuenca de San Gabriel para los años de 1994 al 2002.

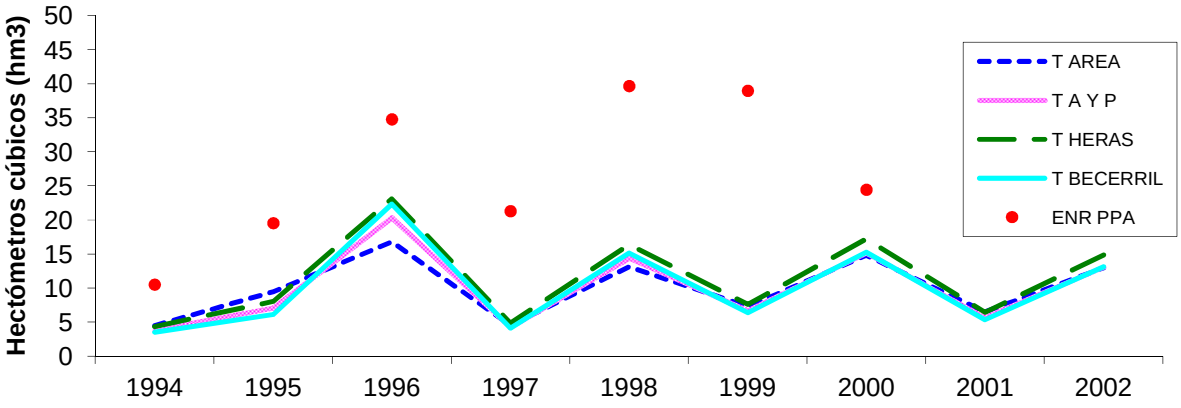


Figura 4.25 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila transportando información hidrométrica de la cuenca de Estación Hidrométrica Jiménez para los años de 1994 al 2002.

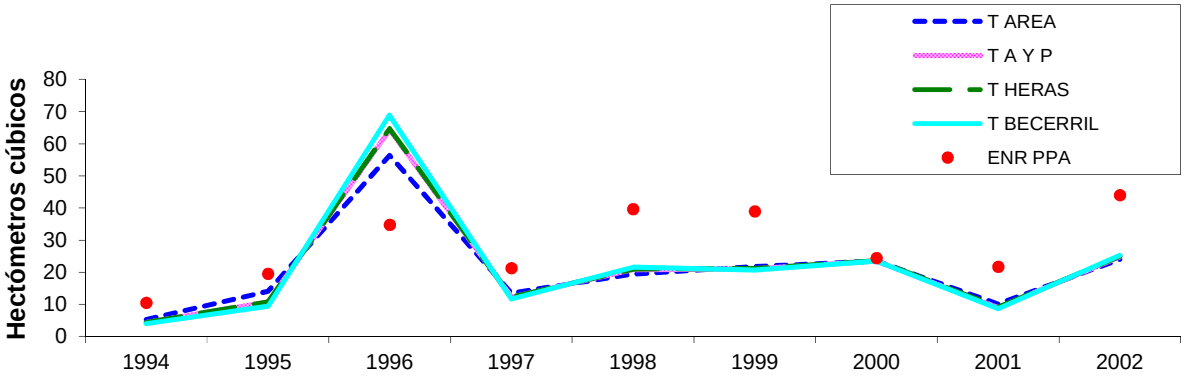


Figura 4.26 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila transportando información hidrométrica de la cuenca del área total para los años de 1994 al 2002.

La Tabla 4.7 muestra los volumenes medios anuales y la desviación estándar del periodo 1994 al 2002 utilizando los métodos de transporte y similitud de cuencas.

Los volumenes medio anuales transportandos de las diferentes subcuencas y sus desviaciones estándar no presentan diferencias significativas en cuanto a su cálculo, esto se debe a la similitud encontrada en la zona de estudio.

Tabla 4.7.- Volumenes medios anuales y desviaciones estándar en la presa Pico de Águila, utilizando los métodos de transporte y similitud de cuencas y restituidos para el periodo de 1994 al 2002

	Transportado de PSG		**Transportado de EHJ**		**Transportado de AT**		**Restituidos**	
Métodos de transporte y similitud de cuencas	Vol. Medio anual 1994 a 2002 (hm^3)	S 1994 a 2002 (hm^3)	Vol. Medio anual 1994-2002 (hm^3)	S 1994 a 2002 (hm^3)	Vol. Medio anual 1994-2002 (hm^3)	S 1994 a 2002 (hm^3)	Vol. Medio anual 1994-2002 (hm^3)	S 1994 a 2002 (hm^3)
Área	63.53	59.39	9.99	4.38	20.89	14.75	**28.32**	**11.36**
A y P	62.82	57.54	10.04	5.82	21.24	17.69		
Heras	47.25	43.28	11.41	6.62	21.33	17.77		
Becerril	62.87	57.36	10.14	6.55	21.51	19.28		

4.5.1.1.-Importancia de la similitud de cuencas para el empleo de los métodos de transporte

La similitud de cuencas es fundamental e indispensable para el transporte de información hidrométrica, ya que si no se analizan los parámetros físicos característicos de la cuenca (geomorfología), así como los parámetros hidroclimatológicos, se pueden producir errores de gran magnitud en la determinación de escurrimientos naturales.

Para definir la subcuenca que presenta mayor similitud con respecto a la subcuenca de análisis (subcuenca Pico de Águila) se análizaron indicadores geomorfológicos e hidroclimatólogicos representativos de la cuenca media-alta del río Florido, así como de sus subcuencas.

Los indicadores hidroclimatológicos y geomorfológicos que se emplearon para determinar el sitio idóneo de transporte a la subcuenca de la presa Pico de Águila fueron: la precipitación, temperatura, coeficiente de compacidad, índice de pendiente, parámetro k, pendiente general, volumen escurrido medio anual, longitud del colector principal, área, perímetro y elevación.

La Tabla 4.8 presenta los resultados de los parámetros hidroclimatológicos presentados por las subcuencas de la zona de estudio.

Tabla 4.8.- Parámetros Hidroclimatológicos y Geomorfológicos de la zona de estudio

PARÁMETROS	SC SG	SC EHJ	SC AT	SC PA
Precipitación	544.090	508.940	516.220	494.780
Temperatura	15.851	17.383	17.071	16.916
Coef. de Compacidad	1.940	1.501	1.628	1.361
Índice de pendiente	10.840	6.740	7.750	8.440
Parámetro K	0.2432	0.2626	0.2573	0.2581
Pendiente general	0.012	0.005	0.006	0.007
Vol. Esc. medio anual 1994 al 2002	63.530	9.980	20.880	28.320
Longitud del colector principal	89,197.74	170,415.02	236,871.37	77,278.55
Área	1506.02	5889.478	7395.498	1526.145
Perímetro	267.650	408.540	496.55	188.580
Elevación	2200.000	1700.000	2000	1875.000

La evaluación de los parámetros hidroclimatológicos y geomorfológicos (parámetros físicos) de la subcuenca de San Gabriel muestra que ésta se encuentra 325 metros por arriba de la subcuenca de interés. En ella se producen precipitaciónes mayores generando escurrimientos mayores. La cobertura vegetal y uso de suelo juegan un papel importante, ya que según el parámetro "k" la subcuenca de la presa de San Gabriel tiene un valor de 0.2432 contra 0.2581 de la subcuenca de la presa Pico de Águila. La sobrestimación del escurrimiento natural en Pico de Águila al transportar información de la subcuenca de San Gabriel, se debe principalmente a la cobertura vegetal, tipo de suelo, elevación, índice de pendiente y pendiente general.

La subcuenca de la presa San Gabriel no presentó mayores similitudes hidroclimatológicas y geomorfológicos, con respecto a la subcuenca de la Presa Pico de Águila, debido a las diferencias existentes de sus parámetros físicos (Véase Tabla 4.6).

Por otro lado, al transportar escurrimientos naturales de la subcuenca de Estación Hidrométrica Jiménez, los valores de los resultados quedan subestimados, es decir por abajo de los observados en la subcuenca de la presa Pico de Águila, esto se debe principalmente a la cobertura vegetal, tipo de suelo, índice de pendiente, pendiente general y elevación, ya que topográficamente esta se encuentra a una elevación menor con respecto a la subcuenca de Pico de Águila.

Los resultados de los parámetros hidrológicos de la subcuenca del área total, muestran que la temperatura, el índice de pendiente, la pendiente general, el parámetro "k" y la elevación son semejantes a la subcuenca Pico de Águila.

Finalmente, al aplicar los diferentes métodos y comparar sus resultados para el periodo de tiempo de 1994 al año 2002 con respecto a los escurrimientos naturales restituidos (observados), se obtuvo consistentemente que al transportar información de la subcuenca San Gabriel se sobreestiman los escurrimientos naturales en Pico de Águila; en contraste, al transportar información de la EHJ se obtienen escurrimientos naturales subestimados. Sin embargo, al transportar la información de la totalidad de la subcuenca (denominada área total, D, véase Figura 4.26 y Tabla 4.5), se obtienen escurrimientos naturales mas apegados a los observados. (Véase Figuras 4.21 a la 4.26).

4.5.2.-Métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica

En las Figuras 4.27 y 4.28 se observan los valores de los escurrimientos naturales estimados, con los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica, en donde para el periodo de tiempo de 1964 al 2002, los métodos de Coutagne y el de coeficiente de escurrimiento (k) reportan valores de escurrimientos naturales altos con respecto a los de Pico de Águila. Por el contrario, el método de Smith queda muy por debajo de los valores existentes de Pico de Águila.

Los métodos de Temez, Turc y Langbein, presentan gran similitud con los resultados de la cuenca en estudio utilizándolos a escala anual, siendo el método de Langbein el que aparentemente ofrece mayor grado de ajuste de sus resultados con respecto a los observados en Pico de Águila.

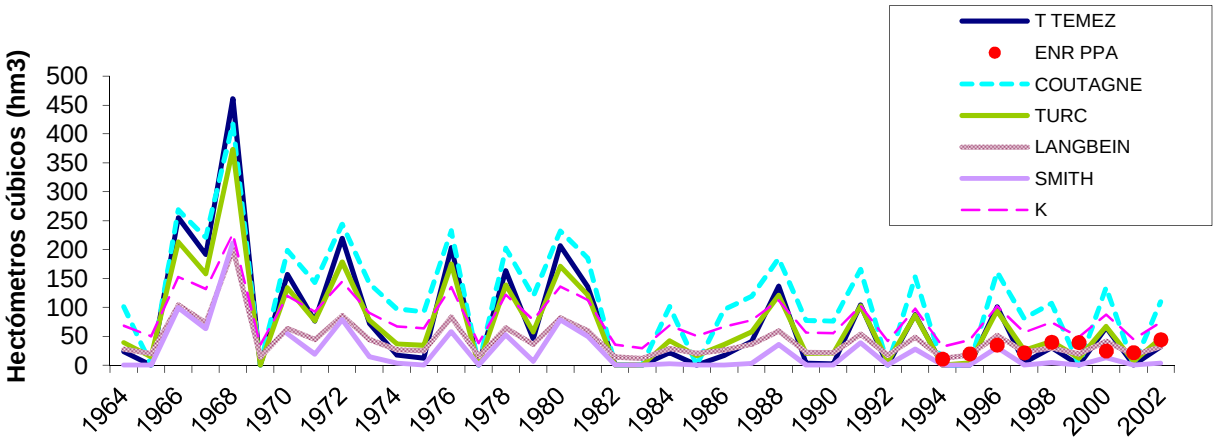


Figura 4.27 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica de 1964 al 2002.

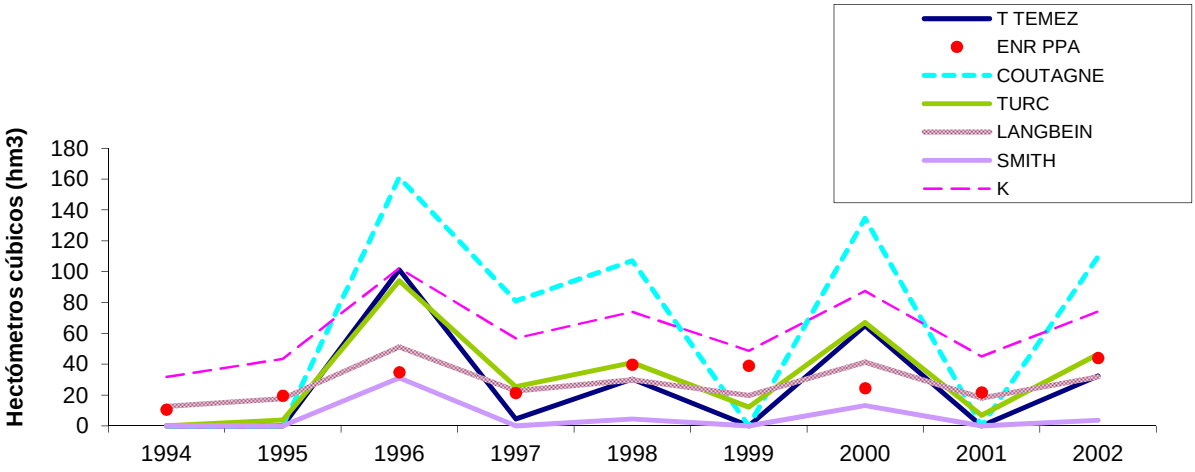


Figura 4.28 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica de 1994 al 2002.

4.6.-Escurrimientos naturales mensuales estimados por métodos indirectos

4.6.1.- Métodos desarrollados para escala de tiempo mensual

4.6.1.1.- Método del Balance Hídrico Edafológico

El método fue aplicado a la zona de estudio determinando la época de lluvia para los meses de junio a octubre y la época de estiaje para los meses de noviembre a mayo. Para determinar los escurrimientos naturales fue necesario la determinación del porcentaje que se considera adecuado para la humedad retenida, calibrando el método para varios años. Los resultados obtenidos mediante el balance hídrico edafológico fueron poco consistentes, comparados con los escurrimientos restituidos, tanto en cuantía como en distribución mensual (véase Figura No. 4.29). Los meses de junio y julio corresponden al inicio de la temporada de lluvia, sin embargo, el método del balance hídrico edafológico proporciona escurrimientos cero, muy distinto a como en realidad ocurrió.

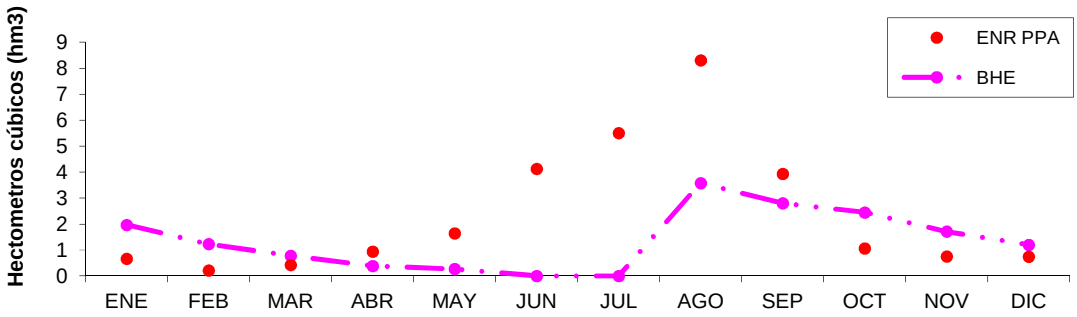


Figura 4.29 Escurrimientos naturales promedio mensuales en la cuenca de Pico de Águila utilizando el método del balance hídrico edafológico para el periodo de 1994 al 2002.

4.6.2.- Métodos originalmente desarrollados para escala de tiempo anual aplicados a la escala mensual

La distribución mensual de los escurrimientos naturales determina el régimen hidrológico a lo largo del año, información de mayor utilidad para fines de planificación del aprovechamiento del recurso hídrico en una cuenca o región hidrológica.

Los métodos originalmente desarrollados para escala de tiempo anual descritos anteriormente, fueron aplicados a escala mensual con la finalidad de determinar los escurrimientos naturales en la subcuenca de Pico de Águila.

De la totalidad de los métodos desarrollados para su aplicación a la escala de tiempo anual, incluyendo basados en: (1) transporte y similitud de cuencas y (2) parámetros físicos de la cuenca e información climatológica, sólo el de método de área, perteneciente al primer grupo pudo utilizarse en su condición original a la escala de tiempo mensual.

4.6.2.1.-Método del área aplicado a la escala de tiempo mensual

El método del área se aplicó en su condición original a la escala de tiempo mensual, utilizando la la Ecuación 3.1 del capítulo 3. Considerando el análisis de la importancia de la similitud de cuencas (apartado 4.5.1.1 de este capítulo) sólo se utilizó la subcuenca del área total para la determinación de los escurrimientos restituidos en la subcuenca del la Presa Pico de Águila. En la Figura 4.3 se muestra el hidrograma anual de escurrimiento restituido medio mensual del periodo de tiempo histórico del año 1994 al 2002, determinados para la cuenca de estudio por el método del Área. Obsérvese que en general se tiene un buen ajuste entre escurrimientos promedio mensuales que ofrece el método con respecto a los correspondientes escurrimientos naturales restituídos.

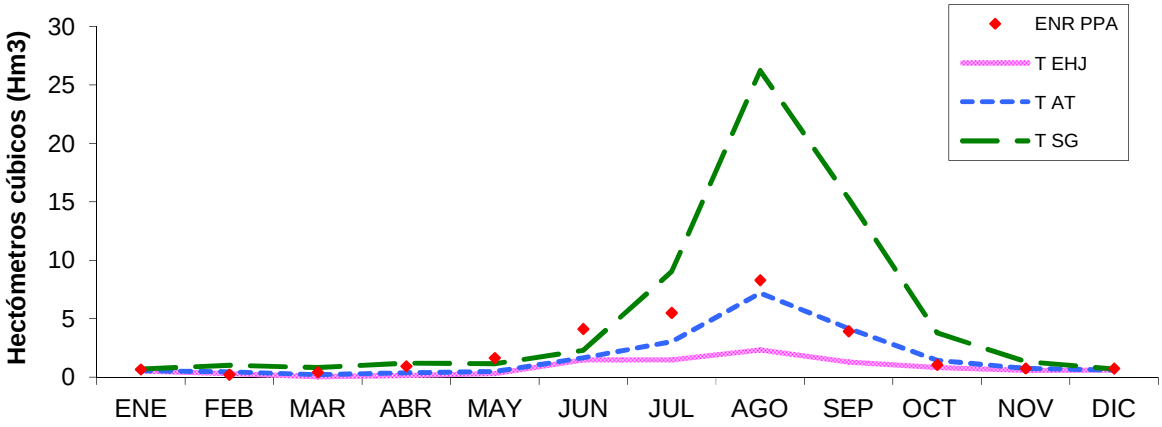


Figura 4.30 Promedio del volumen escurrido mensual en el periodo de tiempo de 1994 al 2002, transportando información hidrométrica de EHJ, SG, AT.

En las Figuras 4.31 y 4.32 se muestra la distribución mensual de los escurrimientos naturales utilizando el método del área para el periodo de tiempo de 1994 al 2002 y 1964 al 2002, obteniendo un buen grado de ajuste con respecto a los escurrimientos naturales restituidos.

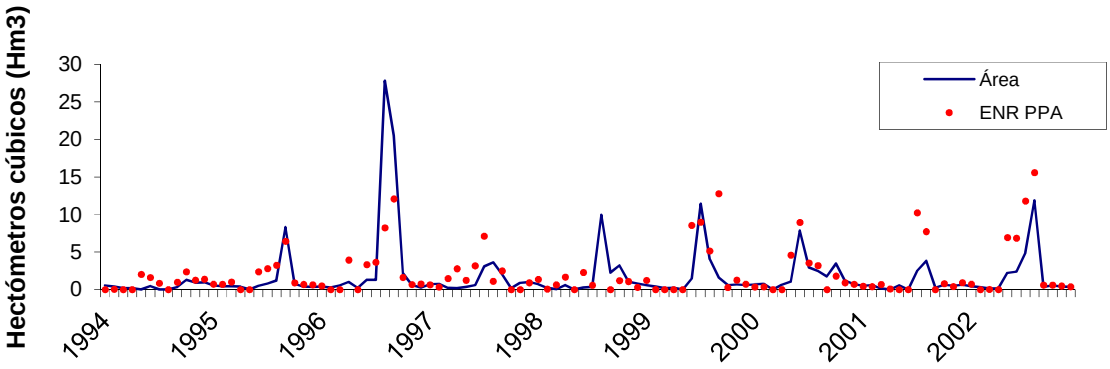


Figura 4.31 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando el método del Área para el periodo de 1994 al 2002

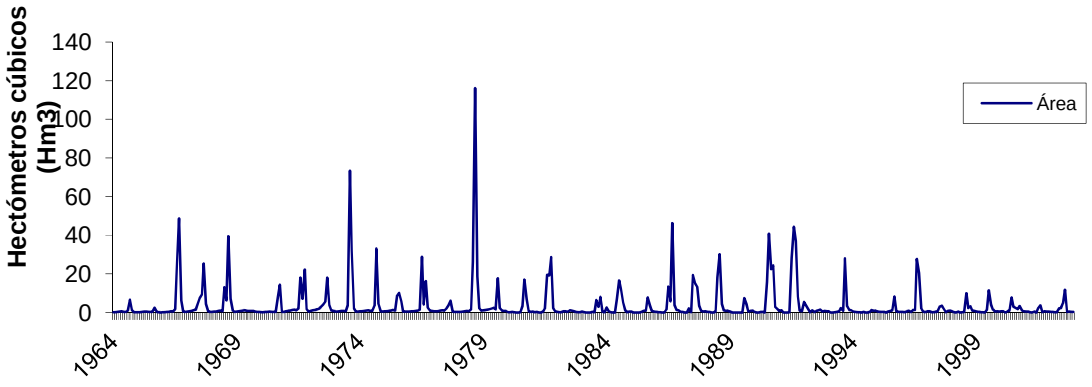


Figura 4.32 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando el método del Área para el periodo de 1964 al 2002

4.6.2.2.- Aplicación del método de los fragmentos en combinación con otros métodos anuales para obtener su distribución mensual

4.6.2.2.1.- Métodos de transporte y similitud de cuencas

Los métodos área y precipitación, Heras y Becerril -transporte y similitud de cuencas- no pueden aplicarse en su condición original para determinar escurrimientos naturales mensuales. Sin embargo, como se estableció en el apartado 3.4 de ésta tesis, es posible emplear el método de los fragmentos en combinación con estos para obtener su distribución mensual. Los fragmentos mensuales para cada año fueron determinados a partir del escurrimiento restituido mensual de la cuenca denominada área total.

En la Figura 4.33 se presenta el hidrograma anual de escurrimiento restituido medio mensual del periodo de tiempo histórico del año 1994 al 2002, determinado mediante los métodos de área y precipitación, Heras y Becerril así como los valores de los escurrimientos naturales restituidos (PPA).

La distribución del escurrimiento restituido medio mensual que se obtiene por los métodos de área y precipitación, Heras y Becerril en combinación con el de los fragmentos es similar; ello debido a la gran similitud de la cuenca área total con respecto a la cuenca de la Presa Pico de Águila (Ver apartado 4.5.1.1).

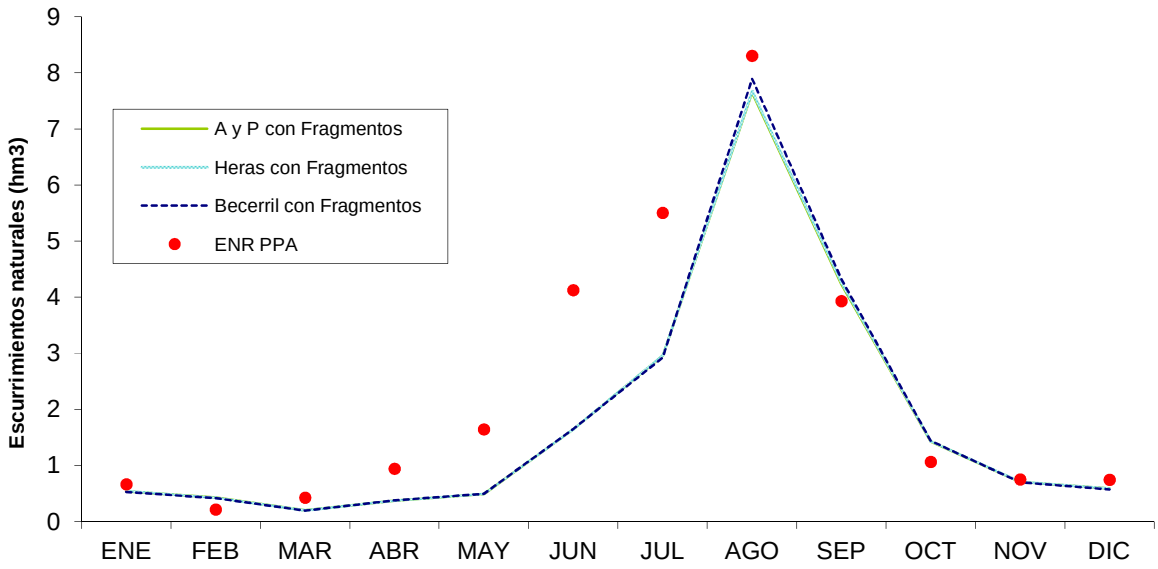


Figura 4.33 Promedio del volumen natural escurrido mensual en el periodo de tiempo de 1994 al 2002.

En las Figuras 4.34 y 4.35 se muestra la distribución mensual de los escurrimientos naturales restituidos utilizando los métodos de transporte y similitud de cuencas en combinación con el método de fragmentos para el periodo de tiempo de 1994 al 2002 y de 1964 al 2002. Los resultados de los métodos de área y precipitación, Heras y Becerril son similares.

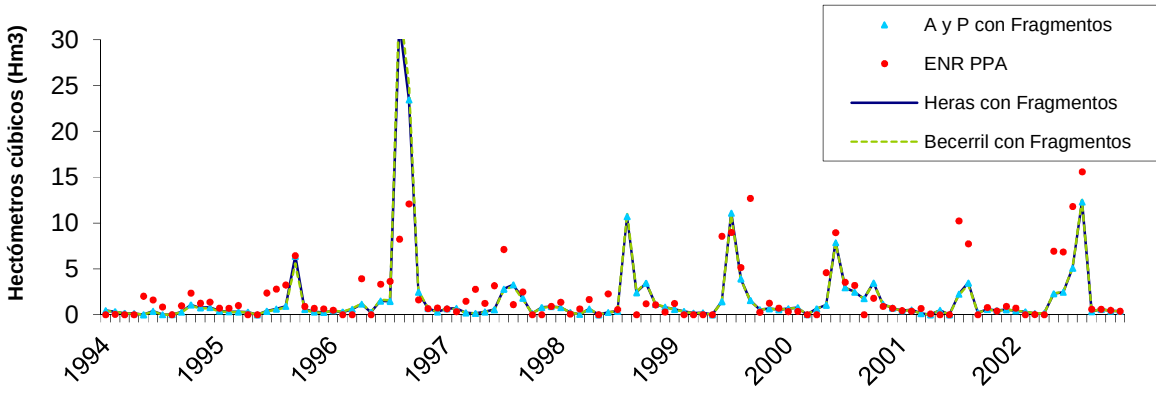


Figura 4.34 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando los métodos de transporte y similitud de cuencas en combinación con el método de los fragmentos de 1994 al 2002.

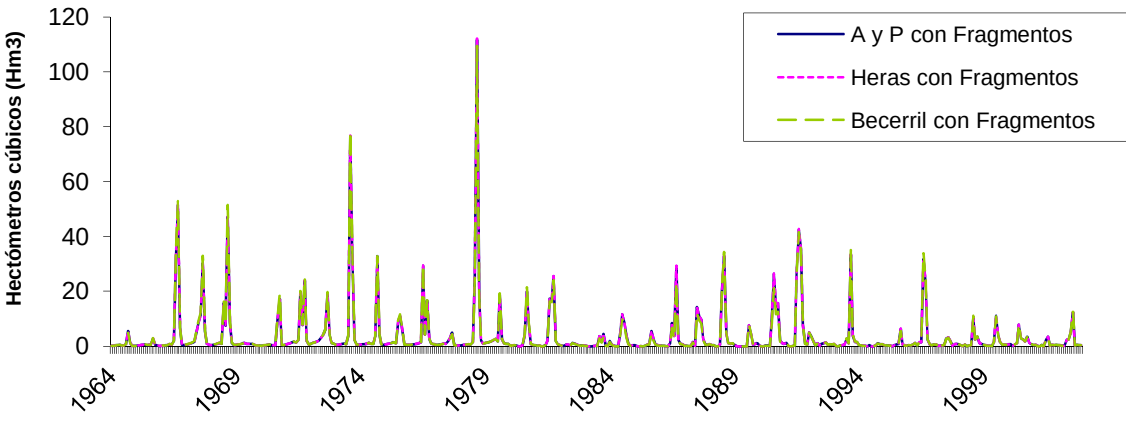


Figura 4.35 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando los métodos de transporte y similitud de cuencas en combinación con el método de los fragmentos de 1994 al 2002.

4.6.2.2.2.- Métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica

Los métodos de basados en parámetros físicos de la cuenca fueron combinados con el método de los fragmentos (Svandize, 1964). Como se había detectado anteriormente (apartado 4.6.2) para el periodo de 1994 al 2002, los métodos de Coutagne y el del coeficiente de escurrimiento (k) sobrestiman los escurrimientos naturales restituidos, mientras que el método de Smith los subestima, lo cual es mas evidente para los meses de precipitación (junio a octubre para la subcuenca de estudio). Por otro lado, con los métodos de Langbein, Temez y Turc se obtienen escurrimientos más consistentes con respecto a los escurrimientos naturales restituidos (observados) (Figura 4.36).

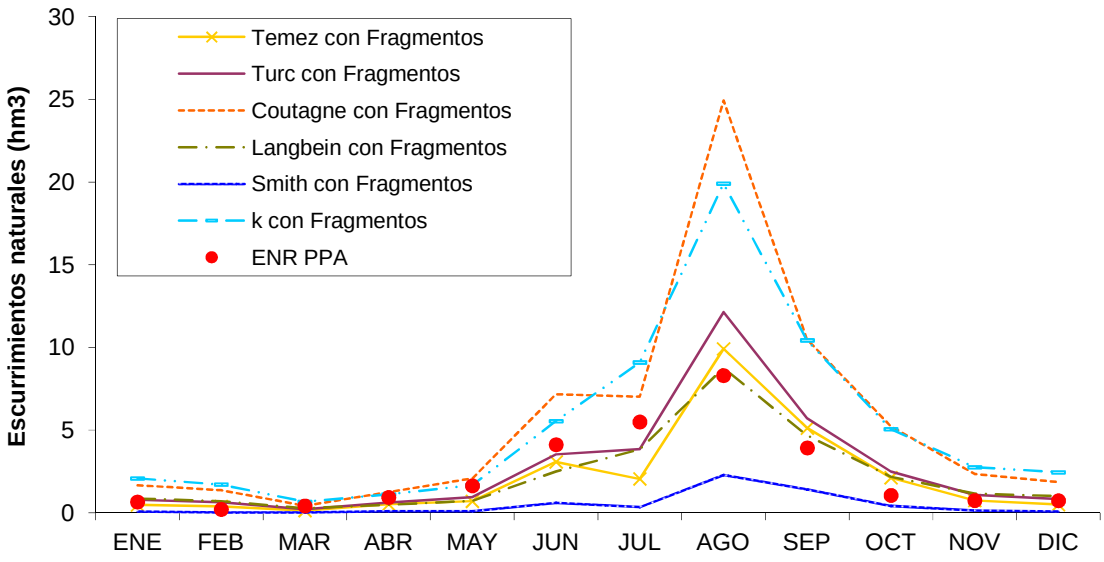


Figura 4.36 Promedio del volumen natural escurrido mensual en el periodo de 1994 al 2002.

En la Figura 4.37 se muestra la distribución mensual de los escurrimientos naturales utilizando los métodos de Temez, Turc y Langbein, que son los que tuvieron mejor ajuste para el periodo de tiempo de 1994 al 2002. En la Figura 4.38 se muestra la distribución mensual de los escurrimientos naturales para los métodos de Coutagne, Smith y del coeficiente de escurrimiento, que alcanzaron menor ajuste para ese mismo periodo.

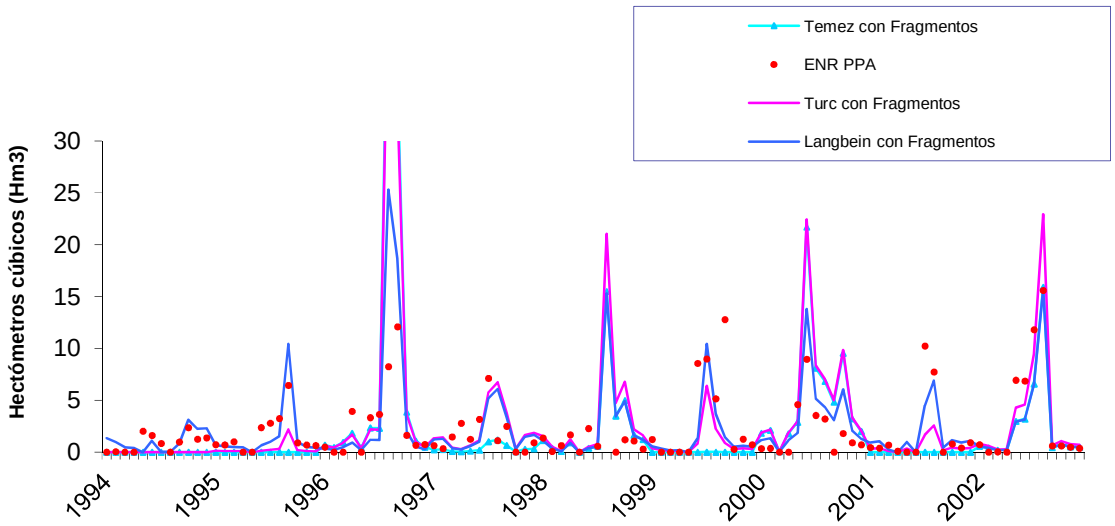


Figura 4.37 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica en combinación con el método de los fragmentos de 1994 al 2002.

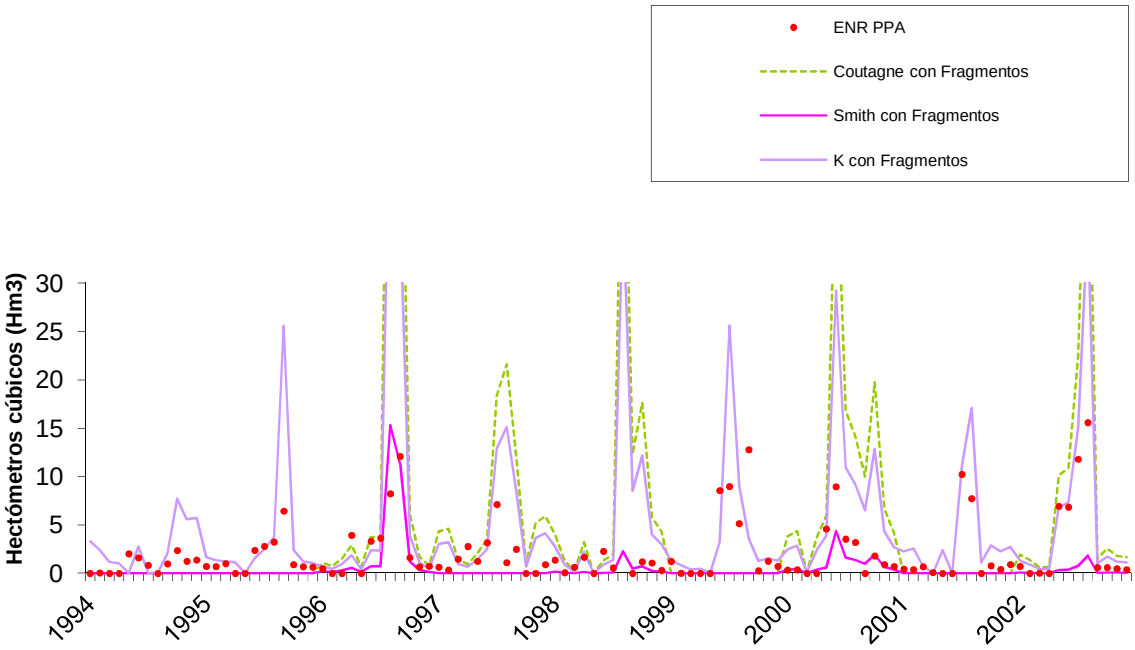


Figura 4.38 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica en combinación con el método de los fragmentos de 1994 al 2002.

En la Figura 4.39 se muestra la distribución mensual de los escurrimientos naturales de los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica en combinación con el método de los fragmentos para el periodo de tiempo de 1964 al 2002.

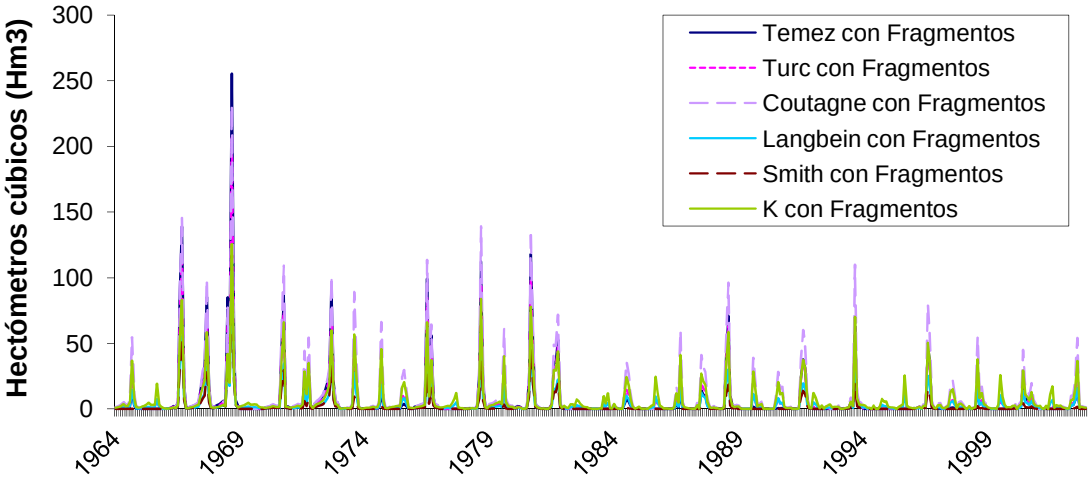


Figura 4.39 Escurrimientos en la cuenca de Pico de Águila utilizando los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica en combinación con el método de los fragmentos de 1964 al 2002.

CAPÍTULO 5.- Modificación y adaptaciones a métodos existentes para la estimación de escurrimientos naturales a las escalas de tiempo anual y mensual.

Como previamente se estableció en los capítulos 3 y 4 de este trabajo de investigación, fue necesario combinar los métodos anuales existentes con el de los fragmentos para su aplicación a la escala de tiempo mensual, con excepción del método de área, que en su condición original pudo aplicarse mensualmente. En este capitulo se analizarán los métodos existentes, así como las razones por las cuales no pudieron ser empleados a la escala mensual en su condición original. Adicionalmente, cuando ello sea posible, se planteará: (1) una modificación al método original (método modificado o nuevo) o (2) una adaptación del mismo para su uso en la zona y subcuenca de estudio.

5.1.- Método de área y precipitación

Al igual que el resto de los métodos, en el de área y precipitación se establece que la totalidad del escurrimiento anual que se presenta en la cuenca aforada se asocia con la precipitación anual en la misma. Si bien, lo anterior es cierto a la escala de tiempo anual – asumiendo que el escurrimiento base permanece relativamente constante interanualmente – no es valido para la escala de tiempo mensual debido a la muy baja o nula correlación que existe entre el escurrimiento durante los meses de estiaje (preferente o completamente flujo base o flujos de retorno) y la precipitación en ese mismo periodo, como se había señalado previamente en el apartado 3.4 del capitulo 3. Como primera alternativa de solución se combinó este método con el de los fragmentos (Véase apartado 3.4), sin embargo, si analizamos el método de área y precipitación y tomamos en cuenta que el método de área si pudo ser empleado a la escala de tiempo mensual, es posible llegar a una segunda alternativa (distinta a la de los fragmentos) para determinar los escurrimientos mensuales.

5.1.1.- Problemática que presenta el método de área y precipitación para su aplicación a la escala de tiempo mensual

De acuerdo con lo establecido en el capitulo 3, los volúmenes anuales en la cuenca no aforada, V_x, se determinan mediante la siguiente ecuación:

$$V_x = \frac{A_x}{A_d}\left(\frac{P_x}{P_d}\right)V_d \qquad (5.1)$$

En donde A_x y P_x son el área y la precipitación anual respectivamente, en la cuenca no aforada y A_d, P_d y V_d, son el área, la precipitación anual y el volumen de escurrimiento anual en la cuenca aforada. Al intentar utilizar esta ecuación a la escala de tiempo mensual se pueden presentar los siguientes problemas:

Cuando $P_d = 0$; V_x = indefinición

Cuando $P_x = P_d = 0$; V_x = indeterminación

Cuando $P_x = 0$; $V_x = 0$

Para que alguno o varios de estos problemas se presentaran, al aplicar el método a la escala de tiempo anual (para la cual fue concebido), se necesitaría que la precipitación anual en alguna o ambas de la cuencas fuese nulo (igual a cero), lo que resulta estadística y físicamente improbable. Sin embargo, a la escala de tiempo mensual puede resultar muy común.

5.1.2.- Método de área y precipitación Modificado

El método se basa en el transporte de información, en este caso del escurrimiento aforado en la cuenca con estación hidrométrica a la cuenca no aforada y fue derivado del método de área. Dicha transferencia se realiza empleando dos factores (Véase Ecuación 5.1)); primero como una proporcionalidad entre el área de ambas cuencas , A_x / A_d, luego como una proporcionalidad entre la relación de la precipitación en ambas cuencas, P_x / P_d. Obsérvese que el primer factor (relación de áreas) no presenta problemas al emplearse a la escala de tiempo mensual. Así mismo, obsérvese que el segundo factor sólo presenta problemas cuando la lluvia en alguna o ambas de las cuencas es nula, lo que puede ocurrir durante cualquier mes que no corresponda a la temporada de precipitaciones. También considérese que una precipitación nula durante un mes en una o ambas cuencas sólo implica que el escurrimiento directo es nulo (el generado directamente por la precipitación en forma relativamente inmediata), sin embargo, definitivamente no implica que el escurrimiento base también lo sea. Por lo anterior el método de área y precipitación puede convertirse en el de área cuando se tenga certeza de que la precipitación mensual no genera escurrimiento directo, con lo cual se estaría transfiriendo únicamente el escurrimiento base.

Para determinar cual es la precipitación mensual que tiene el potencial de producir escurrimiento mensual, se pude determinar utilizando el método de las curvas número (Woodward *et al*. 1999), que permite calcular la precipitación efectiva, P_e, es decir el volumen de precipitación que efectivamente escurre y consecuentemente es la que genera el escurrimiento directo.

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)\wedge 2}{P + 0.8S} \qquad \text{Para } (P > 0.2S) \qquad (5.2)$$

$$S = \frac{25,400}{N} - 254$$

En donde *N* es la curva número que considera las características físicas de la cuenca, como son la pendiente, el tipo de suelo y la cobertura vegetal, *S* es el potencial de retención y *P*, la precipitación en la cuenca (en este caso mensual) (Campos, 1992).

Mediante la Ec. (5.2) es factible determinar la precipitación mínima (P_{min}) en la cuenca a partir de la cual se puede generar escurrimiento directo (P_e>0). Para introducir este concepto al método de área y precipitación se necesita que el factor de transferencia se anule en aquellos meses en los cuales la precipitación, *P*, sea menor que la precipitación mínima que produce escurrimiento, $P_{mín}$, lo cual se puede lograr de la siguiente manera:

$$V_x = \frac{A_x}{A_d}\left(H(P_x - P_{x-\min}) \bullet H(P_d - P_{d-\min})\right)\left(\frac{P_x}{P_d}\right)V_d + \left|[H(P_x - P_{x-\min}) \bullet H(P_d - P_{d-\min})] - 1\right|\left(\frac{A_x}{A_d}\right)V_d \qquad (5.3)$$

Donde $P_{d\text{-}min}$ y $P_{x\text{-}min}$ son los escurrimientos mínimos que producen una P_e>0 en la cuenca aforada y sin aforar respectivamente; $H(\cdot)$ representa la función escalón unitario de Heaviside, definida como:

$$H(\zeta) = \begin{cases} 1 \text{ si } \zeta \geq 0 \\ 0 \text{ si } \zeta < 0 \end{cases} \qquad (5.4)$$

Así, la Ec. (5.3) a partir de los valores de precipitación en la cuenca aforada, P_d y en la cuenca no aforada, P_x, pueden generarse tres escenarios cuando (1) P_d<$P_{d\text{-}min}$, (2) cuando P_x<$P_{x\text{-}min}$ y (3) cuando sucede ambos, $H(P_x - P_{x-\min}) \bullet H(P_d - P_{d-\min}) = 0$ con lo que el primer argumento de la Ec. (5.3) se anula, mientras que $\left|[H(P_x - P_{x-\min}) \bullet H(P_d - P_{d-\min})] - 1\right| = 1$, con lo que el segundo argumento de la Ec. (5.3) es equivalente al método de área (véase Ec 3.1, del capitulo 3). En el caso cuando P_d>$P_{d\text{-}min}$ y P_x>P_d, $H(P_x - P_{x-\min}) \bullet H(P_d - P_{d-\min}) = 1$ y $\left|[H(P_x - P_{x-\min}) \bullet H(P_d - P_{d-\min})] - 1\right| = 0$, anulando el segundo argumento de la Ec (5.3), en tanto que el primer argumento es equivalente a la Ec.(5.1).

5.2. - Método de Heras

Del análisis de la metodología del método de Heras que se presentó en el apartado 3.2.3 del capítulo 3, la determinación del escurrimiento natural en la cuenca no aforada (V_{NA}) se realiza mediante la siguiente expresión matemática:

$$V_{NA} = K\frac{A_{NA}}{A_A}\left(\frac{P_{NA}}{P_A}\right)V_A \qquad (5.5)$$

En donde A_{NA} y P_{NA} son el área y la precipitación anual respectivamente, en la cuenca no aforada y A_A, P_A y V_A, son el área, la precipitación anual y el volumen de escurrimiento anual respectivamente, en la cuenca aforada y K es un factor correctivo (Véase ecuación 3.4), su determinación fue establecida en el apartado 3.2.3 del capítulo 3. De la observación de la Ec. (5.5) se concluye que el método de Heras es equivalente al de área y precipitación afectado por el factor correctivo K.

5.2.1. - Método de Heras Modificado

Por analogía del análisis y modificación propuesta en esta tesis al método de área y precipitación, se deduce que el método de Heras presenta la misma problematica que el primero método de área y precipitación al intentar utilizarlo a la escala mensual en su condición original; por lo tanto se adopto la misma solución, resultando la siguiente modificación que se expresa mediante la Ecuación (5.6):

$$V_{NA} = K\frac{A_{NA}}{A_A}\left(H(P_{NA}-P_{NA-\min})\bullet H(P_A-P_{A-\min})\right)\left(\frac{P_{NA}}{P_A}\right)V_A + \left|[H(P_{NA}-P_{NA-\min})\bullet H(P_A-P_{A-\min})]-1\right| K\left(\frac{A_{NA}}{A_A}\right)V_A \tag{5.6}$$

Así, la Ec. (5.6) a partir de los valores de precipitación en la cuenca aforada, P_A y en la cuenca no aforada, P_{NA}, pueden generarse tres escenarios cuando (1) $P_A<P_{A\text{-}min}$, (2) cuando $P_{NA}<P_{NA\text{-}min}$ y (3) cuando sucede ambos, $H(P_{NA}-P_{NA-\min})\bullet H(P_A-P_{A-\min})=0$ con lo que el primer argumento de la Ec. (5.6) se anula, mientras que $\left|[H(P_{NA}-P_{NA-\min})\bullet H(P_A-P_{A-\min})]-1\right|=1$, con lo que el segundo argumento de la Ec. (5.6) es equivalente al método de área afectado por la K de Heras. En el caso cuando $P_A>P_{A\text{-}min}$ y $P_{NA}>P_A$, $H(P_{NA}-P_{NA-\min})\bullet H(P_A-P_{A-\min})=1$ y $\left|[H(P_{NA}-P_{NA-\min})\bullet H(P_A-P_{A-\min})]-1\right|=0$, anulando el segundo argumento de la Ec (5.6), en tanto que el primer argumento es equivalente a la Ec.(5.5).

5.3. - Método de Becerril

El método de Becerril se presentó en el apartado 3.2.4 del capítulo 3. El cálculo del Escurrimiento natural en la cuenca no aforada se determina mediante la siguiente expresión matemática:

$$V_{NA} = \frac{A_{NA}}{A_A}\left(\frac{(P_{NA})\wedge(1.5)}{(P_A)\wedge(1.5)}\right)V_A \tag{5.7}$$

En donde A_{NA} y P_{NA} son el área y la precipitación anual respectivamente, en la cuenca no aforada y A_A, P_A y V_A, son el área, la precipitación anual y el volumen de escurrimiento anual en la cuenca aforada. Obsérvese que la Ec. (5.7) también es equivalente al método de área, pero con los términos de precipitación elevados a una potencia (1.5).

5.3.1. - Método de Becerril Modificado

Al igual que en los métodos de área y precitación y Heras, es posible proponer la siguiente expresión matemática:

$$V_{NA} = \frac{A_{NA}}{A_A}\left(H(P_{NA} - P_{NA-\min}) \bullet H(P_A - P_{A-\min})\right)\left(\frac{(P_{NA})\wedge(1.5)}{(P_A)\wedge(1.5)}\right)V_A + \left|[H(P_{NA} - P_{NA-\min}) \bullet H(P_A - P_{A-\min})] - 1\right|\left(\frac{A_{NA}}{A_A}\right)V_A$$

(5.8)

Así, la Ec. (5.8) a partir de los valores de precipitación en la cuenca aforada, P_A y en la cuenca no aforada, P_{NA}, pueden generarse tres escenarios cuando (1) $P_A<P_{A\text{-}min}$, (2) cuando $P_{NA}<P_{NA\text{-}min}$ y (3) cuando sucede ambos, $H(P_{NA} - P_{NA-\min}) \bullet H(P_A - P_{A-\min}) = 0$ con lo que el primer argumento de la Ec. (5.8) se anula, mientras que $\left|[H(P_{NA} - P_{NA-\min}) \bullet H(P_A - P_{A-\min})] - 1\right| = 1$, con lo que el segundo argumento de la Ec. (5.8) es equivalente al método de área (véase Ec 3.1, del capitulo 3). En el caso cuando $P_A>P_{A\text{-}min}$ y $P_{NA}>P_A$, $H(P_{NA} - P_{NA-\min}) \bullet H(P_A - P_{A-\min}) = 1$ y $\left|[H(P_{NA} - P_{NA-\min}) \bullet H(P_A - P_{A-\min})] - 1\right| = 0$, anulando el segundo argumento de la Ec (5.8), en tanto que el primer argumento es equivalente a la Ec.(5.7).

5.4.- Método de Smith

Aplicando el método de Smith en su condición original a la escala de tiempo anual y combinado con el método de fragmentos a la escala de tiempo mensual, resultan valores de escurrimientos naturales muy por abajo de los restítuidos a partir de información de hidrometría en la subcuenca de Pico de Águila.

El método desarrollado por Smith (1973) provee información confiable de la relación entre el coeficiente de escurrimiento y el BCI para valores de este último en un rango de entre 30 y 150. Sin embargo en la cuenca de estudio se determinaron valores del BCI inferiores a 30, lo que hace suponer (véase Ec. (3.26)) que las cuencas originalmente estudiadas por Smith, presentaban precipitaciones mensuales superiores o temperaturas medias mensuales inferiores (o ambas) que las que se presentan en la zona de estudio de esta tesis.

5.4.1.- Método de Smith adaptado a la zona de estudio

En virtud de lo anterior y considerando que existen subcuencas aforadas adyacentes a la de estudio se procedió a adaptar el método a las condiciones de la zona. Recurriendo a la similitud de cuencas y como previamente se había acotado, la subcuenca denominada área total (Véase Figura 4.20) es la que ofrece mayor similitud con respecto a la subcuenca de estudio.

La adaptación del método consistió en la determinación del BCI y del coeficiente de escurrimiento (ce) para la subcuenca denominada área total (aforada) para cada uno de los años del registro histórico de hidrometría y climatología. Con estos valores se construyo la Figura 5.1. Obsérvese para el periodo de tiempo de 1964 al año 2002 los valores de BCI determinados están en un rango de entre 18 y 48.

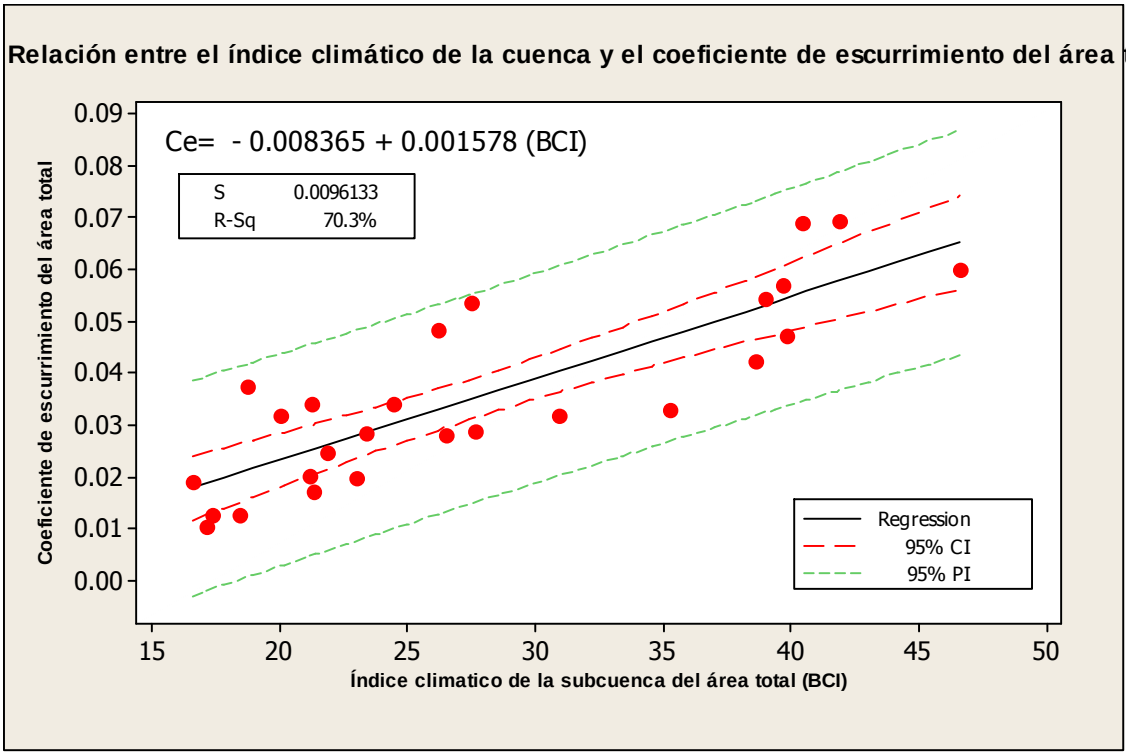


Figura 5.1.- Relación entre el índice climático de la cuenca y el coeficiente de escurrimiento en la subcuenca del área total (cuenca media-alta del río Florido)

Mediante técnicas de regresión lineal se ajustó una ecuación que permite determinar el coeficiente de escurrimiento a partir del valor que tome el BCI. En la Figura 5.1 se muestra la relación ce versus BCI determinada originalmente por Smith y la relación que se encontró en este trabajo para la subcuenca de estudio. A partir de esta última relación, la determinación de escurrimiento superficial anual y mensual se realiza con el procedimiento descrito en los apartados 3.2.9 y 3.4 respectivamente.

5.5.- Método del coeficiente de escurrimiento

El método del coeficiente de escurrimiento aplicado en su condición original a la escala de tiempo anual y combinado con el método de fragmentos a la escala de tiempo mensual, proporciona valores de escurrimientos naturales muy por arriba de los restítuidos a partir de información de hidrometría en la subcuenca de Pico de Águila.

El problema que se observa en este método es la correcta determinación del coeficiente de escurrimiento, C, que a su vez depende del parámetro, k, que es función del tipo y uso de suelo.

5.5.1.- Método del coeficiente de escurrimiento adaptado a la subcuenca de estudio

Considerando que la cuenca de estudio no está completamente aforada, pero que la zona de estudio sí lo está, se procedió a determinar los valores anuales del coeficiente de escurrimiento, C, para la subcuenca denominada área total (C, variable) a partir de los registros históricos de los volúmenes de escurrimiento y de precipitación, así como con la extensión de la subcuenca. Posteriormente, con estos valores de C, se determinan los valores anuales de “k” variable para la subcuenca del área total.

Considerando que la subcuenca denominada área total es la que ofrece mayor similitud con respecto a la subcuenca de estudio (subcuenca de la presa Pico de Águila), es posible determinar los valores del coeficiente de escurrimiento C en esta última a partir de los valores de k obtenidos para la subcuenca del área total y la precipitación registrada en la subcuenca no aforada.

A partir de este punto, una vez calibrados los valores del parámetro k y del coeficiente de escurrimiento c en la cuenca sin datos, la determinación de escurrimiento superficial anual y mensual se realiza con el procedimiento descrito en los apartados 3.2.10 y 3.4 respectivamente.

5.6.- Métodos de Temez, Turc, Coutagne y Langbein

Estos métodos se basan en la relación que existe entre el escurrimiento, la evapotranspiración potencial y la precipitación anual o entre el escurrimiento, la precipitación y la evapotranspiración real anual. El estudio de estas relaciones a nivel mensual requiere de un análisis detallado que queda fuera del alcance de esta tesis, por lo que se pueden considerar como áreas de oportunidad para la investigación.

5.7.- Resultados de métodos modificados y adaptados a la zona y subcuenca de estudio para la estimación de escurrimientos naturales a las escalas de tiempo anual y mensual

5.7.1.- Métodos nuevos desarrollados a escala mensual para determinar escurrimientos naturales en cuencas no aforadas

En la Figura 5.2 se muestran los escurrimientos naturales anuales obtenidos por los métodos modificados de área y precipitación, Heras y Becerril, presentando todos ellos gran similitud con respecto a los escurrimientos naturales PPA (Restituidos).

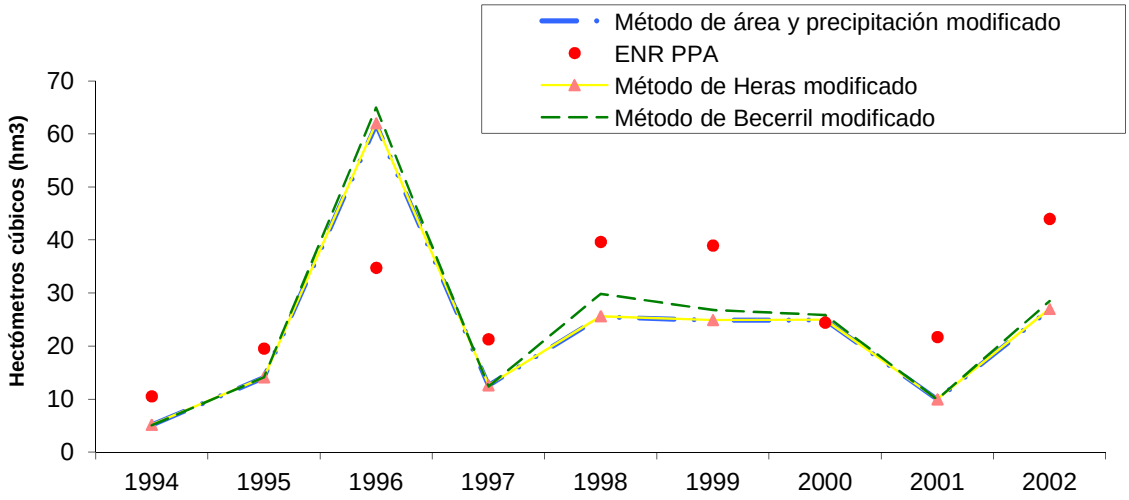


Figura 5.2.- Escurrimientos anuales en la cuenca de Pico de Águila estimados por los diferentes métodos desarrollados para escala de tiempo mensual para el periodo de 1994 al 2002.

Por otro lado se compararon los resultados de los escurrimientos naturales mensuales del método de área y precipitación combinado con el método de los fragmentos y el método de área y precipitación modificado con los valores de los escurrimientos naturales restituidos (PPA), teniendo resultados muy satisfactorios en ambos casos. De la observación de la Figura 5.3 se aprecia que el de mayor grado de ajuste fue el método de área y precipitación modificado. También se observa que la distribución mensual es similar entre los métodos de área y precipitación, Heras y Becerril modificados (Véase Figura 5.3).

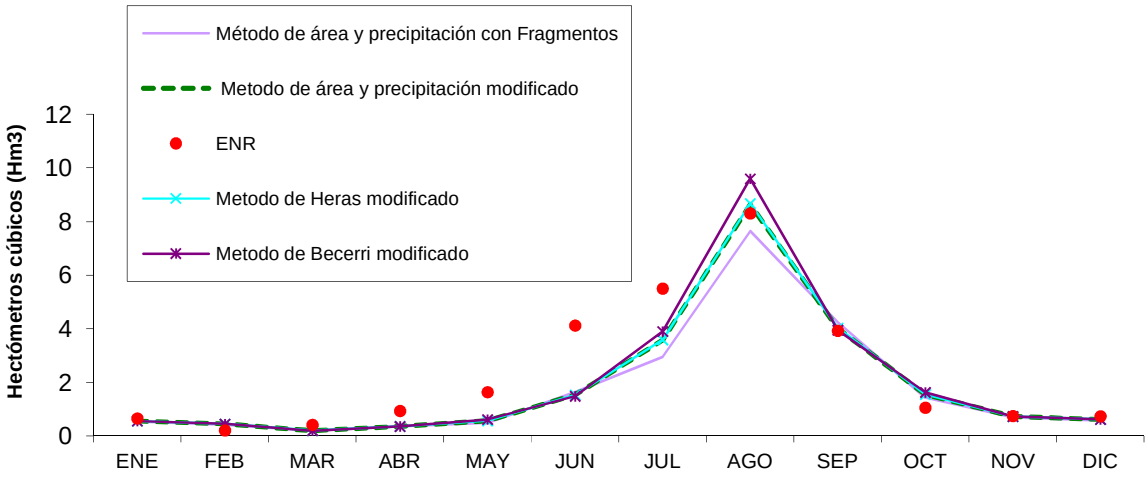


Figura 5.3.- Promedio del volumen escurrido mensual en el periodo de 1994 al 2002

En la Figura 5.4 se presenta la distribución de los escurrimientos mensuales calculados con los métodos modificados de área y precipitación, Heras y Becerril para los años de 1964 al 2002.

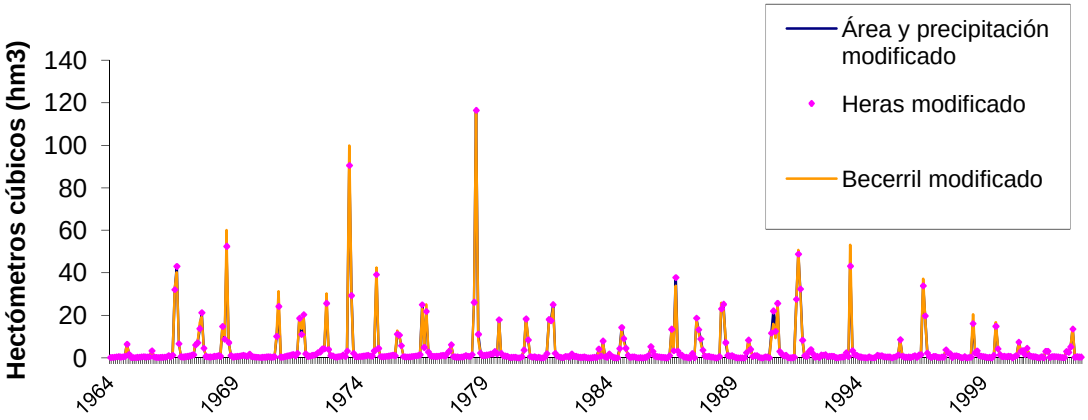


Figura 5.4.- Escurrimientos naturales mensuales determinados por el método de área y precipitación modificado para el periodo de 1964 al 2002

La Figura 5.5 muestra la distribución de los escurrimientos mensuales calculados con los métodos nuevos de área y precipitación, Heras y Becerril y los escurrimientos mensuales restituidos en PPA para los años de 1994 al 2002.

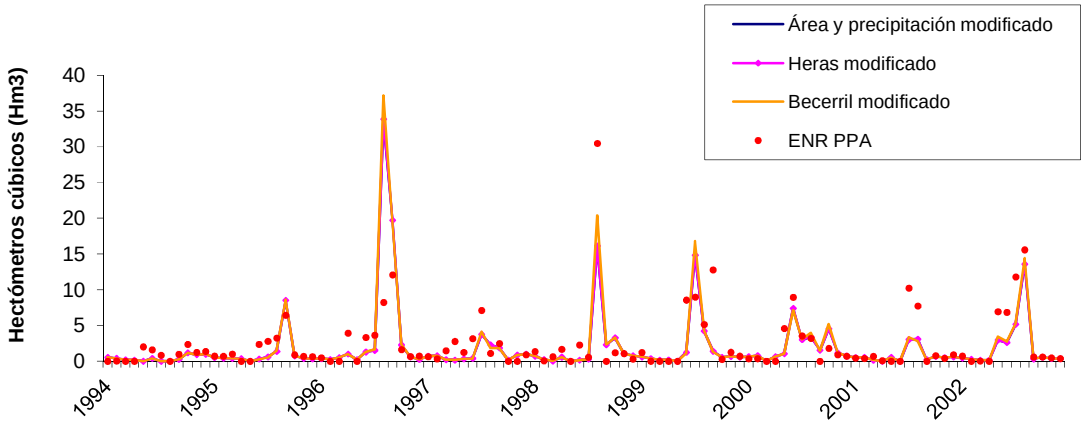


Figura 5.5.- Escurrimientos naturales mensuales determinados por el método de área y precipitación modificado para el periodo de 1994 al 2002

5.7.2.- Métodos de Smith y del coeficiente de escurrimiento (K) adaptados a la zona y subcuenca de estudio

El método de Smith en su condición original proporcionó valores subestimados del escurrimiento natural, ver apartado 4.5.2 del Capítulo 4. La adaptación a la zona de estudio proporciona escurrimientos naturales con mejor ajuste para las escalas de tiempo anual y mensual. Por otro lado, los escurrimientos naturales estimados por el método del coeficiente de escurrimiento (*K*), reportaron valores de escurrimientos naturales altos con respecto a los restituidos en Pico de Águila. Al adaptar el método a la zona de estudio (cuenca media-alta del río Florido), los escurrimientos calculados ofrecen mayor grado de ajuste con respecto a los observados (Veáse Figura 5.6).

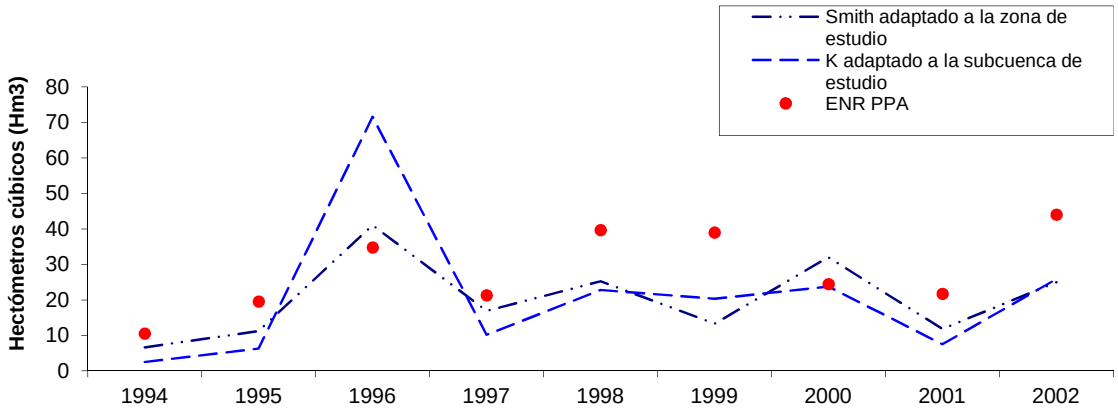


Figura 5.6.- Escurrimientos anuales en la cuenca de Pico de Águila estimados por los métodos de Smith y el método del coeficiente de escurrimiento (k) adaptados a la zona de estudio para el periodo de 1994 al 2002

En la Figura 5.7 se observa que la distribución mensual de los escurrimientos naturales es similar entre los métodos de Smith adaptado a la zona de estudio y K adaptado a la subcuenca de estudio. El método de *K* adaptado a la subcuenca de estudio, aparentemente ofrece mayor grado de ajuste en sus resultados con respecto a los observados en Pico de Águila.

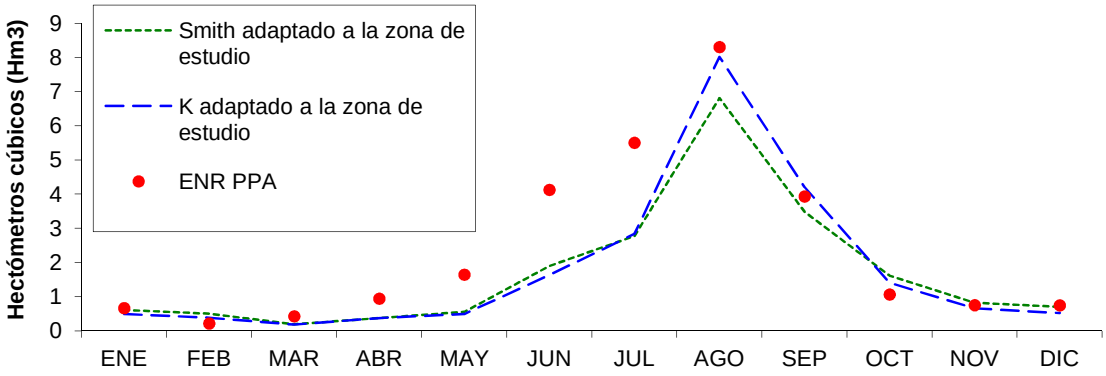


Figura 5.7.- Promedio del volumen escurrido mensual en el periodo de tiempo de 1994 al 2002.

En la Figura 5.8 se presenta la distribución de los escurrimientos mensuales calculados por los métodos de Smith y de K adaptados a la zona de estudio para los años de 1964 al 2002.

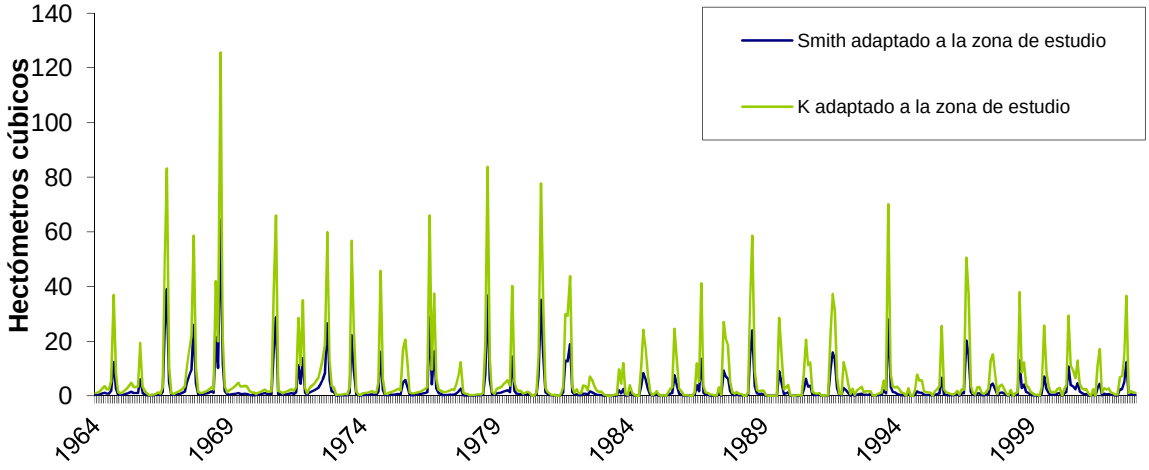


Figura 5.8.- Escurrimientos naturales mensuales determinados por los métodos de Smith adaptado a la zona de estudio y k adaptado a la subcuenca de estudio para el periodo de 1964 al 2002

La Figura 5.9 muestra la distribución de los escurrimientos mensuales calculados con los métodos nuevos de área y precipitación, Heras y Becerril y los escurrimientos mensuales restituidos en PPA para los años de 1994 al 2002.

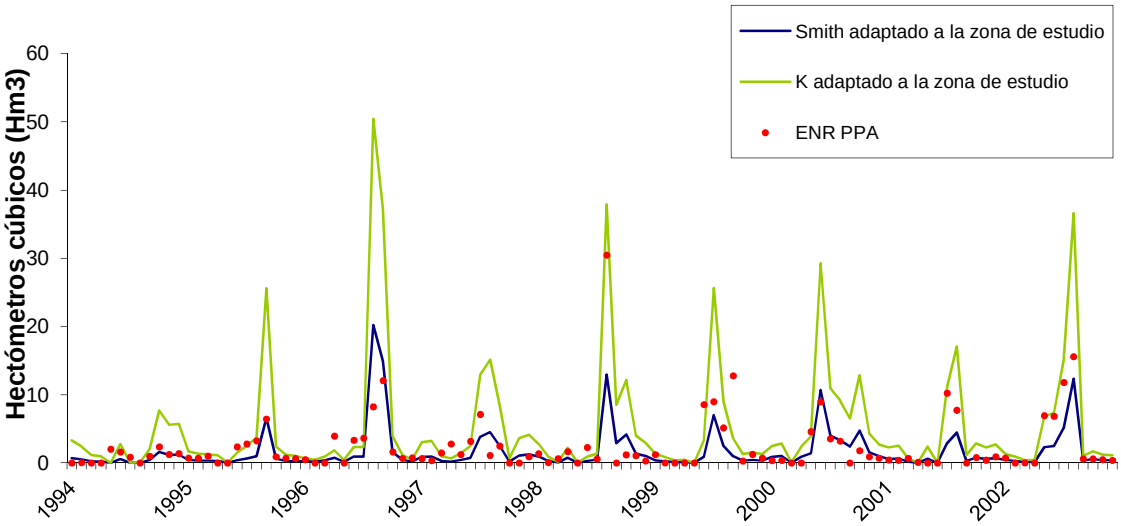


Figura 5.9.- Escurrimientos naturales mensuales determinados por los métodos de Smith adaptado a la zona de estudio y k adaptado a la subcuenca de estudio para el periodo de 1994 al 2002

CAPÍTULO 6.- Análisis de resultados generados por los diferentes métodos, para determinar escurrimientos naturales en sitios interiores de una cuenca aforada

Para facilitar el análisis de resultados, los métodos se organizaron en tres grupos: (1) métodos para determinar los escurrimientos a la escala de tiempo anual (Métodos anuales), (2) métodos anuales combinados con el de los fragmentos para determinar escurrimientos a la escala de tiempo mensual y (3) métodos para determinar los escurrimientos a la escala de tiempo mensual (autocontenidos) (Ver Figura 6.1).

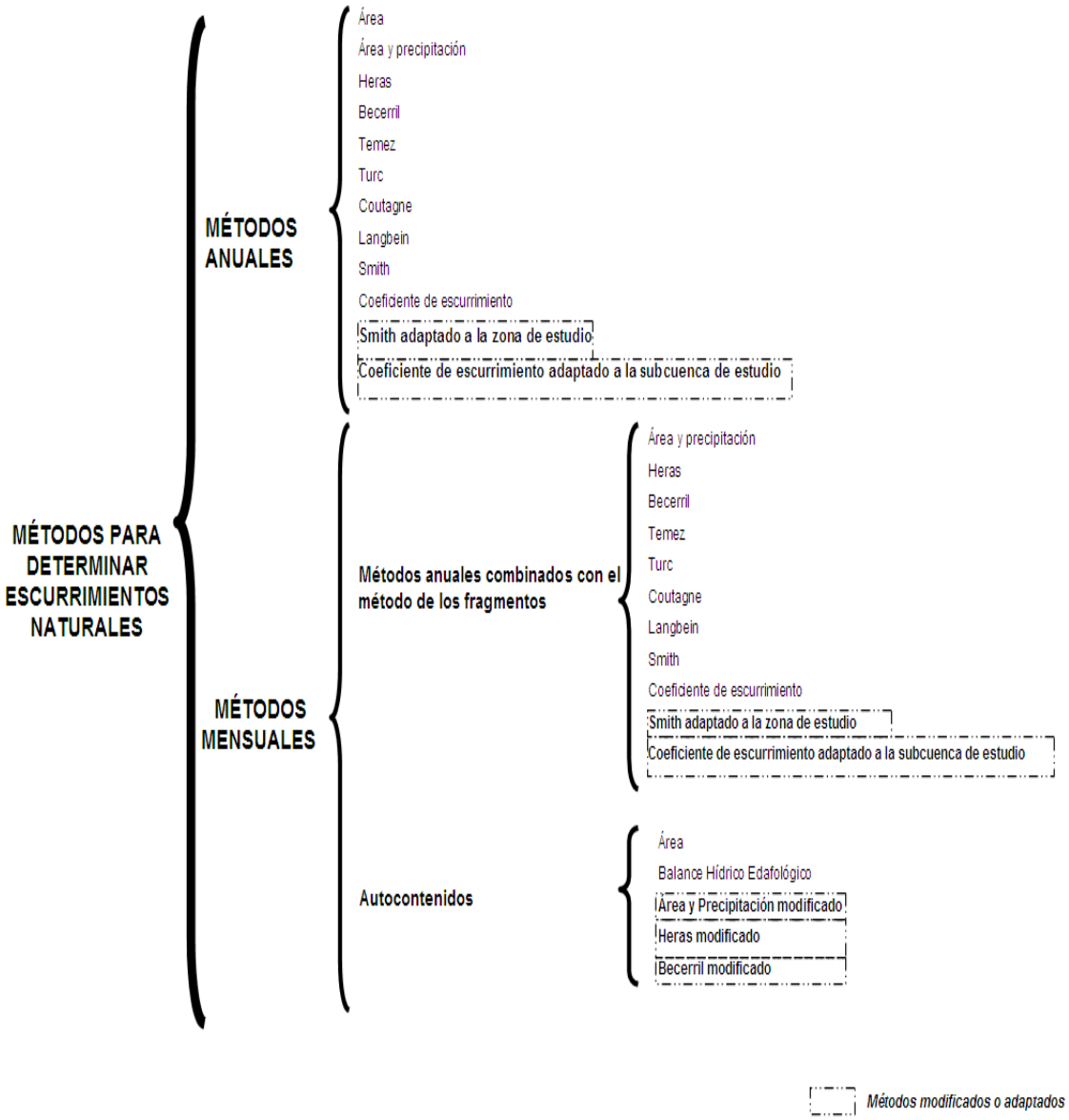


Figura 6.1.- Métodos para determinar escurrimientos naturales

6.1.-Medidas de evaluación del desempeño de los métodos

Para lograr un análisis objetivo e imparcial de resultados obtenidos por los diferentes métodos, se recurrió a parámetros y e indicadores estadísticos, como son las medidas descriptivas de centralización (media o promedio aritmético) y las de dispersión (varianza, desviación estándar y coeficiente de variación de Pearson). Además se emplearon medidas de evaluación del desempeño de los métodos al calcular el escurrimiento restituido: el error medio (EM), error medio absoluto (EMA), la raíz del error medio cuadrado (REMC). Asimismo se determinaron otros estadísticos que valoran el grado de ajuste de los resultados de los métodos con respecto a los datos observados en la subcuenca de la Presa Pico de Águila, utilizando estadísticos comúnmente empleados como el coeficiente de eficiencia (E), el índice de concordancia (d), el coeficiente de eficiencia modificado (E_1), y el índice de concordancia modificado (d_1). Considerando que se cuenta con los escurrimientos restituidos en la subcuenca de estudio – Presa Pico de Águila- para el periodo de 1994 al año 2002, es posible comparar con ayuda de las medidas de centralización, dispersión y desempeño, los diferentes métodos empleados.

6.2.-Métodos anuales

Para facilitar el análisis de resultados, la evaluación de los métodos se organizó conforme a los tres grupos que al inicio de este capitulo se identificaron.

Los métodos evaluados en este apartado fueron: área, área y precipitación, Heras, Becerril, Temez, Turc, Coutagne, Langbein, Smith, el coeficiente de escurrimiento (k); Smith adaptado a la zona de estudio y el coeficiente de escurrimiento adaptado a la subcuenca de estudio, todos ellos empleados a la escala de tiempo anual.

En la Tabla 6.1 se presentan los valores de los diferentes parámetros e indicadores de desempeño obtenidos para los métodos del área, área y precipitación, Heras y Becerril evaluados para la escala de tiempo anual para el periodo de tiempo del año 1994 al 2002. Así mismo se presenta las medidas de centralización y de dispersión en la subcuenca de la Presa Pico de Águila para ese mismo periodo.

El método del área presentó ligeramente mejor grado de ajuste en los resultados, con respecto a los datos observados en la subcuenca de Pico de Águila, según las medidas descriptivas de centralización, dispersión, evaluación del desempeño e indicadores estadísticos. Sin embargo, se observa que no existen diferencias significativas con respecto a los resultados alcanzados por los métodos de área y precipitación, Heras y Becerril (veáse Tabla 6.1). Esto muy probablemente se debe a la similitud de cuenca de la cuenca denominada área total (la que se uso para transferir escurrimientos) con la cuenca de estudio.

Adicionalmente, se observa consistencia en las proyecciones o extrapolaciones de estos métodos, al completar el registro de 1964 al año 1994, en el periodo de tiempo de 1964 al 2002; el volumen de escurrimiento medio, desviacion estandar y varianza de los métodos de transporte y similitud de cuencas son estables entre los diferentes métodos.

Tabla 6.1.-Análisis de resultados de los métodos de área, área y precipitación, Heras y Becerril con respecto a los de Pico de Águila

Indicadores estadísticos		A_{AT}	$A\ Y\ P_{AT}$	$Heras_{AT}$	$Becerril_{AT}$	Enr PPA
EM		7.44	7.09	7.00	6.81	
EMA		12.24	13.67	13.64	14.38	
REMC		14.25	15.90	15.91	16.93	
E		-0.77	-1.20	-1.21	-1.49	
d		0.68	0.65	0.65	0.64	
E1		-0.25	-0.39	-0.39	-0.47	
D1		0.48	0.45	0.45	0.44	
1994-2002 (ANUAL)	*V. Esc. Medio*	20.89	21.24	21.33	21.51	28.32
	DS	14.75	17.69	17.77	19.28	11.36
	VAR	217.49	312.95	315.63	371.78	129.09
	CV	0.71	0.83	0.83	0.89	0.40
1964-2002 (ANUAL)	*V. Esc. Medio*	44.27	42.65	42.83	42.36	
	DS	37.35	36.21	36.36	36.59	
	VAR	1395.24	1311.38	1322.63	1339.52	
	CV	0.84	0.84	0.84	0.86	

La Tabla 6.2 presenta los resultados de los métodos de Turc, Coutagne, Langbein, Smith, el coeficiente de escurrimiento (k), Smith adaptado a la zona de estudio y el coeficiente de escurrimiento adaptado a la subcuenca de estudio.

Para la cuenca de estudio, el método que obtuvo el mejor grado de ajuste, según las medidas estadísticas, con respecto a los valores observados de 1994 al año 2002, fue el método de Langbein. Los métodos de Turc y Témez también proporcionaron buenos resultados de volumen escurrido anual, aunque ligeramente inferiores a los encontrados por el de Langbein (veáse Tabla 6.2). Estos tres métodos presentan diferencias significativas en comparación con los métodos de Coutagne, Smith y el del coeficiente de escurrimiento en su estado original, por lo que no resultaron muy recomendables para la zona de estudio.

También en la Tabla 6.2, se presentan las medidas estadísticas para determinar el grado de ajuste obtenido por los métodos adaptados a la zona de estudio (Smith) y subcuenca de estudio (coeficiente de escurrimiento). Inicialmente, los escurrimientos naturales determinados por el método de Smith original, estuvieron muy por debajo de los escurrimientos restituidos en la subcuenca de la Presa Pico de Águila; pero al adaptar el método a la zona de estudio, el volumen medio anual para el periodo de tiempo de 1994 al 2002 mejora en gran medida y logra un buen grado de ajuste. La desviación estándar y la varianza lograron el mejor ajuste, mientras que el coeficiente de variación de

Pearson alcanzó un buen ajuste con respecto a la subcuenca de Pico de Águila (Véase Tabla 6.2).

Con el método del coeficiente de escurrimiento que provee la NOM-011-CNA-2000 (SEMARNAT, 2000), se obtuvieron escurrimientos superiores a los restituidos (Ver Tabla 6.2); la obtención a priori del parámetro k del método afecta sensiblemente al coeficiente de escurrimiento y consecuentemente los escurrimientos que se encuentren. Para evitar la incertidumbre en la obtención del parámetro k, se adapto el método a la subcuenca de estudio, determinando el párametro k para cada año a partir de los registros de hidrometría y precipitación de la subcuenca denominada área total y transfiriendo los resultados a la subcuenca de estudio, mejorando en gran medida los resultados del método original (Ver Tabla 6.2). Las proyecciones en el periodo de tiempo de 1964 al 2002; volumen de escurrimiento medio, desviación estandar y varianza de los métodos de Langbein, Smith adaptado a la zona de estudio y el coeficiente de escurrimiento adaptado a la subcuenca de estudio son consistentes entre sí, mientras que los métodos de Temez, Turc, Coutagne, Smith y el coeficiente de escurrimiento originales presentan variaciones significativas.

Un valor de coeficiente de variación de Pearson, mayor que uno, se considera de ***"alta varianza"*,** lo que significa que tiene mayor dispersión en los resultados y menor representatividad de la media, este caso se tiene para los métodos de Temez, Turc y Smith.

Tabla 6.2.-Análisis de resultados de los métodos de Temez, Turc, Coutagne, Langbein, Smith y Coeficiente de escurrimiento con respecto a los de Pico de Águila

Indicadores estadísticos		Temez	Turc	Coutagne	Langbein	Smith	Coef. de Esc.	Smith Ado.	K Ado.	Enr PPA
EM		2.46	-4.60	-37.57	1.06	22.54	-34.22	8.01	7.15	
EMA		26.18	19.75	57.73	9.30	22.54	34.22	11.07	15.33	
REMC		31.67	27.20	69.07	11.51	25.72	38.71	13.04	17.91	
E		-7.74	-5.45	-40.57	-0.15	-4.77	-12.06	-0.48	-1.80	
D		0.42	0.51	0.27	0.70	0.45	0.36	0.68	0.63	
E1		-1.67	-1.01	-4.89	0.05	-1.29	-2.49	-0.13	-0.56	
D1		0.30	0.44	0.20	0.53	0.32	0.22	0.48	0.42	
1994-2002 (ANUALES)	***V. Esc. Medio***	25.86	32.93	65.90	27.27	5.79	62.55	20.32	21.17	28.33
	DS	36.01	32.14	66.11	12.55	10.39	23.20	11.27	20.78	11.36
	VAR	1296.72	1032.90	4369.89	157.54	107.99	538.09	126.97	431.60	129.09
	CV	1.39	0.98	1.00	0.46	1.79	0.37	0.55	0.98	0.40
1964-2002 (ANUALES)	***V. Esc. Medio***	74.03	71.94	114.43	42.96	24.32	82.55	31.72	42.28	
	DS	99.06	77.72	96.63	35.09	41.63	42.01	23.11	37.84	
	VAR	9812.25	6040.43	9337.69	1230.98	1732.88	1765.10	534.36	1431.5	
	CV	1.34	1.08	0.84	0.82	1.67	0.509	0.729	0.89	

En general, el método de Langbein es el que presenta mejor desempeño para la zona de estudio, sin embargo los métodos de área, área y precipitación, Heras, Becerril, Smith adaptado y coeficiente de escurrimiento ofrecen

resultados comparables y con un grado de ajuste aceptable con respecto a lo observado.

6.3.- Métodos anuales combinados con el método de fragmentos para su aplicación a la escala de tiempo mensual

Los métodos analizados en esta sección fueron: área y precipitación, Heras, Becerril, Temez, Turc, Coutagne, Langbein, Smith, coeficiente de escurrimiento (k), Smith adaptado a la zona de estudio y el coeficiente de escurrimiento adaptado a la subcuenca de estudio, en combinación con el método de los fragmentos.

En la Tabla 6.3 se establece un comparativo mensual del grado de ajuste de los resultados que ofrecen los métodos con respecto a los valores restituidos para el periodo de tiempo de 1994 al año 2002.

Los resultados del volumen escurrido medio, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación de Pearson y las medidas estádisticas por los métodos de área y precipitación, Heras y Becerril no presentan diferencias significativas entre ellos (Ver Tabla 6.3). El desempeño de estos métodos es prácticamente igual que cuando se revisaron como métodos anuales.

Tabla 6.3.-Análisis de resultados de los métodos de área y precipitación, Heras y Becerril con respecto a los de Pico de Águila

Indicadores estadísticos		A y P	HERAS	BECERRIL	Enr PPA
EM		0.59	0.58	0.57	
EMA		1.64	1.64	1.69	
REMC		3.80	3.81	3.96	
E		0.17	0.17	0.10	
D		0.75	0.75	0.74	
E1		0.37	0.37	0.35	
d1		0.67	0.67	0.67	
1994-2002 (MENSUAL)	***V. Esc. Medio***	1.77	1.78	1.79	2.36
	DS	4.20	4.22	4.43	4.20
	VAR	17.65	17.79	19.63	17.66
1994-2002 (ANUAL)	***V. Esc. Medio***	21.24	21.33	21.52	28.33
	DS	17.69	17.77	19.28	11.36
	VAR	312.95	315.63	371.78	129.09
	CV	0.83	0.83	0.89	0.40
1964-2002 (ANUAL)	***V. Esc. Medio***	42.65	42.83	42.36	
	DS	36.21	36.36	36.59	
	VAR	1311.38	1322.63	1339.52	
	CV	0.84	0.84	0.86	

En la Tabla 6.4 se observa que el método de Langbein tiene el mayor grado de ajuste para las medidas descriptivas de centralización y de dispersión además de las medidas de evaluación del desempeño a escala mensual. En segundo término, los métodos de Smith adaptado a la zona de estudio, el coeficiente de escurrimiento adaptado a la subcuenca de estudio, Turc , Temez , Smith , el coeficiente de escurrimiento K y Coutagne .

Por otro lado se vuelve a observar que los métodos de Coutagne y el del coeficiente de escurrimiento (k) sobrestiman los escurrimientos naturales teniendo volumenes escurridos medios (1994 al 2002) de 5.49 hm^3 y 5.21 hm^3 respectivamente, contra 2.36 hm^3 (observados), mientras que el método de Smith subestima los escurrimientos naturales con un volumen escurrido medio (1994 al 2002) de 0.48 hm^3 contra 2.36 hm^3 (observados). Los métodos de Temez y Turc proporcionaron un buen ajuste de volumen escurrido medio (mensual) con respecto a los observados en el periodo de 1994 al año 2002 (Ver Tabla 6.4), sin embargo, estos presentan una desviación estandar y varianza muy altas, especialmente considerando el periodo extendido de 1964 al año 2002. Los métodos de Smith adaptado a la zona de estudio y el coeficiente de escurrimiento adaptado a la subcuenca de estudio presentan similitud en las medidas estadísticas utilizadas con respecto a los métodos de transporte y similitud de cuencas (Ver Tablas 6.3 y 6.4). El comportamiento de los métodos es prácticamente el mismo que cuando se revisaron como métodos anuales.

Tabla 6.4.-Análisis de resultados de los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica con respecto a los de Pico de Águila

Indicadores estadísticos		TEMEZ	TURC	COUTAGNE	LANGBEIN	SMITH	K	SMITH Ado.	K Ado.	Enr PPA
EM		0.21	-0.38	-3.13	0.09	1.88	-2.85	0.67	0.60	
EMA		2.50	2.29	4.89	1.58	2.06	3.39	1.48	1.74	
REMC		5.80	5.22	11.15	3.11	4.32	6.90	3.00	4.07	
E		-0.92	-0.56	-6.10	0.45	-0.07	-1.72	0.49	0.05	
D		0.64	0.72	0.55	0.84	0.50	0.70	0.82	0.73	
E1		0.04	0.12	-0.87	0.40	0.21	-0.30	0.43	0.33	
d1		0.57	0.60	0.42	0.70	0.58	0.51	0.69	0.66	
1994-2002 (MENSUAL)	***V. Esc. Medio***	2.16	2.74	5.49	2.27	0.48	5.21	1.69	1.76	2.36
	DS	6.63	6.61	12.99	4.04	1.88	8.82	3.18	4.58	4.20
	VAR	44.01	43.68	168.62	16.35	3.55	77.86	10.12	21.02	17.66
1994-2002 (ANUAL)	***V. Esc. Medio***	25.86	32.93	65.90	27.27	5.79	62.55	20.32	21.17	28.33
	DS	36.01	32.14	66.11	12.55	10.39	23.20	11.27	20.78	11.36
	VAR	1296.72	1032.9	4369.89	157.54	107.99	538.09	126.97	431.60	129.09
	CV	1.39	0.98	1.00	0.46	1.80	0.37	0.55	0.98	0.401
1964-2002 (ANUAL)	***V. Esc. Medio***	74.03	71.94	114.43	42.96	24.32	82.55	31.72	42.28	
	DS	99.06	77.72	96.63	35.09	41.63	42.01	23.11	37.84	
	VAR	9812.25	6040.43	9337.69	1230.98	1732.88	1765.10	534.36	1431.5	
	CV	1.34	1.08	0.84	0.82	1.67	0.509	0.729	0.89	

6.4.-Métodos mensuales autocontenidos

Los métodos analizados en esta sección fueron: área, balance hídrico edafológico, área y precipitación modificado, Heras modificado y Becerril modificado.

En la Tabla 6.5, se muestran las medidas descriptivas de centralización, dispersión, medidas de evaluación del desempeño e indicadores estadísticos de los resultados de los métodos autocontenidos con respecto a los escurrimientos restituidos. Se observa que los métodos de área, área y precipitación, Heras y Becerril, estos últimos tres modificados, no presentan diferencias significativas entre sí, así como con respecto a los métodos de área y precipitación, Heras y Becerril combinados con los métodos de los fragmentos (Ver Tabla 6.3).

Por otro lado el método del balance hídrico edafológico, subestima el volumen escurrido medio con un valor de 16.38 Hm^3 contra 28.32 Hm^3 (observados) para el periodo de tiempo de 1994 al 2002 (Tabla 6.5).

Al modificar los métodos de área y precipitación, Heras y Becerril, las medidas descriptivas de centralización y dispersión anual mejoran los resultados, el método de área y precipitación combinado con los fragmentos tiene un volumen escurrido medio de 21.24 Hm^3. El método de área y precipitación modificado de 22.84 Hm^3; el método de Heras combinado con los fragmentos tiene un volumen escurrido medio de 21.33 Hm^3. El método de Heras modificado de 22.94 Hm^3; el método de Becerril combinado con los fragmentos tiene un volumen escurrido medio de 21.52 Hm^3, mientras que el método de Becerril modificado 24.16 Hm^3 (Véase Tablas 6.3 y 6.5).

En la Tabla 6.5 se observa la consistencia de las proyecciones de los métodos del área, área y precipitación, Heras y Becerril (estos últimos tres modificados) al completar el registro de 1964 al 1994 en el periodo de tiempo de 1964 al 2002; el volumen de escurrimiento medio, desviación estandar y varianza de estos métodos son estables entre si. El método del balance hídrico edafológico presenta variaciones en las medidas descripitivas de centralización y dispersión para el periodo de tiempo de 1964 al 2002 (anual) con respecto a los métodos anteriores.

Tabla 6.5.-Análisis de resultados de métodos autocontenidos con respecto a los de Pico de Águila

Indicadores estadísticos		Área	Área y precipitación $_M$	Heras $_M$	Becerril $_M$	BHE	Enr PPA
EM		0.62	0.45	0.45	0.35	-1.37	
EMA		1.59	1.59	1.59	1.59	1.37	
REMC		3.55	3.62	3.62	3.73	4.73	
E		0.28	0.25	0.25	0.20	-0.28	
d		0.76	0.79	0.79	0.80	0.56	
E1		0.39	0.39	0.39	0.39	0.48	
d1		0.68	0.69	0.69	0.69	0.75	
1994-2002 (MENSUAL)	***V. Esc. Medio***	1.74	1.91	1.91	2.01	1.24	2.36
	DS	3.81	4.47	4.47	4.89	3.50	4.20
	VAR	14.50	19.98	19.98	23.96	12.26	17.66
1994-2002 (ANUAL)	***V. Esc. Medio***	20.89	22.84	22.94	24.16	16.38	28.33
	DS	14.75	16.63	16.71	17.81	21.73	11.36
	VAR	217.49	276.68	279.05	317.15	472.14	129.09
	CV	0.71	0.73	0.73	0.74	1.33	0.40
1964-2002 (ANUAL)	***V. Esc. Medio***	44.27	44.44	44.69	45.39	62.88	
	DS	37.35	36.23	36.33	36.72	79.56	
	VAR	1395.24	1312.39	1320.12	1348.35	6329.75	
	CV	0.84	0.82	0.81	0.81	1.27	

7.- CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y ÁREAS DE OPORTUNIDAD PARA LA INVESTIGACIÓN

Sin duda, uno de los insumos mas importantes para la planificación del aprovechamiento del recurso hídrico, son las series de tiempo de escurrimientos naturales en una cuenca o en un sitio de interés dentro de ella. Cuando el sitio de interés coincide con el sitio de medición, el problema de estimación recae en la restitución de escurrimientos naturales, empleando para ello, la ecuación de conservación de masa. Sin embargo, resulta muy frecuente que el sitio de interés no es el mismo que en donde se ubica la estación de aforo, por lo que es necesario recurrir a métodos de estimación alternos, los cuales se pueden agrupar como:

1) Métodos basados en la transferencia de escurrimientos restituidos de sitios aforados que guardan similitud hidrológica, al sitio de interés.
2) Métodos basados en la determinación de escurrimientos naturales a partir de parámetros físicos de la cuenca y parámetros climatológicos.

Los diferentes métodos existentes en cada grupo, fueron probados a la escala de tiempo para la cual fueron desarrollados originalmente, encontrándose en varios casos, condiciones de aplicación diferentes a las que se reportan en la literatura, mientras que en otros casos se confirmaron. También se intentó con los métodos que fueron desarrollados a la escala de tiempo anual (métodos anuales), emplearlos a la escala de tiempo mensual, pero solo fue posible emplear el de área en su condición original. Como alternativa, los métodos anuales se combinaron con el método de los fragmentos para poder usarlos a la escala mensual, encontrándose resultados de interés prácticos, condiciones de aplicabilidad aceptables, así como recomendaciones para la determinación de los fragmentos mensuales.

Tres de los métodos del primer grupo – área y precipitación, Heras y Becerril- fue posible modificarlos para poder emplearlos a la escala de tiempo mensual, sin necesidad de combinarlos con el método de los fragmentos, mientras que algunos de los métodos del grupo (2) que inicialmente ofrecieron resultados no del todo satisfactorios e incluso pobres, fueron adaptados a la zona de estudio – método de Smith- o a la propia subcuenca de estudio – método del coeficiente de escurrimiento-, con lo que mejoraron sustancialmente sus resultados.

7.1.- Conclusiones

7.1.1.-Métodos anuales (estado original):

La similitud de cuencas es fundamental para el transporte de información hidrométrica, ya que de no existir similitud física y climática entre la cuenca aforada y la que no lo está, la transferencia de escurrimientos de la primera a la segunda podría conducir a errores significativos.

De no existir una cuenca aforada vecina a la de estudio, que presente alta similitud hidrológica, los métodos de transporte y similitud de cuencas pueden ofrecer resultados poco confiables, por lo que en estos casos se recomienda emplear sólo los métodos basados en parámetros físicos de la cuenca e información climatológica que sean aplicables.

Una vez que se identificó la subcuenca vecina (área total) con mayor similitud a la de estudio (Presa Pico de Águila), no se encontraron diferencias significativas con respecto a los resultados alcanzados con los métodos de área, área y precipitación, Heras y Becerril. Lo cual se verificó empleando las medidas descriptivas de centralización, dispersión, evaluación del desempeño e indicadores estadísticos.

Se observó consistencia en las proyecciones de los métodos de área, área y precipitación, Heras Becerril, Langbein, Smith adaptado y el coeficiente de escurrimiento adaptado, al completar el registro de 1964 al año 1994, en el periodo de tiempo de 1964 al 2002. El volumen de escurrimiento medio, desviación estandar y varianza son estables.

Los métodos de Temez y Turc presentan un volumen de escurrimiento medio anual comparable con los escurrimientos naturales restituidos, sin embargo, se observa inestabilidad en las proyecciónes para el periodo de tiempo de 1964 al 2002.

El método de Langbein es el que presentó mejor desempeño para la subcuenca de estudio, según las medidas descriptivas de centralización, dispersión, evaluación del desempeño e indicadores estadísticos.

El método de Smith en su condición original subestimó los escurrimientos naturales en la subcuenca de estudio, el problema con el método de Smith probablemente se debe a que el método fue desarrollado para climas con precipitaciones superiores a 500 mm y en la zona de estudio el promedio de lluvia es ligeramente inferior.

El método del coeficiente de escurrimiento que provee la NOM-011-CNA-2000, sobrestimó los escurrimientos naturales. El problema que presenta el método del coeficiente de escurrimiento es la determinación del valor del

parámetro "k" a partir de valores típicos (Véase capítulo 3 apartado 3.2.10), lo que incorpora incertidumbre al calcular el coeficiente de escurrimiento.

Los métodos de Smith, Coutagne y coeficiente de escurrimiento en su estado original presentan variaciones significativas al extrapolar los escurrimientos naturales según las medidas de centralización y dispersión para el periodo de tiempo de 1964 al 2002.

De acuerdo a la literatura científica se confirman dos cosas: (1) el método de Langbein es bastante confiable en zonas áridas y semiáridas, mientras que (2) el método de Coutagne generalmente reporta valores de escurrimientos naturales demasiado altos en esas regiones.

7.1.2.-Métodos mensuales:

Previo análisis de los métodos desarrollados para su aplicación a la escala de tiempo anual, se determinó que de diez métodos, sólo el método del área puede ser empleado a la escala de tiempo mensual en su condición original.

El método del área aunque es simple, también es un método robusto, ya que proporciona resultados satisfactorios de escurrimientos naturales a las escalas de tiempo anual y mensual.

Los resultados obtenidos con el método del Balance Hídrico Edafológico fueron poco consistentes, comparados con los escurrimientos naturales restituidos, tanto en cuantía como en distribución mensual.

El método del U.S. Soil conservation service no fue aplicable a la subcuenca de estudio, ya que no fue posible disponer de datos de precipitación diaria completos y confiables.

7.1.3.-Métodos anuales combinados con el método de los fragmentos

Fue posible utilizar el método de los fragmentos en la subcuenca de Pico de Águila, ya que existe la cuenca aforada media-alta del río Florido con alto grado de similitud con respecto a la subcuenca de estudio.

Se propuso, una ecuación para determinar el valor de los fragmentos mensuales internaules para la zona de estudio, a partir de los escurrimientos restituidos en una cuenca que presenta alta similitud con la primera.

Los métodos anuales combinados con el método de los fragmentos pueden emplearse de manera satisfactoria a la escala mensual, siempre y cuando los fragmentos mensuales sean determinados empleando una cuenca hidrológica con características geomorfológicas, climatológicas, geológicas e hidrológicas similares a la cuenca de estudio.

Se determinó que los métodos anuales en combinación con el método de los fragmentos, ofrecen resultados mensuales que en general preserván el grado de ajuste que es alcanzado cuando se emplearon a nivel anual.

El desempeño de los métodos de área y precipitación, Heras y Becerril combinados con el método de los fragmentos, es prácticamente igual que cuando se revisaron como métodos anuales.

Los métodos de Coutagne y el del coeficiente de escurrimiento (k) en combinación con el método de los fragmentos sobrestiman los escurrimientos naturales, mientras que el método de Smith combinado con el método de los fragmentos los subestima, presentando un comportamiento prácticamente igual que cuando se revisaron como métodos anuales.

En general, los métodos de transporte y similitud de cuencas y el método de Langbein en combinación con el método de los fragmentos, son los que presentan mejor desempeño a la escala mensual en la subcuenca de estudio, ofreciendo resultados comparables y con un grado de ajuste aceptable con respecto a lo observado.

7.1.4.-Métodos modificados y adaptados a la zona y subcuenca de estudio

Fue posible adaptar los métodos de Smith a la zona de estudio y el coeficiente de escurrimiento a la subcuenca de estudio, logrando tener resultados comparables con los valores de escurrimientos naturales restituidos a las escalas de tiempo anual y mensual

Se presenta similitud en las medidas estadísticas utilizadas al adaptar los métodos de Smith a la zona de estudio y el coeficiente de escurrimiento a la subcuenca de estudio, con respecto a los métodos de transporte y similitud de cuencas.

Al adaptar el método mencionado a la subcuenca de estudio, determinando el parámetro k, para cada año a partir de los registros de hidrometría y precipitación de la cuenca media-alta del río Florido, mejora en gran medida los resultados del método original.

Fue posible modificar los métodos de área y precipitación, Heras y Becerril presentando resultados satisfactorios para la determinación de escurrimientos naturales a las escalas de tiempo anual y mensual. Estos métodos logran cierta ventaja con respecto a los métodos anuales combinados con el método de los fragmentos, ya que son métodos autocontenidos, no requieren volumenes de escurrimiento anual ni mensual en la cuenca aforada.

7.2.- Recomendaciones

El Servicio Meteorológico Nacional es un organismo de suma importancia, para nuestro país, porque cuenta con información climatológica que se requiere para una adecuada planeación de los recursos hídricos y para enfrentar los eventos climatológicos que se presentan en las diversas áreas de este, como por ejemplo sequías, inundaciones, huracanes, heladas, nevadas, etc. Por ello reconociendo el trabajo que ofrece junto con otras unidades gubernamentales, de diversos niveles, es recomendable que los gobiernos, organismos varios y asociaciones lo apoyen con mayor cantidad de recursos financieros, equipo, materiales, humanos, etc., para que este llegue a ser mucho mas confiable, ya que así lo requiere el país a la fecha.

En la actualidad presenta datos faltantes o datos que no se encuentran temporalmente simultáneos, siendo estos necesarios para una adecuada toma de decisiones.

Se recomienda ampliar y modernizar la red climatológica en el país para la toma de datos de manera sistemática y continua, además se debe generar una base de datos confiable que reúna dicha información en un formato uniforme.

Se propone la existencia de series de datos de lluvias diarias y mensuales accesibles, discriminadas por subcuencas para toda la república Mexicana ya que lo existente es insuficiente, porque no siempre están completas, ni capturadas en una base de datos. Por ello conviene hacer un esfuerzo para recabar y compilar la mayor información disponible en los archivos adecuados, para un manejo mas ágil y expedito.

Es necesario, documentar adecuadamente cuando (1) exista algún cambio en la localización del pluviómetro, (2) Cambio en el procedimiento de observación, o remplazo del operador, (3) Construcción de embalses en las cercanías y (4) Deforestaciones y reforestaciones en la zona (5) Desecación de pantanos (6) Apertura de nuevas áreas al cultivo en los alrededores y (7) Industrialización en áreas circundantes. Lo anterior para tomar las medidas pertinentes, en caso de que las pruebas de consistencia de una serie de datos sean no homogéneas, por lo que se propone realizar pruebas de consistencia en los registros, para mayor confiabilidad.

Aplicar adecuada y acuciosamente, los métodos para determinar escurrimientos naturales en cuencas no aforadas, ya que sólo así estos ofrecerán resultados consistentes, verificando las condiciones climáticas para las cuales fueron desarrollados y que exista similitud de cuencas, cuando ello sea una hipótesis del método.

7.3.- Áreas de oportunidad para la investigación

Considerando la importancia que tiene la similitud de cuencas para los métodos basados en esta hipótesis, el desarrollar un índice que mida la similitud que existe en dos cuencas hidrológicas, constituye un área de oportunidad para la investigación. Este índice que seguramente tomará en cuenta: (1) parámetros físicos de la cuenca (geomorfología) e (2) información climatológica en la cuenca, permitiría identificar cuando es apropiado el uso de los métodos de transporte para la estimación de escurrimientos en cuencas no aforadas.

Otro tema de investigación importante, es el análizar la posibilidad de proponer una forma para la determinación de los fragmentos en forma autocontenida, es decir sin necesidad de que exista una cuenca aforada que presente similitud con la de estudio. Probablemente el análisis de la precipitación mensual en la cuenca ofrezca una brecha para alcanzar este propósito.

Finalmente, de los resultados del presente trabajo de investigación, se puedan encontrar algunas relaciones entre los métodos analizados, sus fortalezas y debilidades, lo que permita identificar los elementos semilla que conduzcan al desarrollo de alguna nueva metodología que sea más robusta y generalizada que las que actualmente están disponibles en la literatura.

REFERENCIAS

Almorox Alonso J. , (2010), Balance hídrico, http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/Humedad_del_suelo/Balancehidricodirecto.pdf, Consultado 11 de enero de 2011.

Aparicio Mijares, J.M., (2006), Fundamentos de hidrología de Superficie, Editorial LIMUSA, México.

Campos Aranda, D.F., (1992), Escurrimiento, Capítulo 8, Procesos del Ciclo Hidrológico, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México., 8-1: 8:71.

Campos Aranda, D.F., (2009), Calibración del método del coeficiente de escurrimiento para estimación de la disponibilidad anual en dos zonas geográficas de México, Ingeniería hidráulica en México, vol. XXIV, núm. 3, pp. 131-143, julio- septiembre de 2009.

CEDEX., (2006), Secretaría de Estado y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, Las Aguas Continentales en la Unión Europea, http://hercules.cedex.es/hidrologia/pub/proyectos/honduras.htm, consultado el 12 de enero del 2011.

Comisión Nacional del Agua (CNA), (1997), Programa Hidráulico de Gran Visión del Estado de Chihuahua, Contrato: SGC-GRN-CHIH-96-82A, México. D.F.

Comisión Nacional del Agua (CNA), (2000), Reglamento del Distrito de Riego 005, Delicias, Gerancia Estatal Chihuahua, Chihuahua, Chih.

Comisión Nacional de Agua (CNA), (2003), Programa Hidráulico Regional. Región VI Río Bravo 2002-2006, México.

Comisión Nacional de Agua (CNA), (2001), Programa Nacional Hidráulico 2001-2006, México, D.F.

Comisión Nacional del Agua (CNA), (2004), Ley Federal de Aguas Nacionales y su reglamento, México, D.F.

Comisión Nacional del Agua (CNA), (2006), El agua en México, México, D.F.

Comisión Nacional del Agua (CNA), (2008), Estadísticas del Agua en Mexico

Dunne, T. y Luna Leopold, (1978), Water in Evironmental Planning, Chapter 8: the water balance, pp 236-254, San Francisco, California, U.S.A.

Fernández-Guillén, L.R., (2003), Estimación de caudales y volumenes de agua en las diez ciudades más pobladas del estado de Chihuahua. Demanda actual y requerimientos hasta el año 2028.
Fondo de las Naciones Unidas para Actividades de Población (FNUAP), (2001), El estado de la población mundial 2000. Huellas e hitos: población y cambio del medio ambiente.

Heras Rodríguez, R., (1976), Hidrología y Recursos Hidráulicos. Inciso 2.8.6: Estimación de Aportaciones, pp 724-741, Tomo I, Publicación No. 120 del servicio de publicaciones del Centro de Estudios Hidrográficos, Ministerio de Obras Públicas, Madrid, España.

Informe sobre desarrollo humano (IDH), 2006, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y Comisión Nacional del Agua (CNA), (2000), Banco nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), CD, Volumen 7. Jiutepec, Mor.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Carta edafológica, http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/default.aspx
Consultado 11 de enero de 2011.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Carta de uso del suelo y vegatación, ,
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/default.aspx
Consultado 11 de enero de 2011.

Jardí, Montserrat (1985), Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de variables morfométricas que nos la definen. Revista de Geografía, Vol XIX. Barcelona.

Langbein *et al*., (1949), Annual runoff in the United States, *United States Geological Survey*, Circular 52, p14 .

Martín Arnaiz, M., (1976), Climatología Aplicada a la Hidrología, Capítulo 6.1, pp 287-298, libro de Hidrología subterránea, Tomo I, Barcelona, España.

Mockus, V.,(1969), Hydrologic Soil-Cover Complexes, chapter 9, pp 1-11 in the National Engineering Handbook, section 4: Hydrology, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D.C., U.S.A.

Mockus,V., (1972), Wateshed Yield, Chapter 20 in the section 4 of the National Engineering Handbook, U.S. Soil Conservation Service, Washington, D.C., U.S.A.

Remenieras, G., (1976) Tratado de Hidrología, Editorial Espasa-Calape, S.A. Madrid, España, Quinta edición en inglés.
Sánchez San Román, (2001), Evapotranspiración, Departamento de Geología Universidad Salamanca, Mayo 2006, http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/climatologia/peactico_climatologia_2010/P-3/5.ETP%20articulo.pdf, consultado el 11 de septiembre del 2010.

Sánchez San Román, (2001), Evapotranspiración, Departamento de Geología Universidad Salamanca, Mayo 2006, http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/climatologia/peactico_climatologia_2010/P-3/5.ETP%20articulo.pdf, consultado el 11 de septiembre del 2010.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), (2000), Disponibilidad de agua en México, México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), (2002), Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales, Diario Oficial de la Federeación, miércoles 17 de abril, pp 2-17 (Primera Sección), México D.F.

Silva-Hidalgo, H., Martín-Domínguez, I. R., Alarcón- Herrera, M.T. and Granados-Olivas, A., (2008), Mathematical Modelling for the Integrated Management of Water Resources in Hydrological Basins, Water Resources Management, 23 (4): 721-730, code: DOI 10.1007/s11269-088-9296-y.

Silva-Hidalgo, H., Martín-Domínguez, I. R., Alarcón- Herrera, M.T. and Granados-Olivas, A., (2008b), Natural flows determination in gauged hydrological basins. Part II: The effect of time scale, Proc. IWA World Water Congress and Exhibition, Paper number 666609, Vienna, Austria.

Silva Hidalgo, H. (2010), Modelo matemático para la distribución de agua superficial en cuencas hidrológicas.

Smith, R. I., (1973), Utilizing Climatic Data to Appraise Potential Water Yields. Proceedings of the Madrid Symposium. Studies and Reports in Hydrology No. 16. Volume 2, page 253 to 264. Unesco-WMO-IAHS. June 1973.

Svandize, G.G. (1964), Oshovyraschata Regulirovaniya Rechnogo Stoka Metodom Monte Carlo (Fundamental for Estimating River-flow Regulation by the Monte Carlo Method). Academy of Sciences of the Georgian Soviet Republic, Tbilisi.

Temez Peláez, J. R., (1973), New models of frecuency law of runoff starting from precipitations, proceedings of the Madrid symposium, Studies and report in hydrology No.16, Volume 2, pp 287-300, Unesco-WMO-IAHS.

Texas Natural Resources Conservation Commission (TNRCC), (1997), Evaluation of Naturalized Streamflow Methodologies, Technical Paper #1.

Texas Natural Resources Conservation Commission (TNRCC), (1998), Evaluation of existing water availability models, Technical Paper #2.

Texas Water Resources Institute (TWRI), (1999), Comparative Evaluation of Methods for Distributing Naturalized Streamflows from Gaged to Ungaged Sites.

Thornthwaite Warren C., (1948), An Approach Toward a Rational Classification of Climate, Geographical Review, Vol. 38, No. 1. (Jan., 1948), pp. 55-94.

Thorntwaite Warren C., y Mather, J. R. (1957), Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance, New jersey, U.S.A.

Thorntwaite Warren C. (1972), Instructivo para la Determinación del Clima de acuerdo al Segundo Sistema de Thorntwaite,Publicación No. 7 de la Dirección de Agrología de la Dirección General de Estudios, S.R.H. México D.F.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) - World Water Assessment Programme (WWAP), (UNESCO-WWAP), (2006), Water a Shared responsibility, The United Nations World Water Development Report 2, Paris, France.

Woodward, D.E., Hawkins, R.H., Hjelmmfelt, A.T Jr., VanMullen, J.E., Quan, Q.D. 1999, Curve Number Method; Origins, applications and limitations (en linea): United States Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS), ftp://ftp.wee.nrcs,usda.gov/support/water/hydrology/Woodward.docconsulta: 01 de febrero de 2011, 10pp.

Wurbs, R. (2006), Methods for developing Naturalized Monthly Flows at Gaged an Ungaged Sites, Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 11 (1): 55-64.