

# Capítulo 3

## REGIONALIZACIÓN HIDROLÓGICA



Central de Urrá  
Autor: Ingfocal Ltda

Un aspecto fundamental de la investigación sobre el potencial hidroenergético en Colombia, consistió en el estudio de la disponibilidad de agua a lo largo de la red de drenaje. Para tal fin se analizaron las regiones hidrológicas en el territorio nacional, se construyó un modelo regional basado en ecuaciones de regresión, y se determinaron curvas de duración de caudal regionalizadas. Este enfoque presenta las siguientes ventajas:

- Estimar caudales en sitios donde no se dispone de información.
- Opera con datos tipo ráster en la fase operativa del modelo.
- Definición clara de los aspectos teóricos.
- Experiencias exitosas en los ámbitos nacional e internacional.
- El cálculo del caudal involucra variables morfológicas.
- Eficiente desde el punto de vista computacional.

Existe bastante información documentada sobre investigaciones que han estudiado la relación entre las características morfométricas de una cuenca hidrográfica y su respuesta hidrológica. Con la construcción de un modelo regional, basado en ecuaciones de regresión, se encontró la relación entre las características

morfométricas e hidroclimatológicas de una cuenca hidrográfica con información escasa, con los caudales registrados en estaciones hidrométricas que disponen de información adecuada. A partir de esta información se construyen las curvas de duración de caudal.

La regionalización hidrológica es un proceso mediante el cual, aplicando un conjunto de herramientas estadísticas que exploren al máximo la información existente, tanto de elementos climáticos como de factores climáticos, permite estimar el caudal en lugares carentes de información o donde los existentes resultan insuficientes, y se apoya en el concepto de homogeneidad hidrológica que permite dividir un territorio en regiones cuyas características climáticas y topográficas sean similares.

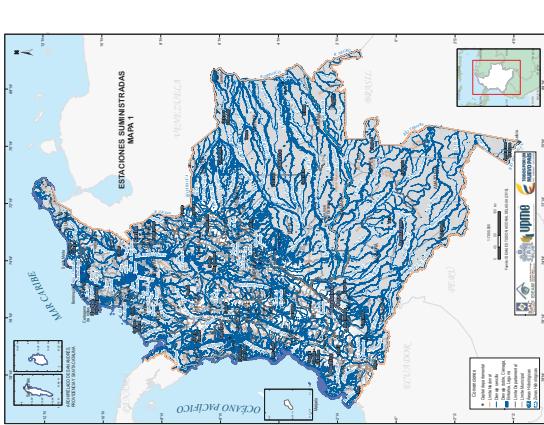
La regionalización hidrológica es una herramienta importante para el análisis espacial de algunos fenómenos hidrológicos, con el fin de tener elementos de juicio que permitan caracterizar, con el uso de métodos estadísticos, una cuenca hidrográfica. En este capítulo se presenta la metodología empleada para identificar las regiones hidrológicas en el territorio continental colombiano (Figura 3.1), describiendo las técnicas estadísticas y los parámetros físicos e hidrológicos utilizados para caracterizar cada cuenca geográfica.



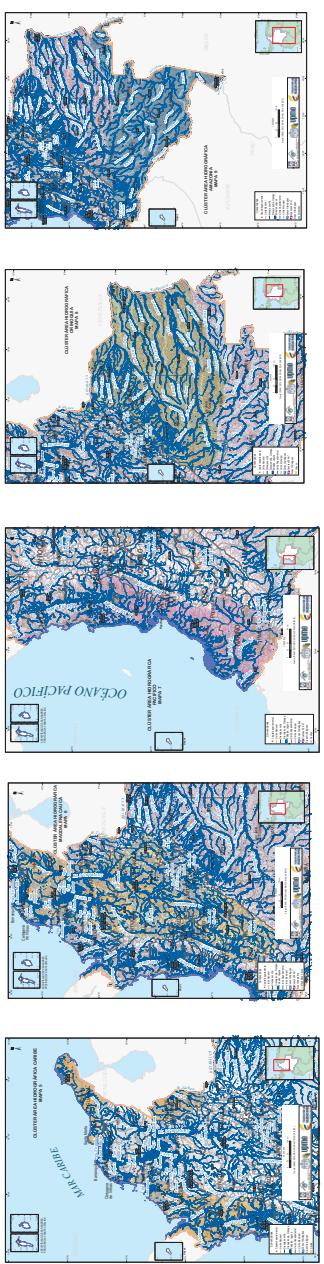
# Atlas

## Potencial Hidroenergético de Colombia

Identificación de cuencas por área



Mapas por cada variable: 20 Variables



Normalizar las variables de análisis

Asignar variables a cada cuenca

Realizar análisis de clúster

Seleccionar clúster representativo

Identificar regiones hidrológicas  
Identificar nuevos individuos: áreas, zonas y subzonas

Realizar análisis discriminante

Figura 3.1. Esquema metodológico de la regionalización áreas hidrográficas

Fuente: Pontificia Universidad Javeriana, 2015



En el marco de la gestión integral del recurso hídrico, la Asociación Mundial para el Agua reconoce las cuencas hidrográficas como la unidad territorial más apta para la planificación y gestión de los recursos hídricos. En la escala de cuenca hidrográfica es posible estudiar con mejor detalle las relaciones que existen entre los sistemas físicos, bióticos, sociales y económicos. (Figura 3.2).

La identificación de áreas, zonas y subzonas hidrográficas, que elaboró el IDEAM, resulta adecuada para analizar en un contexto geográfico las variables asociadas con la disponibilidad de agua. Sin embargo, con el propósito de identificar regiones hidrológicas en áreas inferiores a las clasificadas por el IDEAM, en esta sección se presentan los resultados de la regionalización hidrológica orientada a extrapolar datos a escala local y estimar el caudal en sitios donde se carece de información.

La identificación de regiones hidrológicas y de cuencas hidrográficas, que posteriormente serán objeto de clasificación, requiere de información topográfica e hidrometeorológica, la cual fue consultada y obtenida en las siguientes fuentes de información: i) el IGAC, que suministró el modelo digital de terreno SRTM 30, obtenido en el marco del proyecto Shuttle Radar Topography Mission; ii) El IDEAM, que aportó la información disponible en la base de datos del estudio nacional del agua de los años 2010 y 2014; iii) la base de datos del HidroSIG 3.1, desarrollado

por la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín); y iv) el sistema de información geográfica para la planeación y el ordenamiento territorial (SIG-OT) del IGAC.

Las cuencas hidrográficas son descritas por atributos morfométricos e hidroclimatológicos, por lo cual a partir de herramientas de geoprocreso, disponibles en los sistemas de Información geográfica, fue posible combinar las dos fuentes de información y se les asignaron atributos como el área total y los valores promedio para la pendiente, la precipitación, la temperatura y la escorrentía. Las cuencas hidrográficas se clasificaron y reagruparon empleando técnicas estadísticas como el análisis de componentes principales, el análisis de clúster y el análisis discriminante. Puesto que se clasifican espacios geográficos, los resultados se presentan como salidas gráficas expresadas en mapas como los que se presentan en este capítulo.

## CÁLCULO DE PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

Inicialmente se evaluó la exactitud vertical del modelo digital del terreno, para determinar las imprecisiones que se presentan en las regiones del país, mediante comparación con la fuente de mayor precisión que son el conjunto de puntos materializados en la red geodésica nacional, suministrado por el IGAC. Para este propósito se aplicaron las pruebas de Koppe y National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA); las cuales permitieron estimar el error del modelo considerando la pendiente local del terreno y el error medio cuadrático entre valores observados y calculados. Se determinó que los errores más altos están asociados a terrenos con relieve accidentado, mientras que para zonas de baja pendiente el error tiende a disminuir. Las pruebas de Koppe y NSSDA resultaron en promedio de 16,93 m y 18,64 m de exactitud vertical, al 95% de nivel de confianza respectivamente, lo que indica que en este rango de



Figura 3.2. Aspectos biofísico cuenca



# Atlas

## Potencial Hidroenergético de Colombia

magnitudes fluctúan las diferencias entre las alturas de la superficie real del terreno y la generalizada del modelo.

En la figura 3.3 se presenta el histograma con las diferencias entre el modelo SRTM-30 y las alturas geométricas IGAC, en la que se puede observar que las diferencias tienden a concentrarse entre 0 y  $\pm 20$  m., situación que se complementa con lo ilustrado en el diagrama de cajas y bigotes, la cual indica valores anómalos que corresponden a zonas donde el error supera los 70 m, presentando estos una frecuencia baja en el conjunto de datos analizado.

El signo del error calculado, indica la posición del punto de la red geodésica con respecto a la superficie del modelo digital del terreno, como se ilustra en la figura 3.4.

Una vez se evaluó la exactitud vertical del modelo digital del terreno, este se ajustó hidrológicamente recurriendo al método DEM Surface Reconditioning System, desarrollado en 1997 por el Centro de Investigación de Recursos Hídricos de la Universidad de Texas. El procedimiento permitió simular la red de drenaje oficial del país, escala 1:100.000, aplicando el algoritmo D8. La identificación de la red de drenaje se utilizó para generar cuencas hidrográficas y redes de drenaje con diferentes umbrales.

Se construyó un árbol de decisión, que relacionaba información de pendientes, densidad de estaciones de registro de caudal y rendimientos hídricos, y se analizó conjuntamente con el desnivel de cuenca hidrográfica y la potencia hidroeléctrica que se podía obtener. Como resultado de este procedimiento se seleccionó el Área hidrográfica Magdalena-Cauca, para identificar regiones hidrológicas y cuencas hidrográficas en el intervalo de 50 a 250 km<sup>2</sup>. Para las demás áreas hidrográficas la disponibilidad de información y la representatividad de la pendiente media, orientaron la selección de cuencas hidrográficas generadas con un umbral superior a los 100 km<sup>2</sup>. En ningún caso se identificó un tamaño máximo de cuenca.

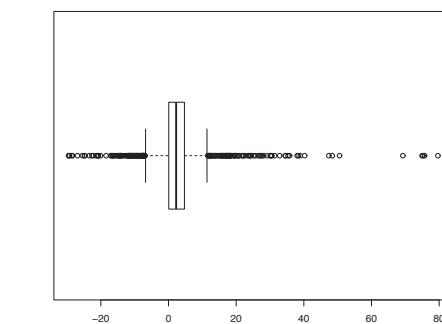
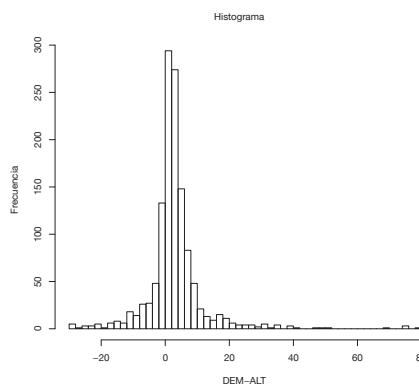


Figura 3.3. Histograma de las diferencias entre el modelo SRTM y alturas geométricas IGAC

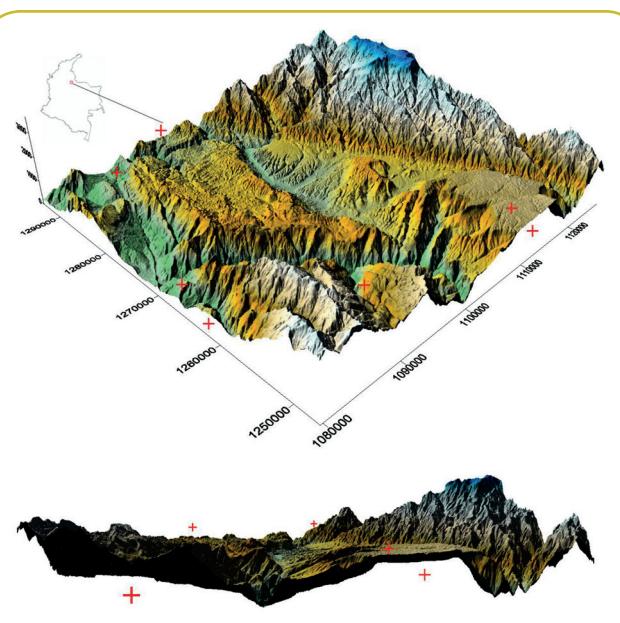


Figura 3.4. Modelo de elevación digital SRTM con puntos subestimados y sobreestimados de la red geodésica

La red de estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM, se ajustó a la red de drenaje simulada, lo que facilitó delimitar las áreas aferentes a los puntos de registro de caudal sobre la corriente hídrica correspondiente. Con esta información y con los productos del procesamiento del modelo digital del terreno, se calcularon los atributos necesarios para el análisis de regionalización en las cuencas

## Capítulo 3

### Regionalización hidrológica



**Tabla 3.1. Parámetros empleados en el cálculo del caudal medio en el Alto Magdalena**

Código estación	Nombre estación	Nombre de la corriente	Área de la cuenca (Km <sup>2</sup> )	Pendiente media de la cuenca (%)	Elevación media de la cuenca (msnm)	Déficit de agua en el suelo Penman anual (mm)	Área de cobertura bosque (Km <sup>2</sup> )	Escorrentía basada en Penman anual (mm)	Evaporación real anual monto anual (mm)	Evaporación potencial Türc (mm)	Precipitación media anual (mm)	Temperatura del aire en la superficie anual (Grados Celsius)	Rendimiento anual ENA 2014 (L/s.Km <sup>2</sup> )		
21017020	San Agustín	Naranjos	326,22	33,97	2353,47	212,46	187,44	1437,00	927,75	894,50	2596,75	15,75	64,75		
21017040	Salado Blanco	Magdalena	2991,86	33,59	2252,94	338,48	1088,42	1027,35	919,35	889,29	2093,59	15,18	59,92		
21017050	Pitalito 2	Guaradas	270,51	31,49	1810,77	232,08	76,12	1753,67	919,33	1000,00	2808,00	17,39	48,75		
21017060	La Magdalena	Magdalena	558,36	41,74	2978,60	311,44	244,68	1335,20	987,00	647,80	2292,60	10,96	73,36		
21027010	Pericongo	Magdalena	3566,19	33,42	2156,54	306,08	1181,87	953,33	908,79	949,62	1991,60	16,09	57,39		
21037010	Pte Garcés	Suaza	996,18	37,16	1608,68	303,67	336,71	1275,18	917,91	1059,27	2240,27	18,19	55,64		
21037020	San Marcos	Suaza	352,92	36,77	1793,65	301,27	226,96	1468,25	919,00	919,00	1016,50	2559,75	17,63	60,20	
21047010	Pte Balseadero	Magdalena	5564,58	33,85	1898,96	309,62	1572,17	962,63	909,78	1038,81	1972,50	17,40	54,12		
21057020	San Rafael-Lagunilla	Betón	111,82	24,66	3516,39	166,53	36,80	1114,03	975,90	975,90	628,92	1846,83	10,57	50,46	
21057030	Pte Ricaurte	Paez	2459,16	45,84	2781,05	81,06	665,32	1088,82	962,89	962,89	782,93	2029,25	13,36	38,79	
21057050	Vega El Salado	La Plata	1214,95	32,62	2389,95	160,84	293,35	919,86	954,93	730,14	1901,36	12,43	45,28		
21057060	Paicol	Paez	4840,62	41,81	2504,29	109,91	1304,02	973,07	943,74	943,74	837,78	1932,98	14,26	38,56	
21057080	Villa Losada	La Plata	863,37	33,24	2492,63	174,75	212,75	1000,10	971,80	971,80	662,60	1850,30	11,07	46,36	
21087040	Hidroeléctrica	Pedernal	103,93	50,92	1596,16	225,78	4,13	824,00	781,50	781,50	1304,00	1698,50	21,16	35,89	
21087050	Bocatoma	Iquira	54,10	50,68	2185,29	277,48	22,66	739,80	791,33	791,33	1415,58	1644,05	22,25	33,35	
21087070	Hda El Jardín	Yaguara	493,27	38,77	1447,45	294,70	54,24	701,83	839,50	839,50	1350,83	1592,67	21,58	30,78	
21087080	Hda Venería	Yaguara	671,67	38,78	1395,22	277,47	58,37	732,38	825,00	825,00	1339,13	1619,13	21,47	31,47	
21097070	Pte Santander-Auto	Magdalena	15132,70	36,02	1903,55	294,92	3659,90	855,34	913,17	913,17	1088,39	1808,74	17,76	42,08	
21107020	Pte Mulas	Neiva	615,79	46,21	2000,32	542,03	269,20	824,25	960,00	960,00	951,50	1778,63	16,32	25,46	
21107030	El Casil	Neiva	215,81	41,66	2090,31	556,48	168,22	693,33	901,33	901,33	997,00	1698,33	17,04	26,35	
21117080	Guayabo	Oebas	224,35	51,89	1912,32	263,68	137,41	1060,33	925,00	925,00	784,50	1587,00	1727,00	15,27	26,38
21127010	Palermo	Túne	181,77	34,19	1101,48	294,64	6,90	783,50	784,50	784,50	1587,00	1726,67	15,27	26,38	
21127020	El Socorro	Bache	306,84	46,29	2271,90	110,15	89,53	1121,25	886,00	886,00	921,00	1982,75	16,14	29,71	
21127030	Sra María	Bache	101,15	44,72	2666,36	109,47	58,66	1208,46	842,16	842,16	980,70	2002,26	17,06	30,34	
21137040	Purificación-Auto	Magdalena	25510,80	33,26	1627,77	254,03	4679,98	820,17	938,80	938,80	1221,69	1747,61	19,58	37,32	
21137050	Angostura	Magdalena	22295,80	34,63	1730,53	252,80	4512,29	824,82	923,05	923,05	1174,72	1748,31	18,97	38,27	



# Atlas

## Potencial Hidroenergético de Colombia

**Continuación de la Tabla 3.1. Parámetros empleados en el cálculo del caudal medio en el Alto Magdalena**

Código estación	Nombre estación	Nombre de la corriente	Área de la cuenca (Km <sup>2</sup> )	Pendiente media de la cuenca (%)	Elevación media de la cuenca (m.snm)	Déficit de agua en el suelo Penman anual (mm)	Área de cobertura bosque (Km <sup>2</sup> )	Escorrentía basada en Pernam anual (mm)	Evaporación real anual (mm)	Evaporación potencial Turc (mm)	Precipitación media anual (mm)	Temperatura del aire en la superficie anual (Grados Celsius)	Rendimiento anual ENA 2014 (L/s.Km <sup>2</sup> )	
21147030	Carrasposo	Cabrerá	1662,57	33,24	2110,36	157,65	390,91	710,28	1067,39	1011,94	1647,72	17,66	31,19	
21147050	Pte Venado	Venado	527,99	46,42	2017,57	153,51	114,38	730,00	933,14	933,14	1135,00	1682,00	19,28	34,15
21167020	Boqueron	Prado	1629,24	25,51	1147,86	262,19	141,52	1019,22	1022,50	1424,11	1942,83	22,46	28,23	
21167050	Pte Cunday	Prado	148,84	24,81	998,78	730,36	2,95	344,71	1076,31	846,58	1405,04	15,43	24,44	
21167060	San Pablo-Auto	Quindé	278,17	23,57	1590,87	248,48	38,86	1257,00	1040,50	1040,50	1158,50	2081,00	20,15	25,04
21187020	Pavo Real	Luisa	168,12	40,65	1559,36	354,83	31,48	650,17	1040,77	1040,77	1694,42	1634,73	24,96	27,53
21187030	Cucunuba	Luisa	264,85	35,49	1320,77	320,46	36,89	610,33	1062,00	1062,00	1371,67	1832,67	22,34	28,86
21197010	El Profundo-Auto	Sumapaz	945,88	25,60	3283,69	527,35	101,66	579,08	1149,69	1149,69	1549,85	9,49	18,81	
21197030	La Playa	Sumapaz	1166,41	26,92	3064,58	549,40	132,34	556,00	1136,06	1136,06	639,75	1546,06	10,75	19,03
21197090	Dos Mill	Sumapaz	703,25	26,01	3485,60	601,61	45,42	472,67	1169,89	1169,89	536,56	1461,56	8,53	19,11
21197110	Silvania	Subia	160,18	24,40	2305,87	260,47	0,29	649,00	980,33	980,33	1046,00	1321,00	18,48	18,67
21197150	El Limonar	Sumapaz	2432,45	27,35	2545,62	515,66	154,74	501,52	1071,07	1071,07	808,90	1426,69	13,77	19,68
21207960	Pte Portillo	Bogota	5407,21	20,22	2524,43	390,65	33,27	319,11	950,25	950,25	863,90	980,43	14,89	17,80
21217070	Payande	Coello	1528,97	47,08	2415,40	442,75	470,68	612,24	1126,06	1126,06	849,71	1781,65	14,97	33,25
21217120	Pte Carrera	Coello	797,31	48,54	2805,56	531,82	265,27	489,00	1179,50	1179,50	717,00	1666,50	12,96	35,15
21217180	Montezuma	Combeima	164,70	60,12	2883,41	456,30	42,98	836,50	1046,50	1046,50	887,50	1719,00	16,10	52,54
21217190	Juntas	Qda Perlas	10,84	53,48	3247,17	565,89	2,48	648,00	1027,00	1027,00	734,00	1504,00	13,27	78,82
21217200	El Carmen	Coello	1096,83	48,57	2622,86	462,40	379,38	525,08	1157,77	1157,77	782,38	1772,38	13,86	32,12
21217220	San Vicente	Combeima	105,75	59,61	3120,65	339,62	19,52	1047,13	1010,23	1010,23	816,01	1785,84	14,57	61,68
21217270	El Chuzo	Anáme	260,85	43,00	2957,67	369,94	106,78	472,00	1265,00	1265,00	562,50	1807,00	9,55	26,88
21217280	Pte Bolívar	Bermellón	81,17	48,59	2840,46	551,41	29,17	482,63	1151,91	1151,91	787,00	1626,70	14,51	31,71
21227010	Piedras	Opiá	316,67	12,09	669,30	336,37	37,19	381,33	1039,67	1039,67	1706,00	1343,00	25,53	23,21
21237010	Nariño-Auto	Magdalena	48114,30	32,89	1807,23	291,61	7889,44	756,95	985,24	985,24	1145,81	1722,94	18,43	33,20
21237020	Aranca Plumbas	Magdalena	54525,80	32,55	1740,68	282,19	8541,49	750,69	992,98	992,98	1179,80	1698,13	18,81	32,74
21237040	Corraíllos	Seco	248,09	32,42	1222,30	211,56	N/A	375,33	1032,33	1032,33	1458,67	1212,00	23,27	17,95
21247050	Bocatoma	Totare Río	412,71	46,45	3014,30	240,74	31,52	1045,20	1009,00	1009,00	780,60	1764,40	12,99	44,14
21257070	Pte San Francisco	Sabandia	340,79	25,13	864,45	69,06	79,25	1327,25	983,75	983,75	1374,75	2093,25	22,11	34,39
21257090	La Esmeralda	Lagunilla	670,97	38,31	1901,83	80,25	93,02	1222,50	1000,83	1000,83	1012,33	1781,83	15,99	35,98
21257100	La Nueva	Recio	645,55	43,57	2542,62	149,71	33,79	1161,80	968,80	968,80	784,60	1775,10	12,92	37,93
21257120	Pte Gato Negro-Auto	Lagunilla	175,47	42,15	2920,88	83,66	35,80	1156,71	946,52	946,52	1229,75	1898,22	20,20	36,63



hidrográficas, en las zonas y subzonas hidrográficas y en las áreas aferentes a las estaciones hidrométricas del IDEAM. (Tabla 3.1).

Se presentan los resultados obtenidos para atributos, de las estaciones IDEAM ubicadas en el Alto Magdalena, caracterizando cada cuenca hidrográfica y que agrupados mediante técnicas estadísticas permiten identificar regiones hidrológicas. En el territorio continental de Colombia se identificaron 9.139 cuencas hidrográficas cada una de ellas caracterizada por 20 atributos numéricos, correspondientes a variables topográficas e hidroclimatológicas asociadas con el comportamiento hidrológico.

## **IDENTIFICACIÓN DE REGIONES HIDROLÓGICAS**

El análisis regional es válido siempre que la región que contenga las cuencas, con o sin registro de caudal, sea meteorológica y topográficamente homogénea. Por consiguiente la primera actividad desarrollada para implementar el análisis regional, fue identificar las regiones hidrológicas mediante la construcción de cuencas hidrográficas en cada una de las áreas hidrográficas. Considerando la precisión del modelo digital del terreno y la pendiente del territorio (Mapa 3.1), el número de estaciones hidrométricas disponibles (Mapa 3.2) y empleadas (Mapa 3.3) se identificaron cuencas hidrográficas con área superficial comprendida en el rango de 50 km<sup>2</sup> a 250 km<sup>2</sup> (Mapa 3.4).

La identificación de cada cuenca, dentro de una región hidrológica, requirió determinar los siguientes aspectos: parámetros del río principal (longitud, desnivel y pendiente); parámetros geomorfológicos (área, pendiente, perímetro, desnivel, elevación media, densidad de corrientes, densidad de drenaje, coeficiente de compacidad); y parámetros climáticos (precipitación, rendimiento, escorrentía, temperatura, evaporación real, evaporación potencial, déficit de agua en el suelo).

Para tipificar regiones hidrológicas homogéneas se utilizó el procedimiento conocido con el nombre de “análisis de clúster” que consiste en dividir el número total de parámetros en un número reducido de grupos, en los que cada parámetro pertenece a la agrupación con la media más cercana. En otras palabras, se pretende definir el centro geométrico para cada grupo. Para cada área hidrológica del IDEAM se realizó el análisis de clúster, con agrupaciones finales de 2, 3 y 4 clústeres, mediante el cálculo iterativo de la distancia que hay entre los parámetros y la posición de su centro geométrico, proceso que se repitió hasta alcanzar el valor mínimo promedio de distancia.

El área hidrológica Caribe, (Mapa 3.5), requirió el análisis individual de tres subregiones: i) Atrato-Darién, Caribe-Litoral, Sinú, Caribe-Urabá, en adelante Caribe-Litoral; ii) Caribe-Guajira, y iii) Caribe-Catatumbo, ya que el hecho de ser áreas no colindantes dificulta la extrapolación de información dentro del esquema metodológico de regionalización implementado. La subregion Caribe-Litoral se representó por tres (3) clústeres, ya que diferencia la zona montañosa de la zona de baja pendiente, además de separar las cuencas hidrográficas que desembocan al Océano Pacífico de las cuencas hidrográficas con descarga al Océano Atlántico. Por las características de la información disponible en la subregion Caribe-Guajira, esta se representó con dos (2) clústeres, ya que diferencia la zona de la Guajira de la Sierra Nevada de Santa Marta. La subregión Caribe-Catatumbo, se representó por dos (2) clústeres, pues permite identificar la zona de alta montaña y la zona de baja montaña, además de capturar las marcadas diferencias que existen entre precipitación y evaporación.

El área hidrológica Magdalena-Cauca, (Mapa 3.6), requirió la agrupación de tres (3) clústeres, pues describe adecuadamente las condiciones de la cuenca alta, media y baja.

El Área hidrológica Pacífico, (Mapa 3.7), requirió la agrupación de dos (2) clústeres, pues diferencia las cuencas de alta montaña y las de baja montaña.

Para el Área hidrológica Orinoco, (Mapa 3.8), con base en la disponibilidad de información se agrupó en dos (2) clústeres.

Para el Área hidrológica Amazonas, (Mapa 3.9), con base en la disponibilidad de información se agrupó en dos (2) clústeres, orientando la agrupación principalmente hacia la pendiente del terreno.

Finalmente, las 9.139 cuencas hidrográficas analizadas se reagruparon en 16 clústeres o regiones hidrológicas, (Mapa 3.10), mediante la técnica estadística que presenta el “análisis discriminante”, ya que la información disponible está mejor representada a nivel de zonas y subzonas hidrográficas, en el marco de la clasificación IDEAM, para estimar el caudal en cuencas no aforadas, ajustándose a un análisis regional que satisface las necesidades de cálculo requeridas por el Proyecto del potencial hidroenergético de Colombia. De los 16 grupos identificados en el análisis de clúster, la reagrupación por zonas hidrológicas reduce el número a 10 grupos (Mapa 3.11):

El área hidrográfica Caribe se representa adecuadamente por tres (3) grupos, cada uno de ellos simbolizando las áreas Caribe-Litoral, Caribe-Guajira y Caribe-Catatumbo.

Las áreas hidrográficas Amazonía y Orinoquía se dividen en dos (2) grupos, en los que la diferencia se explica por la influencia de parámetros topográficos como la pendiente y la elevación promedio de la cuenca.

El área hidrográfica Pacífico se identifica con un (1) grupo, en el que predomina el comportamiento de variables hidroclimatológicas como la precipitación y la escorrentía.

El área hidrográfica Magdalena-Cauca se representa por dos grupos (2), el primero de ellos, conformado por las zonas hidrológicas Sogamoso, Saldaña, Cauca y Nechí; mientras que el segundo,

lo integran las zonas Alto Magdalena, Medio Magdalena, Bajo Magdalena, Cauca-San Jorge, Bajo Magdalena y César. Este agrupamiento se explica con base en variables hidroclimatológicas y topográficas.

### ESTIMACIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL

Para la toma de decisiones sobre la implementación de un modelo de regionalización, inicialmente se analizó el caudal registrado en cada estación caracterizando su distribución espacial y temporal. Espacialmente, el caudal se agrega en regiones hidrológicas o en zonas hidrológicas; en el tiempo, se agrega en una escala mensual. Un modelo regional basado en ecuaciones de regresión, permite estimar el caudal en sitios que carecen de registro.

El primer paso para generar las ecuaciones de regionalización, consistió en seleccionar las zonas homogéneas en las cuales se cuenta con información registrada de caudales medios mensuales, para el periodo enero de 1974-diciembre de 2011, en las 472 estaciones hidrométricas de la Red Básica de Monitoreo Hidrológico que administra el IDEAM. En el mapa 3.12 se presenta la distribución mensual multianual del caudal, para cada una de las zonas hidrológicas IDEAM, se observa la diferencia que existe en la respuesta hidrológica de cada una de estas zonas, comportamiento que se aprecia más claramente en cada una de las áreas hidrológicas. (Mapa 3.13 al Mapa 3.17).

Partiendo de las 16 regiones hidrológicas citadas en el numeral anterior, fue posible reagruparlas en 17 regiones hidrológicas de acuerdo con: i) la zonificación hidrográfica de Colombia desarrollada por el IDEAM, ii) los resultados del proceso de identificación de regiones hidrológicas, y iii) la información registrada en la red de monitoreo del IDEAM. La distribución de las 17 regiones de acuerdo con el número de estaciones y zona geográfica se presenta a continuación.



- Región 1 =Zona 11 (18 Estaciones) Atrato – Darién.
- Región 2 =Zonas 12 13 (23 Estaciones) Caribe - Litoral, Sinú.
- Región 3 =Zona 15 (18 Estaciones) Caribe – Guajira.
- Región 4 =Zona 16 (17 Estaciones) Catatumbo.
- Región 5 =Zona 21 (59 Estaciones) Alto Magdalena.
- Región 6 =Zona 22 (16 Estaciones) Saldaña.
- Región 7 =Zona 23 (40 Estaciones) Medio Magdalena.
- Región 8 =Zona 24 (28 Estaciones) Sogamoso.
- Región 9 =Zona 25 (10 Estaciones) Bajo Magdalena- Cauca -San Jorge.
- Región 10 =Zona 26 27 (65 Estaciones) Cauca, Nechí.
- Región 11 =Zona 28 (18 Estaciones) Cesar.
- Región 12 =Zona 29 (10 Estaciones) Bajo Magdalena.
- Región 13 =Zonas 31 32 33 34 38 (20 Estaciones) Inírida, Guaviare, Vichada.
- Región 14 =Zonas 35 36 37 39 (58 Estaciones) Meta, Casanare, Arauca, Apure.
- Región 15 =Zonas 41 42 43 44 45 46 47 48 49 (30 Estaciones) Amazonas.
- Región 16 =Zonas 51 52 (28 Estaciones) Mira, Patía.
- Región 17 =Zonas 53 54 55 56 (14 Estaciones) San Juán, Baudó.

Las variables utilizadas en la selección de regiones hidrológicas homogéneas, se consideraron para el análisis de regresión que permitió identificar los coeficientes de regresión del modelo regional. Se obtuvieron entonces 17 ecuaciones de regionalización, con coeficientes de determinación superiores a 0,90. Las variables regresoras en cada región hidrológica son diferentes, las que se presentaron con mayor frecuencia fueron el área de la cuenca, la pendiente media de la cuenca, la precipitación, la evapotranspiración y el rendimiento hídrico; con menor frecuencia se presentaron la densidad de corrientes y el perímetro de la cuenca.

Para cada región hidrológica se seleccionaron cinco (5) variables regresoras. El raster de caudales se construyó en función del valor del coeficiente de regresión, empleando el mapa de la red de drenaje, descrito anteriormente, sobre el cual se definió la dirección del flujo y la acumulación del caudal. El siguiente paso consistió en identificar el área aferente al punto de interés, y finalmente con la ecuación de regionalización, considerando los coeficientes de regresión, se calculó el caudal para el punto de interés. La figura 3.5 ilustra el procedimiento metodológico, cuyo resultado se presenta en el mapa 3.18.

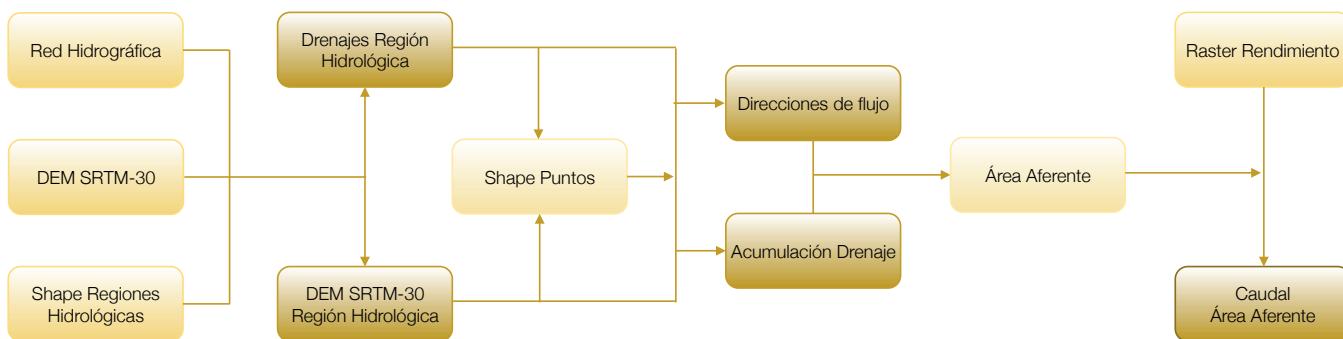


Figura 3.5. Esquema metodológico para el cálculo de caudal

## ESTIMACIÓN DE CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDAL

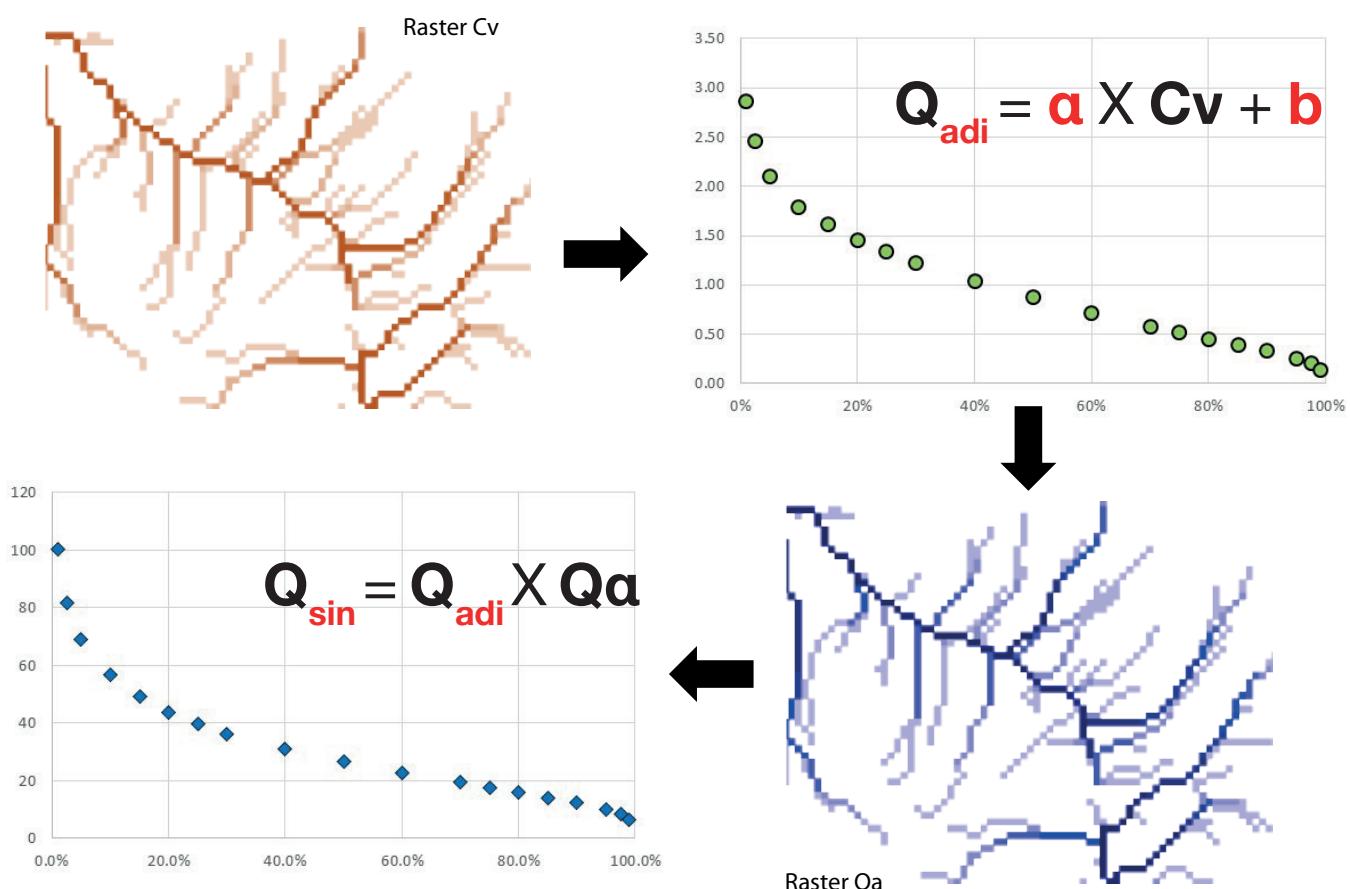
La curva de duración de caudal es el componente hidrológico base para el diseño de una central hidroeléctrica, y representa la relación que existe entre el caudal y la duración o porcentaje de tiempo en el que ese caudal es igualado o excedido. La forma de la curva de duración de caudal es una evidencia del tipo de régimen de caudal que se presenta en el sitio de estudio, ya que éste se encuentra influenciado por condiciones geológicas, hidrológicas y climatológicas de la cuenca aferente hasta este punto.

El caudal es normalmente representado por  $Q$ , y el valor de excedencia como un número subíndice. Entonces,  $Q_{95}$  significa el caudal igual o superior a un 95% del tiempo. Los caudales de ubican entre  $Q_{70}$  y  $Q_{100}$  se consideran caudales bajos. En la medida que los caudales pasan de  $Q_{95}$  a  $Q_{100}$  se alcanzan condiciones de sequía. En el diseño de sistemas de aprovechamiento hidroenergético es importante considerar estos caudales puesto que, por ejemplo, en la legislación colombiana el  $Q_{95}$  se emplea para el cálculo de la energía firme. Así, la curva de duración de caudal se constituye en una fuente de información de consulta obligatoria en la evaluación del potencial hidroenergético.

Para la construcción de las curvas de duración de caudal sintéticas, se utilizó

un método regional ajustado a las 17 regiones hidrológicas que se emplearon para el cálculo del caudal. La primera actividad desarrollada, consistió en la construcción de curvas de duración de caudal adimensionales utilizando el caudal promedio anual, como expresión del primer momento estadístico de los datos disponibles. La segunda actividad, consistió en corregir las desviaciones significativas involucrando el segundo momento estadístico, expresado en el coeficiente de variación. Finalmente la tercera actividad, consistió en identificar regresiones lineales para cada percentil de las curvas de duración de caudal adimensionales, en función del coeficiente de variación. Estos coeficientes se obtuvieron para cada una de las 17 regiones.

La determinación de la curva de duración de caudal, en un sitio sin medición, comienza con el cálculo del coeficiente de variación para dicho sitio. Con este valor, para cada percentil, se construye la curva de duración de caudal adimensional, la cual se multiplica por el valor del caudal promedio anual estimado en el sitio de interés (Figura 3.6). En el mapa 3.19 se presentan las curvas de duración de caudal para el territorio continental colombiano, y detalladas por área hidrológica del mapa 3.20 al mapa 3.24.



**Figura 3.6. Metodología para el cálculo de una curva de duración de caudal sintética**

Para el desarrollo de la metodología mencionada anteriormente se utilizó la siguiente información procesada por el IDEAM: curvas de duración de caudal de 472 estaciones hidrométricas, a nivel de caudal diario; caudales medios mensuales para las mismas estaciones hidrométricas; y el raster de coeficiente de variación reportado en el estudio nacional del agua 2008.

Los resultados obtenidos se evaluaron mediante las medidas de desempeño, Error Relativo Medio Absoluto (ERMA) y el Error Cuadrático Medio (ECM). Se obtuvo un ERMA mínimo de 19,2% para la región 2 y un ERMA máximo de 103,3% para la región 11. El ECM resultó muy sensible cuando se estima el caudal medio anual para los primeros percentiles de la curva, sin embargo, en un análisis por cada percentil éste disminuye al acercarse a percentiles mayores. El comportamiento resulta contrario cuando se analiza el ERMA.

Resulta evidente que en algunas regiones se obtienen ajustes bajos, puesto que no se dispone de información suficiente para realizar una identificación robusta de los parámetros del modelo. Otro factor con gran influencia en el comportamiento de la curvas de duración sintéticas es el valor de la relación  $Q_{\text{simulado}}/Q_{\text{observado}}$ , valores altos de esta relación significan representaciones de baja correlación. La magnitud del caudal no influye en el resultado, ya que se pueden observar ajustes buenos, regulares y malos tanto para caudales grandes como para caudales pequeños. No hay una relación directa entre valores aceptables del coeficiente de determinación, para las ecuaciones lineales que describen cada percentil, y el desempeño de la curva de duración sintética, puesto que se observan ajustes buenos, regulares y malos.

En términos generales el modelo propuesto genera representaciones adecuadas para valores mayores al

Q25%, valor que resulta muy cercano al percentil donde se localizaría el caudal medio multianual. La dispersión alrededor del modelo lineal disminuye en la medida que se incrementa el percentil, por lo que se considera adecuada la representación que hace el modelo del Q95%. Sin embargo, la revisión analítica del modelo ante los errores considerados no reporta los niveles de confianza necesarios para

adoptar íntegramente los resultados del modelo, por lo que se recomienda utilizar los valores calculados entre los percentiles Q25% y Q95% como indicadores de la magnitud del caudal que se espera en estos percentiles, mientras se recolecta información que pueda sustentar el desarrollo de otros enfoques.



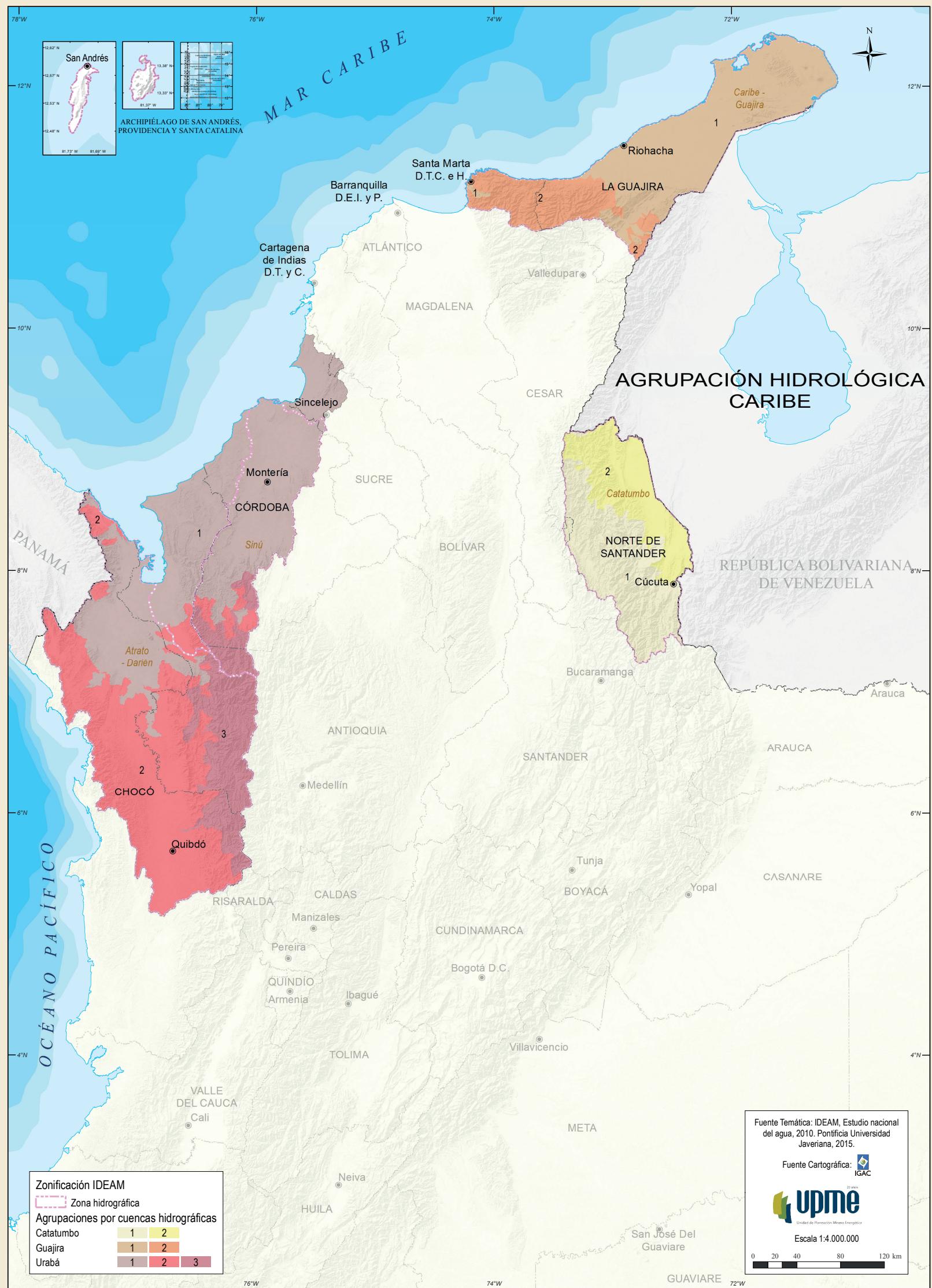
Mapa 3.1. Relieve





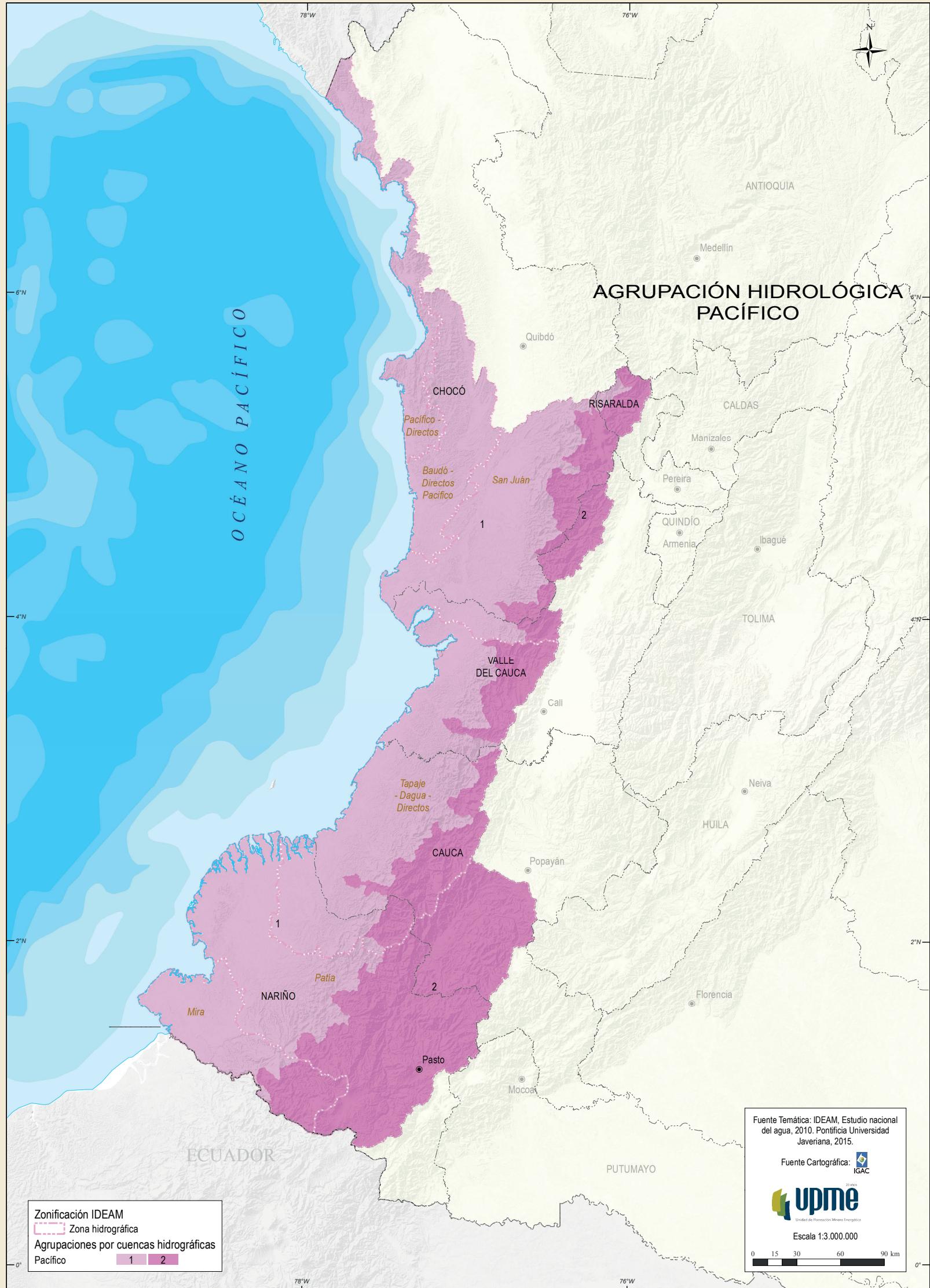
Mapa 3.3. Estaciones de caudal utilizadas en la modelación hidrológica





Mapa 3.5. Agrupación hidrológica Caribe





Mapa 3.7. Agrupación hidrológica Pacífico



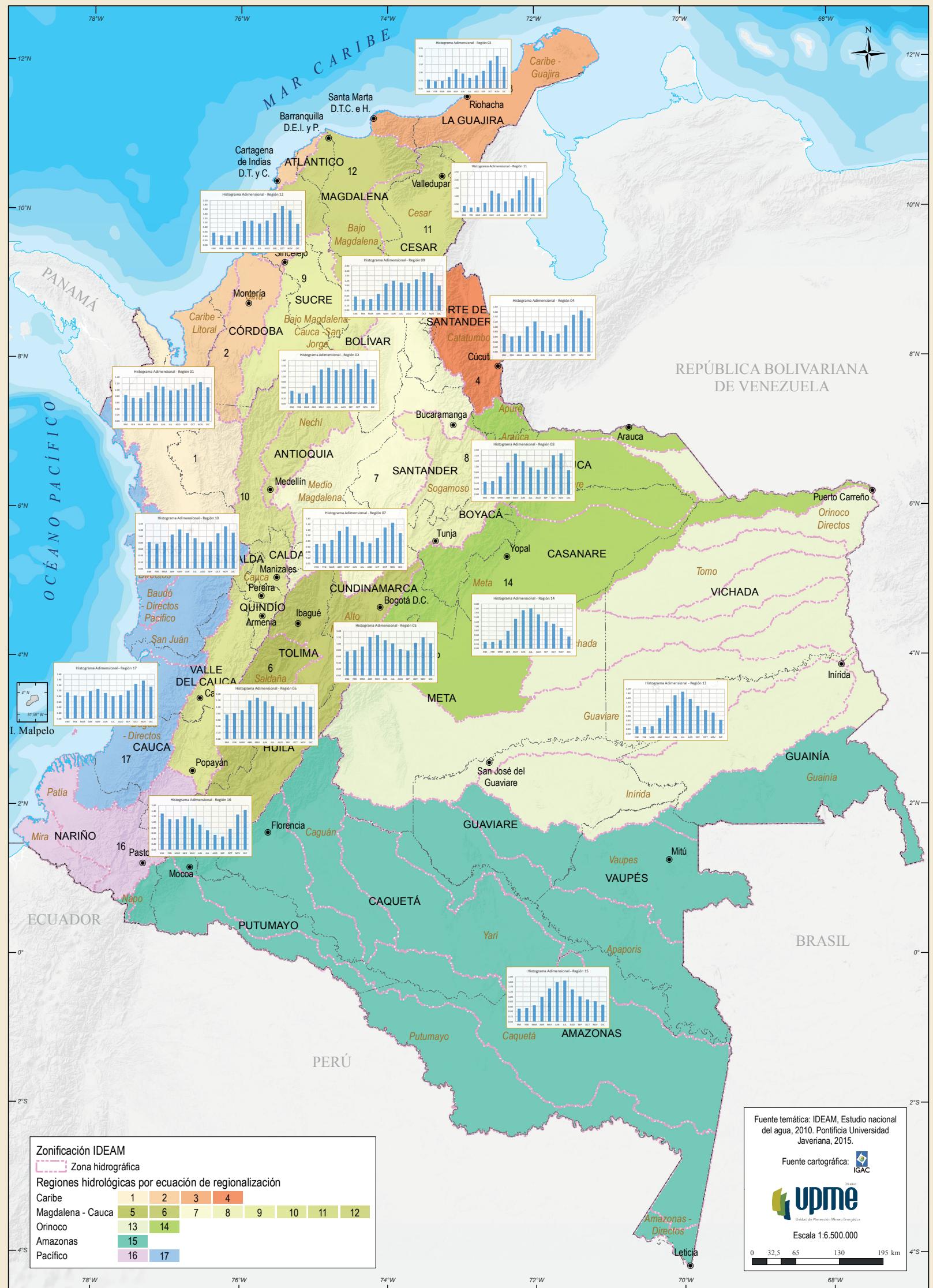


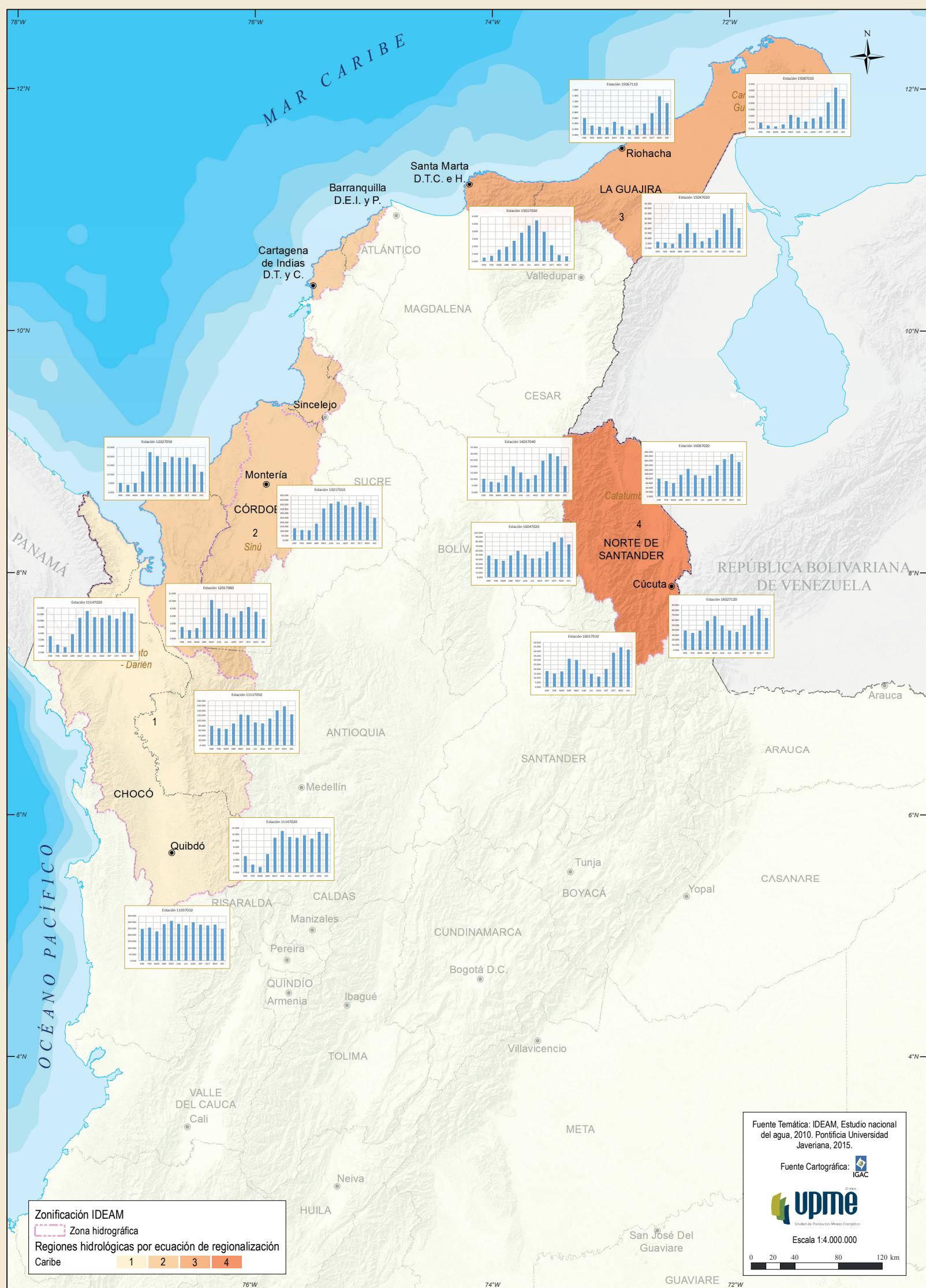
Mapa 3.9. Agrupación hidrológica Amazonas



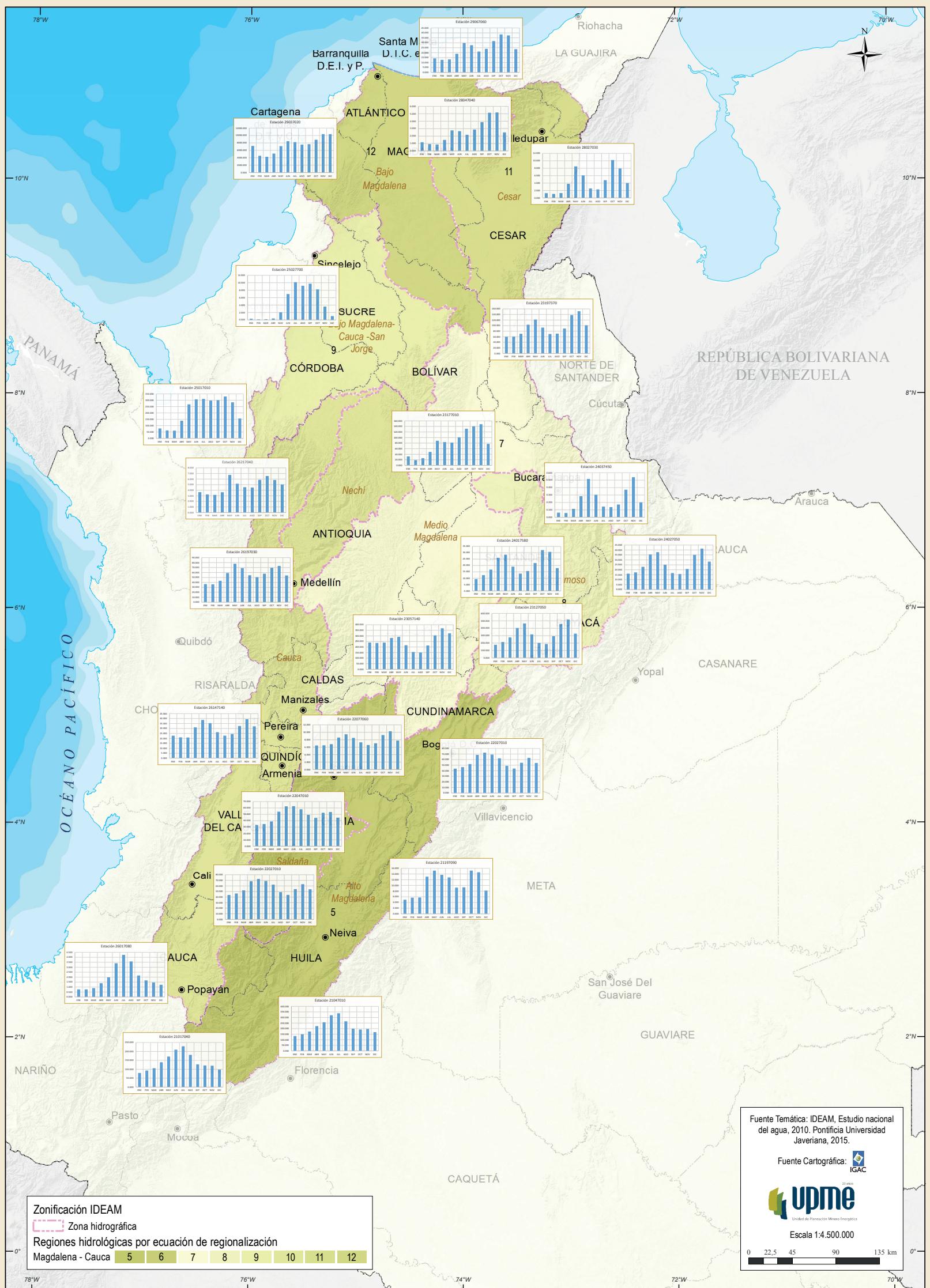


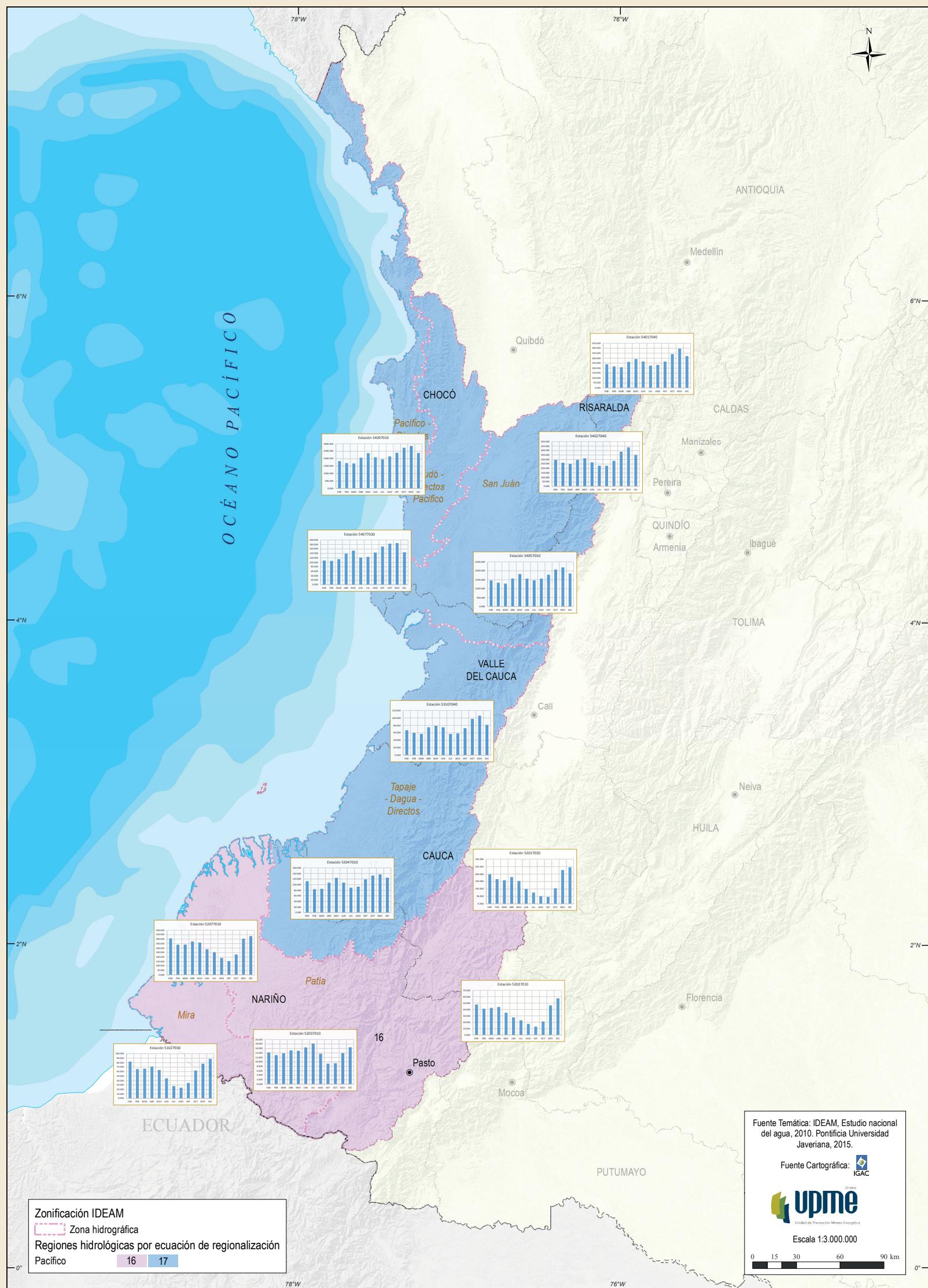
Mapa 3.11. Regiones hidrológicas



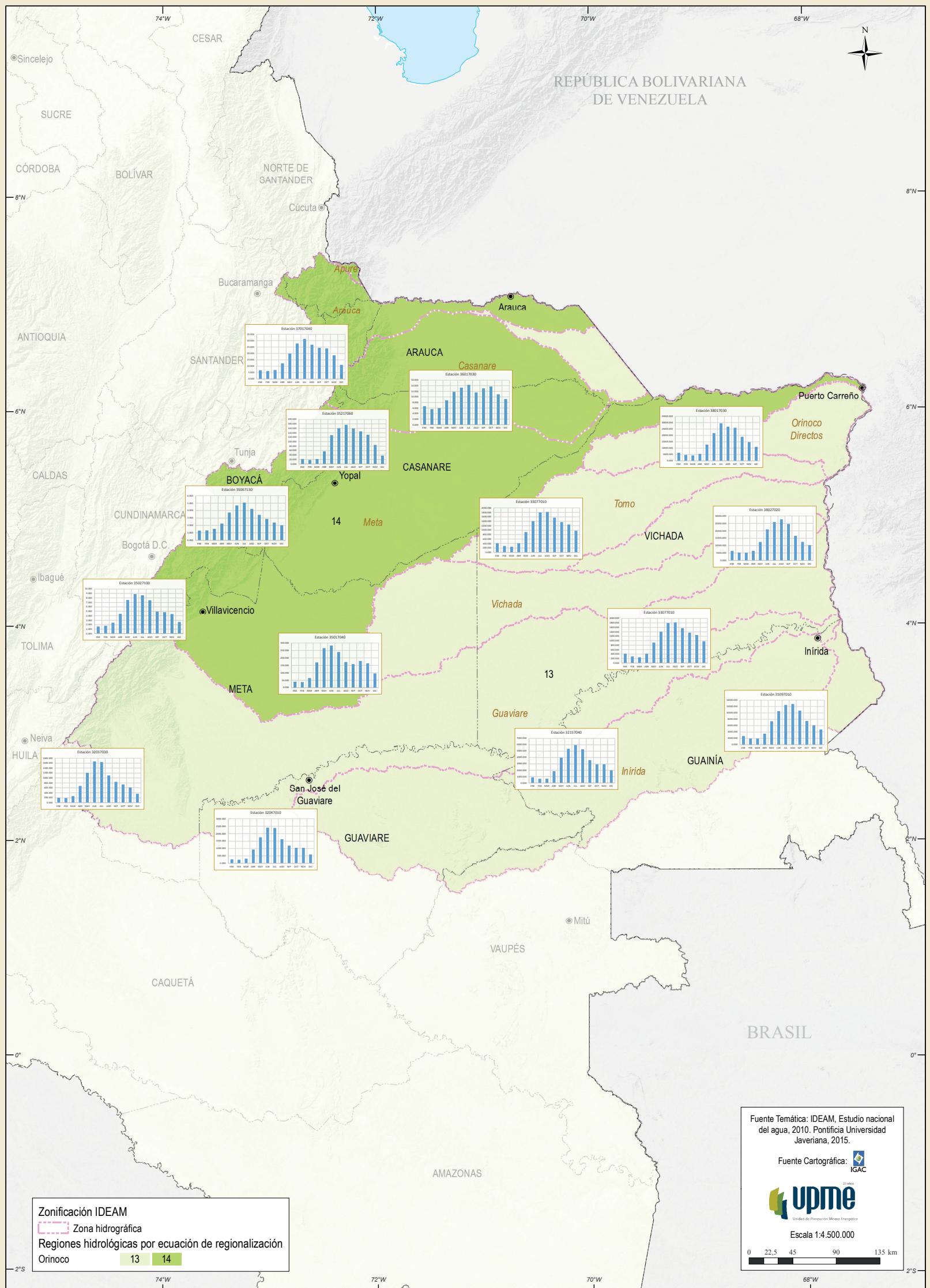


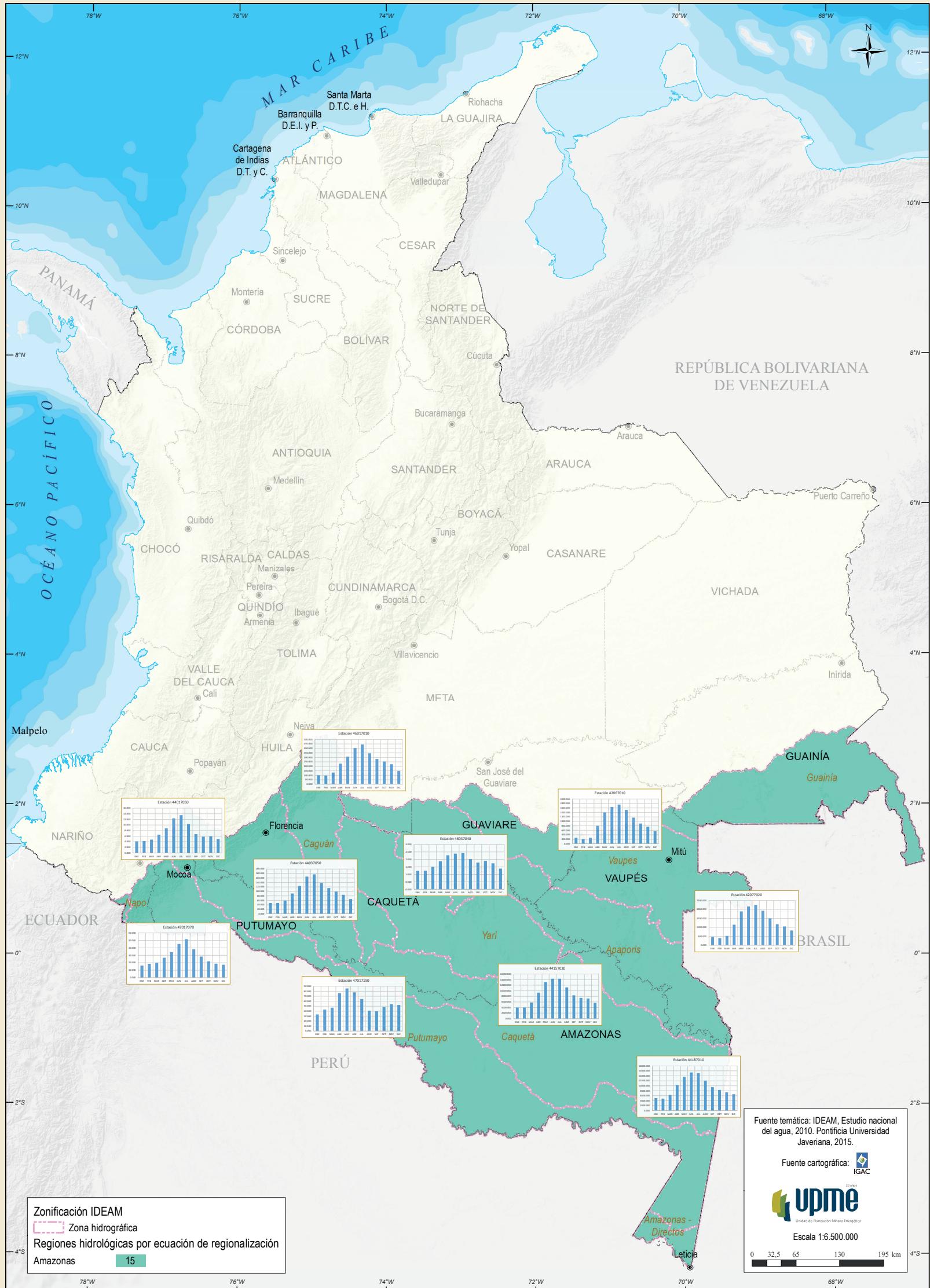
Mapa 3.13. Histograma de caudal Caribe





Mapa 3.15. Histograma de caudal Pacífico

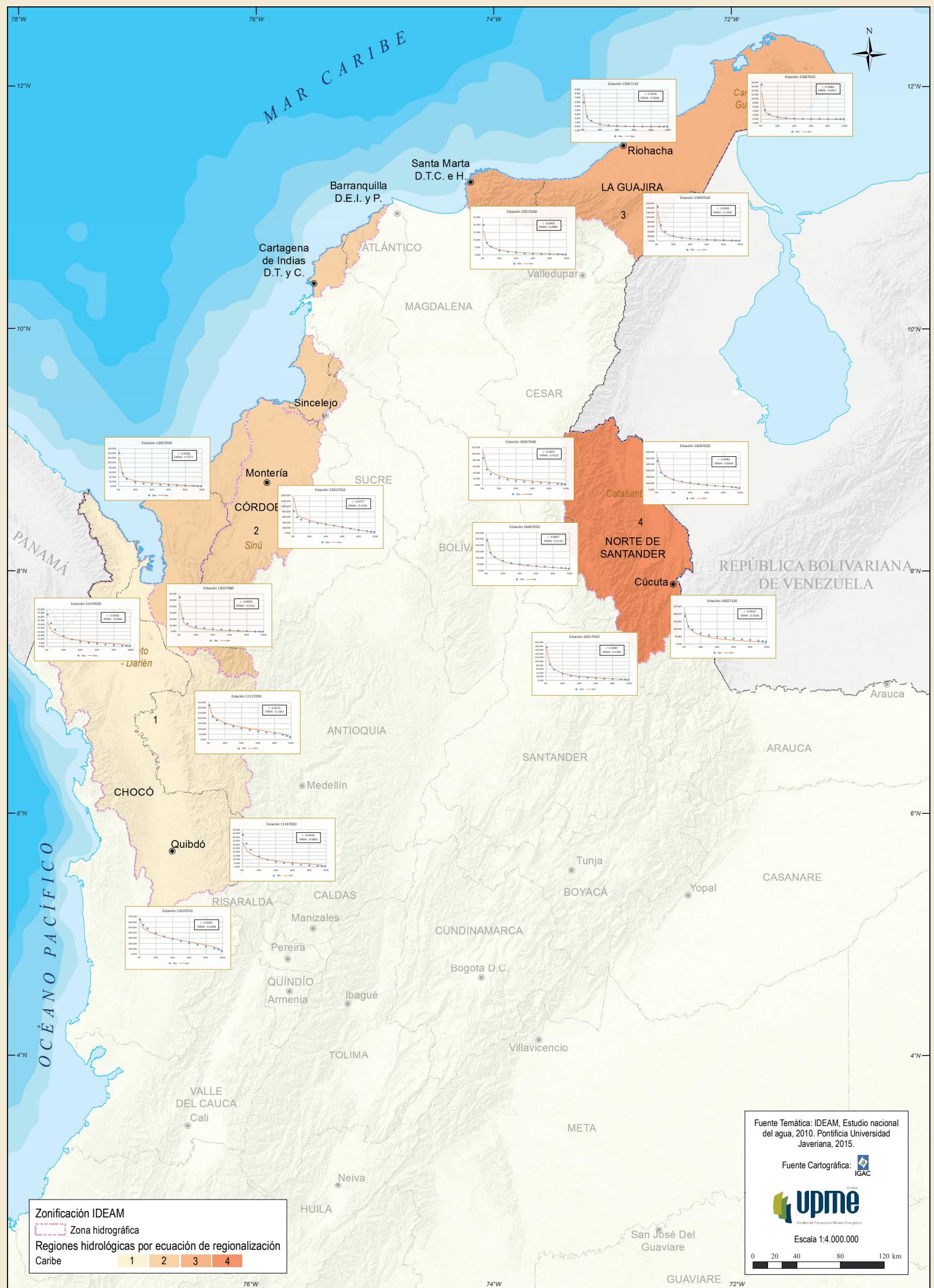


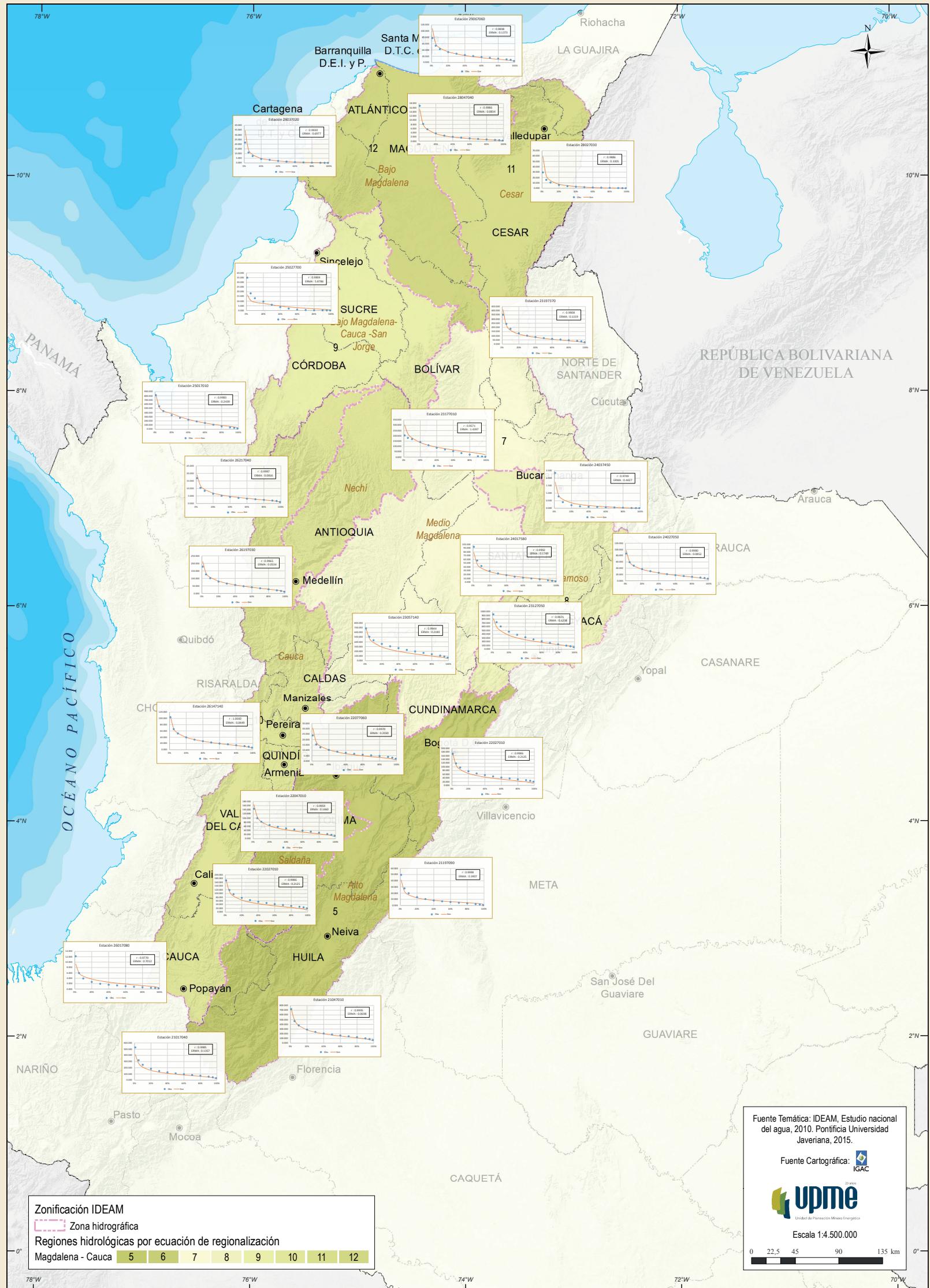






Mapa 3.19. Curva de duración de caudal por zona hidrográfica IDEAM





Mapa 3.21. Curva duración de caudal Magdalena-Cauca

