

TESIS DOCTORAL
Programa de Doctorado en Ciencia
y Tecnología Ambiental

La Coruña
Septiembre de 2017

Directores:
Marta del Carmen París,
Oscar Carlos Duarte y
Antonio Paz González

Tutor:
Antonio Paz González

Regionalización hidrológica con métodos estadísticos multivariados

**GRACIELA VIVIANA
ZUCARELLI**

UNL



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Regionalización hidrológica con métodos estadísticos multivariados

Autora: Graciela Viviana Zucarelli

Tesis doctoral UDC / Año 2017

Directores: Marta del Carmen Paris

Oscar Carlos Duarte

Antonio Paz González

Tutor: Antonio Paz González

Programa de Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Programa Oficial de Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental

Tesis Doctoral

**Regionalización hidrológica con métodos
estadísticos multivariados**

Graciela Viviana Zucarelli

Abril 2017



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Dña. Marta del Carmen PARIS, Profesora de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral (UNL), Argentina, **D. Oscar Carlos DUARTE**, Profesor de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER), Argentina, y **D. Antonio PAZ GONZÁLEZ**, Catedrático del Área de Edafología y Química Agrícola de la Universidade da Coruña (UDC)

CERTIFICAN

Que la presente memoria titulada “**Regionalización hidrológica con métodos estadísticos multivariados**”, que para optar al grado de Doctor por la Universidade da Coruña presenta **Dña. Graciela Viviana ZUCARELLI**, ha sido realizada bajo nuestra dirección y supervisión dentro del Programa Oficial de Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental.

Considerando que constituye trabajo de Tesis Doctoral, autorizamos su presentación.

Y para que así conste, firmamos el presente certificado en A Coruña, a 24 de abril de 2017.

Fdo.: Marta del Carmen Paris

Fdo.: Oscar Carlos Duarte

Fdo.: Antonio Paz González

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas con las que quiero compartir este momento de mi vida. Son muchas las personas a las que quiero agradecerles por haberme ayudado, con palabras, con aliento, con amor, para que esta tesis llegue a su fin.

Agradezco a mi mamá, Celia, por ser madre y amiga, por estar siempre presente y por ser incondicional. Muchos logros en mi vida hubieran sido imposibles sin su ayuda.

Agradezco con todo el corazón a mis hijos Sebastián, Magalí y Leonardo. Ellos son la razón de mi vida y les pido disculpas por el tiempo que les robé para estudiar y trabajar. Creo que no fue en vano.

A mi familia, a los amigos de la vida, a los compañeros de trabajo. No hace falta nombrarlos porque son muchos y cada uno sabe el lugar que ocupa en mi corazón...

Un agradecimiento especial a mis directores Marta del Carmen Paris, Oscar Carlos Duarte y Antonio Paz González.

En especial a Marta, por sus consejos, por su conocimiento, por su apoyo, por su orientación y amistad, fundamentales para llegar a esta instancia.

A todos ellos ¡Gracias!

En memoria de mi padre, Raúl Zucarelli

y de mi maestro, Eduardo Ceirano.

Lamentablemente se fueron demasiado pronto...

RESUMEN

El agua constituye un recurso escaso, sea por su calidad, por su cantidad o por su ocurrencia. Pero a la vez, las condiciones de exceso dan lugar a situaciones críticas de riesgo hídrico, sea por aumento de la amenaza hidrológica, de la vulnerabilidad social, o de ambas. Ello requiere que se establezcan estrategias de gestión adecuadas para garantizar su utilización eficiente y racional.

Dado que la cuenca hidrográfica es usualmente considerada como unidad de gestión de los recursos hídricos comprometidos en la misma, la identificación de regiones hidrológicamente homogéneas es un aspecto que merece ser tenido en cuenta a la hora de realizar estimaciones de aquellas variables hidrológicas involucradas en el planteamiento de estrategias de gestión (como caudales de diseño, eventuales escenarios de regulación, proyecto de obras y capacidad de los cursos de agua, entre otros) y contemplar la heterogeneidad de ambientes presentes dentro de esta unidad de gestión.

El término regionalización se utiliza en Hidrología para denominar la transferencia de información de un sitio a otro dentro de un área de comportamiento hidrológico semejante. Así, se emplea la regionalización para obtener información hidrológica en sitios sin datos o con poca información. El principio de la regionalización es la similitud espacial de algunas funciones, variables y parámetros que permiten esa transferencia. Un beneficio adicional del análisis regional de la información es su contribución al mejoramiento de una red de observaciones de datos hidroclimáticos, a medida que la metodología explora la información disponible e identifica vacíos.

El objetivo de la investigación desarrollado en este trabajo de Tesis fue determinar qué variables resultan significativas para delimitar regiones hidrológicas homogéneas aplicando métodos estadísticos multivariados. Se han considerado para el análisis la información disponible en cuencas hidrográficas de Perú y se ha realizado un análisis comparativo con la cuenca del río Uruguay. Los resultados logrados señalan la conveniencia de utilizar conjuntamente varios métodos multivariados y el uso de las curvas de Andrews para la identificación e interpretación de las regiones definidas. El área de aporte, la precipitación, la longitud del cauce y el caudal resultaron ser las características físicas y variables hidrológicas de mayor significación en la diferenciación de las regiones hidrológicas homogéneas.

RESUMO

A auga é un recurso escaso, xa sexa pola súa calidade, cantidade ou pola súa presenza. Por outra banda, as condicións de exceso poden provocar situacións críticas de risco hídrico, ben sexa polo aumento da ameaza hidrolóxica, da vulnerabilidade social, ou de ambas. Isto require establecer estratexias de xestión axeitadas para asegurar o seu uso eficiente e racional.

Xa que a conca hidrográfica é xeralmente considerada como unha unidade de xestión dos recursos hídricos comprometidos na mesma, a identificación de zonas hidrolóxicamente homoxéneas é un aspecto que debe ser tido en conta ao estimar variables hidrolóxicas implicadas na planificación de estratexias de xestión (como caudais de deseño, eventuais escenarios de regulación, proxectos de obras e capacidade dos cursos de auga, entre outros) e contemplar a heteroxeneidade dos ambientes actuais dentro desa unidade de xestión.

O termo rexionalización é utilizado en Hidroloxía para describir a transferencia de información dun lugar a outro dentro dunha área de comportamento hidrolóxico similar. Deste xeito, a rexionalización é utilizada para obter información hidrolóxica en sitios sen datos ou con pouca información. O principio de rexionalización é a similaridade espacial dalgunhas funcións, variables e parámetros que permiten tal transferencia. Un beneficio adicional da análise rexional da información é a súa contribución á mellora da rede de observacións de datos hidroclimáticos a medida que a metodoloxía explora a información dispoñible e identifica lagoas.

O obxectivo da investigación desenvolvida nesta tese foi determinar as variables que son importantes para delimitar rexións hidrolóxicas homoxéneas, aplicando métodos estatísticos multivariados. Considerouse para a análise a información dispoñible en concas hidrográficas do Perú e realizouse unha análise comparativa coa conca do Río Uruguai. Os resultados obtidos indican a adecuación do uso conxunto de varios métodos multivariados e das curvas de Andrews para a identificación e interpretación das rexións definidas. A área de aporte, a precipitación, a lonxitude do cauce e o caudal resultaron ser as características físicas e variables hidrolóxicas máis significativas na diferenciación de rexións hidrolóxicas homoxéneas.

ABSTRACT

Water is a scarce resource, either because of its quality, quantity or its occurrence. But at the same time, the conditions of excess give rise to critical situations of water risk, either by increasing the hydrological threat, social vulnerability, or both. This requires that appropriate management strategies be put in place to ensure their efficient and rational use.

The hydrographic basin is usually considered as a unit of water resources management. For that, the hydrological homogeneous zones identification should be taken into account in the estimation of those hydrological variables involved in the management strategies approach (design flows, scenarios, project works and water course capacity, among others) and to contemplate the heterogeneity of the environments within this management unit.

The term regionalization is used in hydrology to refer to the transfer of information from one site to another within an area of similar hydrological behavior. Thus, regionalization is used to obtain hydrological information in sites with no data or little information. The principle of regionalization is the spatial similarity of some functions, variables and parameters that allow such transfer. An additional benefit of regional information analysis is its contribution to the improvement of a network of hydroclimatic data observations, as the methodology explores the available information and identifies gaps.

The objective of this research was to determine which variables are significant for delimiting homogeneous hydrological regions by applying multivariate statistical methods. The information available in the watersheds of Peru has been considered for the analysis and a comparative analysis has been carried out with the Uruguay River basin. The results obtained indicate the convenience of using several multivariate methods together and the use of Andrews' curves for the identification and interpretation of the defined regions. The area, precipitation, channel length and flow were the most important physical and hydrological variables in the differentiation of homogeneous hydrological regions.

ÍNDICE

Introducción.....	1
Objetivos.....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos	3
Antecedentes en el tema	4
Características generales de las cuencas en estudio	7
Cuencas hidrográficas de Perú	7
Cuencas del río Uruguay	9
Metodología.....	12
Regionalización hidrológica.....	12
Métodos estadísticos multivariados y curvas de Andrews	20
Datos y procedimientos metodológicos empleados	23
Resultados y discusión	40
Regionalización en Cuencas hidrográficas de Perú.....	40
Regionalización en Cuencas del río Uruguay.....	68
Conclusiones y consideraciones finales	74
Referencias bibliográficas	76

INTRODUCCIÓN

El agua constituye un recurso cada vez limitado, sea por su calidad, por su cantidad o por su ocurrencia. Pero a la vez, las condiciones de exceso dan lugar a situaciones críticas de riesgo hídrico, sea por aumento de la amenaza hidrológica, de la vulnerabilidad social, o de ambas. Ello requiere que se establezcan estrategias de gestión adecuadas para garantizar su utilización eficiente y racional.

Para concretar dicha meta es indispensable conocer las particularidades de los sistemas hídricos que comprende el área. Sin embargo, la escasez de información, la falta de registros de datos históricos de variables hidroambientales son situaciones frecuentes, que se agravan fundamentalmente por la poca cantidad de cuencas aforadas, la discontinuidad de las series y la confiabilidad de los datos disponibles, en términos de incertidumbre y representatividad.

Por otra parte, uno de los mayores desafíos en Hidrología es el de conocer adecuadamente los fenómenos hidrológicos. La cuantificación de dichos procesos depende de las mediciones de las variables hidrológicas que se observan a lo largo del tiempo. Estas variables poseen comportamiento estocástico y necesitan de muestras confiables y representativas para su estimación. Ningún modelo o técnica matemática o estadística es capaz de generar información; éstas constituyen herramientas para explorar mejor las informaciones existentes.

Por ello, la identificación de regiones hidrológicamente homogéneas es un aspecto que merece ser tenido en cuenta a la hora de realizar estimaciones de aquellas variables hidrológicas involucradas en el planteamiento de estrategias de gestión (como caudales de diseño, eventuales escenarios de regulación, proyecto de obras y capacidad de los cursos de agua, entre otros).

El término regionalización se utiliza en Hidrología para denominar la transferencia de información de un sitio a otro dentro de un área de comportamiento hidrológico semejante (Tucci, 2002). Así, se emplea la regionalización para obtener información hidrológica en sitios sin datos o con poca información. El principio de la regionalización es la similitud espacial de algunas funciones, variables y parámetros que permiten esa transferencia. Un beneficio adicional del análisis regional de la información es su contribución al

mejoramiento de una red de observaciones de datos hidroclimáticos, a medida que la metodología explora la información disponible e identifica vacíos.

En este trabajo de Tesis se busca destacar la importancia de la regionalización a partir de la aplicación de técnicas estadísticas en dos áreas de trabajo: una con gran cantidad de información y otra con poca. En ambos casos, las técnicas de regionalización se emplearán para encontrar las variables que tienen mayor incidencia en la determinación de regiones homogéneas.

OBJETIVOS

Se plantea como hipótesis que del conjunto de variables y parámetros que caracterizan la respuesta hidrológica de una cuenca, hay algunas que son significativamente importantes para diferenciar regiones con comportamiento hidrológico semejante.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo de esta investigación es determinar qué variables resultan significativas para delimitar regiones hidrológicas homogéneas aplicando métodos estadísticos multivariados.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos se han planteado:

- Realizar una evaluación de los métodos de análisis estadístico de agrupamiento, análisis factorial por componentes principales y curvas de Andrews, reconociendo las particularidades requeridas para su aplicación e interpretación de resultados.
- Definir regiones hidrológicas homogéneas a partir de la información disponible en las cuencas hidrográficas de Perú y realizar un análisis comparativo en la cuenca del Río Uruguay.
- Formular recomendaciones para la medición sistemática y rigurosa de las variables, características físicas y parámetros que resulten significativos.

ANTECEDENTES EN EL TEMA

El propósito principal de la regionalización hidrológica es la transferencia de información de las cuencas aforadas a las no aforadas, de una misma región hidrológica (Tucci, 1987; Franchini y Suppo, 1996). Esta discretización espacial se realiza frecuentemente teniendo en cuenta las características geomorfológicas y climáticas —que definen la respuesta hidrológica de la región— y puede resultar incluso en zonas sin continuidad geográfica, aunque su comportamiento hidrológico sea semejante (Andrade y Hawkins, 2000).

Son numerosas las investigaciones de diferentes autores para identificar regiones homogéneas haciendo análisis regional de precipitaciones y de caudales. Puede citarse a Tucci, 1991; Busch *et al.*, 1999; Heredia-Calderón y Siccardi, 1999; Peschke *et al.*, 1999; 2001; Batima, 2002; Mesa Sánchez *et al.*; 2002; entre otros.

Gómez Martínez y Orozco (2004), presentan modelos regionales para la estimación de los caudales asociados a diferentes períodos de retorno en cuencas sin datos de aforos. Emplearon para ello correlación múltiple entre el área de la cuenca, la longitud, la pendiente del cauce principal y la precipitación media anual en el Golfo de México.

Versiani y de Melo (2001) utilizan el método de regionalización TCEV (Two Component Extreme Value) a los efectos de determinar la heterogeneidad espacial y temporal de las precipitaciones máximas en Minas Gerais (Brasil), logrando un buen ajuste del método en algunas estaciones en particular y permitiendo detectar la presencia de valores anómalos (*outliers*).

Brandizi *et al.* (2011) realizaron un trabajo cuyo objetivo es evaluar un procedimiento para estimar las anomalías trimestrales de la lluvia en sitios del sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). Se basa en la combinación de un ensamble de simulaciones de modelos globales de la circulación general de la atmósfera y la aplicación de modelos estadísticos para la regionalización de la lluvia.

La literatura presenta además, trabajos de regionalización de tormentas de diseño (Cortez Ledesma; 2003; Zamanillo *et al.*, 2009); de curvas intensidad-duración-recurrencia (Vélez *et al.*, 2002) y curvas de permanencia de caudales (Zucarelli *et al.*, 2003).

López *et al.* (2011) desarrollaron una metodología paramétrica regional para la estimación de curvas de duración de caudales sintéticas en sitios sin observaciones en la región comprendida por las provincias de Catamarca y La Rioja (Argentina). El análisis

de series de caudales medios mensuales observadas en nueve cuencas permitió seleccionar el modelo matemático que mejor describe las curvas de duración de caudales de la región. Los parámetros de este modelo se relacionaron con características morfológicas y climáticas de las cuencas mediante modelos regionales de regresión. De igual manera, Euclides et al. (2001) describen los estudios realizados para la obtención de metodologías que permitan la estimación de las potencialidades y disponibilidades de los recursos hídricos en cualquier curso de agua de la región del Alto San Francisco en el estado de Minas Gerais (Brasil). La metodología se basa en la regionalización de caudales máximos, mínimos, medios y en la curva de permanencia de caudales.

Uno de los aspectos más importantes al hacer la regionalización es la selección de las variables, tal como lo presentan Dinpashoh et al. (2004); que, a partir de 57 variables iniciales, seleccionaron 12 variables, que permitieron hacer una regionalización climática. Usaron para ello la información de 77 estaciones de Irán que poseían información meteorológica del período 1956 a 1998.

Así es como Clarke y Brusa (2002), proponen el uso de técnicas de regionalización para estimar el caudal medio anual en cuencas no aforadas basado en una ecuación de regresión múltiple a partir de datos en estaciones cercanas. Los autores encontraron que, de las principales variables que intervienen en dichas relaciones, el área es la más importante. Loebis et al. (2002), usan los Sistemas de Información Geográfica para estimar el escurrimiento en diversas cuencas, a partir de datos de precipitación y de la topografía.

El uso de métodos estadísticos multivariados como Análisis de Componentes Principales (ACP) ha sido empleado para la definición de regiones homogéneas, tal como lo demuestran numerosos autores. Mallants y Feyen (1990), investigan el patrón de distribución espacial de la precipitación sobre la cuenca de IJzer en el este de Bélgica y norte de Francia, usando la precipitación diaria. Mediante ACP y curvas de Andrews, Álvarez Olguín et al. (2011) identificaron 17 subcuencas para las que cuantificaron 20 variables climáticas y fisiográficas potencialmente útiles en la predicción de caudales.

De igual manera, Chiang et al. (2002) proponen un esquema de regionalización hidrológica en cuencas aforadas, utilizando el Análisis de Agrupamiento (*cluster*) para clasificar 94 subcuencas en 6 regiones homogéneas. El estudio se hizo para cuencas de Alabama, Georgia y Mississippi (Estados Unidos), con resultados satisfactorios.

Por su parte, Benavente Herrera et al. (1984) expresan que el ACP representa una herramienta de gran utilidad descriptiva, al simplificar apreciablemente la estructura original de los datos y permitir visualizar, en una única representación, las características principales de una red fluvial. También constituye un método efectivo para establecer grupos de características homogéneas, relacionables con factores litológicos. Entraigas et al. (1994) utilizan el ACP para definir sectores de la cuenca alta y media del arroyo Azul (provincia de Buenos Aires, Argentina), con un comportamiento hidrológico similar, a partir de la consideración de variables edáficas, topográficas, hidrológicas, climáticas y biológicas.

Paris y Zucarelli (2004) destacan la importancia de la utilización conjunta de varios métodos estadísticos-matemáticos y su evaluación integrada con la caracterización conceptual del sistema para identificar regiones homogéneas en forma consistente. Utilizan para ello el agrupamiento en modo Q para lograr una primera aproximación en la clasificación del conjunto de datos y evaluación de sus similitudes; Análisis de Componentes Principales en el modo R como metodología complementaria en la definición de los grupos homogéneos a través de las marcas y posteriormente las curvas de Andrews para establecer el orden más adecuado de las variables involucradas. Oudin et al. (2008), demuestran que, para 913 cuencas de Francia, las que poseen una densa red de mediciones, la regionalización se logra usando métodos que tienen en cuenta la proximidad espacial.

Chávez, (2009) trabajó en la regionalización de caudales en el Puente Carrasquillo (Perú), y recomienda, para cuencas con relieve de llanura, trabajar con información detallada de topografía, que permite una correcta delimitación de las cuencas. Ganancias Martínez (2010), resalta, en sus conclusiones, que el el área de la cuenca no resulta siempre la característica fisiográfica más representativa de los caudales máximos que se registran a la salida de la misma. En ese sentido, sugiere buscar otras características fisiográficas y/o climatológicas.

Más recientemente, Tavakkoli y HashemHosseini (2014) utilizaron el Método de Ward para identificar regiones homogéneas, encontrando 4 variables significativas, sobre un total de 17 variables medidas.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO

Las áreas que serán objetos de estudio de esta investigación han sido seleccionadas en función de la información disponible. Se trata de las cuencas hidrográficas del Perú y la cuenca del río Uruguay. Esta última abarca territorio de Argentina, Brasil y Uruguay.

Se presentan en este capítulo las características más relevantes de las mismas, que sirven de base para la aplicación de las técnicas estadísticas multivariadas y la posterior interpretación de los resultados de la regionalización hidrológica.

CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE PERÚ

El informe Evaluación preliminar del potencial hidroeléctrico del Perú, elaborado en 2010 por el Ministerio de Energía y Minas (2010), hace una descripción detallada del clima y de las características físicas de las cuencas de dicho país. Con ello se ha elaborado la descripción sintética que se presenta en este apartado.

El territorio peruano puede dividirse en cuatro grandes regiones naturales (tres continentales y una marina). Las regiones continentales tradicionalmente se denominan “Sierra” y “Selva”.

El clima de la costa se caracteriza por ser húmedo, pero sin lluvias, es un clima desértico. Esta región litoral, limítrofe con el mar, presenta temperaturas que oscilan entre 12°C en el invierno y 30°C en el verano; pero hay diferencias entre la costa norte y la costa central y sur. El clima de la sierra es el más variado del país debido a la disminución de la temperatura con la altura, desde un promedio de 18°C en la parte baja de los valles hasta menos de 0°C en la parte alta. Presenta un rango de variación diurna muy grande entre 24°C a medio día y – 3°C en la noche. Por su parte, las condiciones climáticas de la selva son típicas de la región tropical y se caracterizan por tener mucha lluvia y ser muy cálido durante casi todo el año. Ocasionalmente se observan frentes fríos que proceden del sur del continente durante la estación del invierno, con una caída de la temperatura de 8°C a 12°C. La temperatura oscila entre 18°C y 36°C en promedio y la precipitación media anual oscila entre 1000 mm y 4000 mm. La Tabla 1 resume las características generales de las grandes regiones naturales.

Tabla 1. Características generales de las grandes regiones naturales de Perú

Región	Altitud	Temperatura Media Anual (°C)	Precipitación Media Anual (mm)
Costa	0 - 500	18 a 20	40
Sierra	500 – 6 780	8 a 11	600
Selva	400 – 1 000	24	3 000 a 4 000

Las cuencas hidrográficas existentes en la variada geografía del Perú, se desarrollan en tres vertientes, cuyas características hidrometeorológicas principales promedio se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características hidrometeorológicas de las distintas vertientes de Perú

Vertiente	Superficie (km²)	Precipitación media (mm)	ETP media (mm)	Esguerrimiento medio (mm) (Balance hídrico)
Pacífico	279 700	274	825	16
Atlántico	958 500	2 061	1 344	2 897
Lago Titicaca	47 000	813	590	139
Total	1 285 200			

El balance hídrico el estudio determina la disponibilidad de agua en las diferentes vertientes. La vertiente del Pacífico es la que presenta la mayor deficiencia de esguerrimiento superficial y el de mayor demanda de agua (debido a la mayor concentración de población, industria, y actividades agrícolas). En la vertiente del Atlántico sucede todo lo contrario, presentando la mayor disponibilidad de agua superficial.

El informe de referencia presenta la definición de 14 regiones, que se presentan en la Figura 1. Las regiones fueron determinadas teniendo en cuenta tanto las características topográficas, geomorfológicas, hidrometeorológicas, de suelos, cobertura, y la cantidad de estaciones de caudal disponibles en cada región.

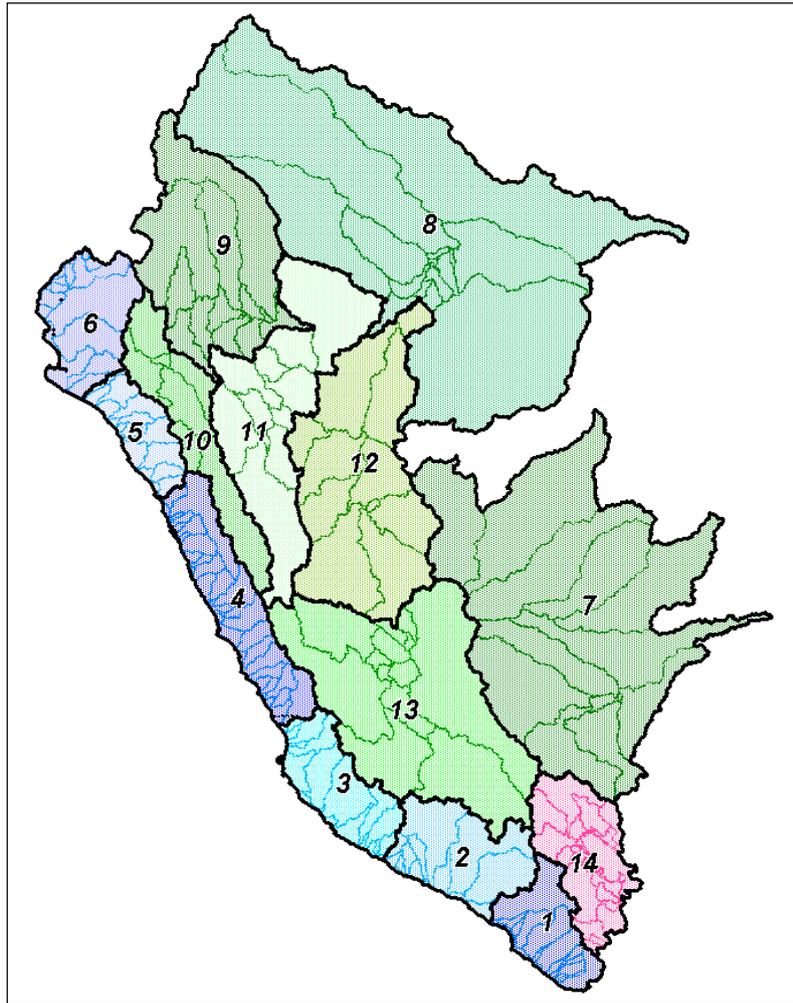


Figura 1. Cuencas de Perú.

Fuente: Ministerio de Minas (2010)

CUENCAS DEL RÍO URUGUAY

La Figura 2 presenta las cuencas del río Uruguay hasta la sección de Salto Grande (Argentina).

La información correspondiente a las cuencas del río Uruguay hasta Salto Grande fue obtenida del informe Modelación Hidrológica para el Proyecto PADE (EVARSA, 2007). La Tabla 3 muestra la precipitación media anual en algunas estaciones pluviométricas de la cuenca. La misma fue calculada con la serie de registros 1915-1969 aplicando polígonos de Thiessen para asignar el área de influencia de cada estación.

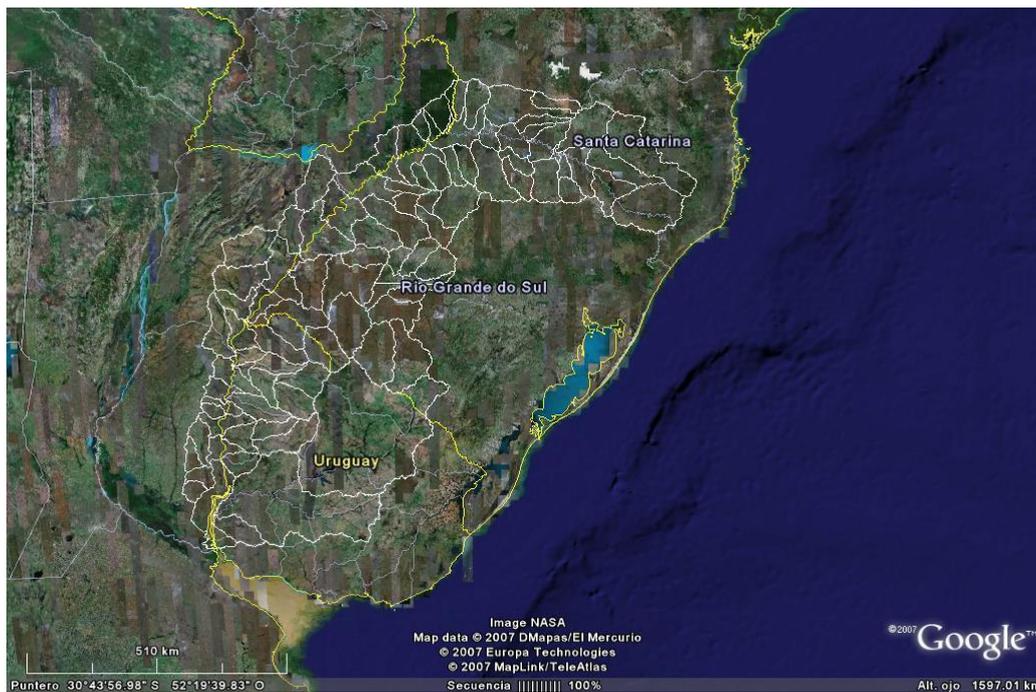


Figura 2. Cuencas del río Uruguay.

Fuente: EVARSA (2007)

Tabla 3. Precipitación media anual. Serie 1915-1969

Estación	Precipitación (mm)
Salto Grande	1 517
Monte Caseros	1 548
Paso de los Libres	1 597
Marcelino Ramos	1 360

A fin de realizar una caracterización del escurrimiento del Río Uruguay en la cuenca, se consideraron diferentes estaciones que poseían información suficiente y en un período simultáneo. A estos efectos, fueron seleccionadas las estaciones ubicadas en Marcelino Ramos, Paso de los Libres, Monte Caseros y Concordia. La Tabla 4 presenta los valores característicos de caudal medio mensual y lámina equivalente de agua en la cuenca para cada estación analizada y su área de aporte.

Tabla 4. Esgurrimiento del Río Uruguay hasta Concordia

Estación	Área (km²)	Caudal medio mensual (m³/s)	Lámina de agua (mm)
Marcelino Ramos	41 120	792	609
Paso de los Libres	193 928	3 543	596
Monte Caseros	220 794	3 898	560
Concordia	244 035	4 498	581

De la observación de la tabla se concluye que Paso de los Libres, Monte Caseros y Concordia poseen un régimen de escurrimiento semejante y diferente a la estación ubicada en Marcelino Ramos. Esto permite distinguir un régimen en la cuenca superior, con una sola crecida bien definida, en primavera y un régimen en la cuenca inferior, donde se presentan dos crecidas bien marcadas, una en otoño y otra en primavera.

METODOLOGÍA

REGIONALIZACIÓN HIDROLÓGICA

Tucci (2002) define como variable explicativa a aquellas variables que son usadas para estimar el valor de la variable regionalizada. Si se considera la siguiente expresión:

$$Y = F(X, Z, W) \quad (1)$$

Donde Y es la variable regionalizada; X, Z y W son variables que explican a la variable Y a través de una función F. La Tabla 5 presenta algunos ejemplos de variables empleadas en la regionalización.

Tabla 5. Ejemplos de variables de regionalización

Variable regionalizada	Variabes Explicativas
Caudal medio	Área de la cuenca, precipitación
Caudal medio de crecida	Área de la cuenca, precipitación, pendiente del curso principal, ancho del curso principal
Caudal mínimo	Área de la cuenca, densidad de drenaje
Tiempo de concentración	Área de la cuenca, pendiente, ancho del curso principal

El mismo autor menciona algunas consideraciones de las variables explicativas:

- Las variables explicativas deben ser fácilmente determinadas.
- Se deben evitar métodos indirectos para la determinación de las variables explicativas ya que ello introduce muchas incertidumbres.
- Muchas variables explicativas poseen fuerte correlación entre sí, de tal forma que la introducción de una nueva variable probablemente no aumentará la información.

Las principales variables que deberán considerarse son:

A continuación, se describen algunas de las variables que pueden ser usadas para regionalización, clasificándolas como (i) variables que dependen de las características fisiográficas de las cuencas y (ii) variables que dependen de las características climáticas.

(i) **Variables que dependen de las características fisiográfica de las cuencas**

El escurrimiento de una cuenca depende de dos grandes grupos de factores: climáticos y físicos. Los factores climáticos se relacionan básicamente con las precipitaciones y la evapotranspiración, mientras que entre los físicos se encuentran factores edáficos y geológicos, factores relativos a la cobertura vegetal, al tamaño de cuenca, su forma, relieve, densidad de drenaje y capacidad de almacenamiento de la misma (Tucci, 2002).

Las características físicas de la cuenca pueden ser utilizadas para hacer correlaciones con las variables hidrológicas, teniendo en cuenta que: la característica debe ser representativa de los fenómenos que se desean representar y dicha característica debe ser fácil de medir a partir de mapas.

Entre los factores físicos de una cuenca los más significativos son: a) área, b) perímetro, c) forma, d) elevación, e) pendiente, f) orientación y g) densidad de drenaje.

a) **Área:** usualmente es la característica más importante.

La clasificación de las cuencas en función de su tamaño, aunque subjetiva, puede ser como la que se indica en la Tabla 6 (Tucci, 2002).

Tabla 6. Clasificación de las cuencas según su tamaño

Área	Clasificación
$A < 100 \text{ km}^2$	Cuenca pequeña
$100 \text{ km}^2 < A < 500 \text{ km}^2$	Cuenca medianamente pequeña
$500 \text{ km}^2 < A < 2000 \text{ km}^2$	Cuenca mediana
$2000 \text{ km}^2 < A < 5000 \text{ km}^2$	Cuenca medianamente grande
$5000 \text{ km}^2 < A$	Cuenca grande

b) **Perímetro:** es la longitud del límite exterior de la cuenca y se utiliza en la caracterización de la forma de la misma.

c) **Forma:** afecta el tiempo de respuesta hidrológica de la misma.

En general se clasifica la forma como “alargada” o “circular”. Cada una presenta hidrogramas a la salida de la cuenca característicos. Sin embargo, se pueden presentar algunas situaciones particulares, como lo son las cuencas y ríos condicionados por formaciones tectónicas. Para caracterizar numéricamente la forma de la cuenca se han definido distintos índices.

Uno de los más usuales es el *Índice de compacidad K_c) o de Gravelius*, que se expresa como la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual superficie. Gravelius, en el año 1914 (Vich, 1999) intentó cuantificar la influencia de la forma de la cuenca a partir de un valor numérico; creando el índice de compacidad K_c , que relaciona el perímetro de la cuenca P_u con el perímetro de un círculo cuya área A_c es igual a la de la cuenca A_u . Su expresión es:

$$K_c = 0.28 \frac{P_u}{\sqrt{A_u}} \quad (2)$$

Cuando $K_c=1,0$ la cuenca posee la forma exacta de un círculo. Si es diferente a la unidad, indica una mayor irregularidad. Cuanto más alejado esté de 1,0, mayor será la deformación de la cuenca respecto del círculo de referencia de Gravelius.

Algunos rangos de variación de K_c son los siguientes:

1,00 < K_c < 1,25, la cuenca posee forma casi redonda a óvalo-redonda;

1,25 < K_c < 1,50, la cuenca posee forma óvalo-redonda a óvalo-oblonga;

1,50 < K_c < 1,75, la cuenca posee forma óvalo-oblonga a rectangular-oblonga.

d) Relación de Circularidad C : según cita Vich (1999), fue definida por Miller en 1953 como la relación entre el área de la cuenca A_u y la superficie de un círculo A_c que posee igual perímetro que el sistema en estudio. Analíticamente se expresa como:

$$C = \frac{4\pi A_u}{P_u^2} \quad (3)$$

Cuando $C=1,0$, la forma de la cuenca tiende a la del círculo. Para cuencas de primer y segundo orden de materiales homogéneos (esquistos y calizas) C varía entre 0,6 y 0,7.

e) Relación de Elongación E : fue propuesta por Schumm en 1956 y se define como el cociente entre el diámetro de un círculo de la misma área de la cuenca D y la mayor longitud de ella, L ; paralela al cauce principal. Se expresa como:

$$E = \frac{\sqrt{\frac{4A_u}{\pi}}}{L} \quad (4)$$

Las distancias L que se emplean varían de acuerdo a diferentes autores, ya que pueden ser la longitud media acumulada de los cauces L_1 , la cuerda L_2 y la longitud del cauce principal, proyectada hasta la divisoria L_3 .

Si el valor de E es cercano a 1,0, la forma de la cuenca se aproxima a un círculo. De acuerdo a Shuh Shiaw Lo, las cuencas con $E=1,0$ son de áreas de llanura, valores de E entre 0,6 y 0,9 indican un área de relieve acentuado. No obstante, sus valores se presentan entre 0,6 y 1,0 para una amplia variedad de regímenes climáticos y condiciones geológicas.

f) **Elevación:** las variaciones de elevación o altura, así como la altura media de una cuenca, son datos esenciales para los análisis de su temperatura y precipitación.

La mejor manera de analizar las variaciones de alturas en una cuenca es la curva hipsométrica, la cual suele decirse que representa el relieve de la misma. Dicha curva expresa el porcentaje de superficie de cuenca por encima de una determinada cota o altura. La integral de esta curva (volumen) dividida el área de la cuenca da como resultado la altura media de la misma.

El *Coefficiente de Masividad (CM)*, establecido por De Maronne (Vich, 1999), expresa la relación entre la altura media H_m y la superficie de la cuenca A_u . Dicho valor toma valores muy grandes para cuencas pequeñas que poseen grandes desniveles y toma valores muy pequeños para grandes cuencas de relieve poco acentuado. Su expresión es la siguiente:

$$CM = \frac{H_m}{A_u} \quad (5)$$

La *curva hipsométrica* se grafica con el porcentaje de área acumulada de cuenca en el eje de abscisas y en ordenadas pueden graficarse tanto la altitud ó la altitud relativa, también en términos porcentuales.

El *desnivel*: es la diferencia de cota entre el punto más alto de la cuenca y la sección de salida.

Existen otras características físicas que pueden utilizarse para hacer correlaciones con las variables hidrológicas, pero siempre considerando que la característica debe ser representativa de los fenómenos que se quiere representar y que la misma debe ser de fácil medición a partir de mapas.

g) **Pendiente media del curso principal:**

$$S_m = \frac{\sum l_i S_i}{L} \quad (6)$$

Donde l_i es la longitud del tramo i ; S_i es la pendiente del tramo i ; L es la longitud total del río; S_m es la pendiente media del río y N es el número de tramos en que se ha subdividido el río.

Un método simple muy utilizado para determinar la pendiente media, cuando existe poca información, es el que utiliza la altura del 10 % y del 85 % de la longitud del curso.

$$S_m = \frac{H(0.85 * L) - H(0.10 * L)}{0.75 * L} \quad (7)$$

En este caso $H(0,85 L)$ es la elevación del 85 % de la longitud total del río en el sentido de aguas arriba a aguas abajo y $H(0,10 L)$ es la elevación del 10 % del mismo río en la misma orientación.

e) **Densidad de drenaje:** es un buen indicador del relieve superficial de la cuenca y de sus características geológicas. Su expresión es la siguiente:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{A} \quad (8)$$

Donde L_i es la longitud del curso i , A es el área de la cuenca y N es la cantidad de cursos considerados.

Como se expresó anteriormente, las variables físicas presentan correlaciones entre sí. Generalmente el área de la cuenca y la longitud del río se relacionan a través de una ecuación de regresión de tipo potencial, de la siguiente forma:

$$L = a * A^b \quad (9)$$

Los coeficientes a y b pueden variar de acuerdo con al área de la cuenca. Algunos valores de estos coeficientes son presentados por la DNER (1990), para cuencas del Sistema del Río de la Plata, como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7. Coeficientes de la correlación entre área de la cuenca y longitud del cauce

Cuenca	a	b	R ²
Brasil	1,64	0,538	-
Río Uruguay	1,61	0,574	0,86
Afluentes Río Paraguay	0,49	0,668	0,82
Río Paraguay	1,76	0,514	0,98

Según cita Tucci (2002), Hack indica que si existe similitud geométrica, a medida que la cuenca aumenta su tamaño, el exponente tiende a 0,50. Por otra parte la relación entre el área de la cuenca y la pendiente, posee, generalmente una correlación dispersa. La pendiente aumenta con la disminución del tamaño de la cuenca. Sin embargo, esta tendencia no ocurre para cuencas de áreas menores, ya que estas cuencas tienden a poseer un planalto en la parte superior, gran pendiente en la parte media y baja pendiente en el tramo inferior (Tucci, 2002). En cambio, la relación entre el nivel (H) y la longitud del río (L) se utiliza para conocer la velocidad del río, que depende de H. El valor de H, a su vez, involucra el valor de la pendiente del cauce. Para cuencas de Brasil, la DNER (1990), presenta una relación del tipo:

$$H = 50 * \sqrt{L} \quad (10)$$

Donde H está en km y H en m. El desvío de esa ecuación es grande, lo que indicaría que la relación sólo puede utilizarse como un indicativo de la relación.

h) Tiempo de concentración: se refiere al tiempo de viaje que requiere la partícula de agua localizada en el punto hidrológicamente más alejado de la cuenca para alcanzar la sección de salida de la misma. Existen numerosas fórmulas para determinar el tiempo de concentración, en función de las características físicas de la cuenca, de su ocupación y de la intensidad de la lluvia (Zucarelli y Morresi, 2004). Una de las más usadas es la Kirpich (1940):

$$t_c = 0.0078 \cdot L^{0.77} \cdot S^{-0.385} \quad (11)$$

donde L es la longitud del canal desde aguas arriba a la salida, en pies y S es la pendiente promedio de la cuenca.

(ii) **Variables que dependen de las características climáticas de las cuencas**

Algunas de las variables que pueden ser utilizadas en la regionalización, son las siguientes: *a)* precipitación, *b)* evapotranspiración potencial, *c)* caudal.

a) Precipitación: la precipitación es una de las principales variables explicativas. Se debe analizar cuál es el tipo de precipitación que va a ser utilizada en el estudio de regionalización. Generalmente la más utilizada es la precipitación media anual y la precipitación máxima. La precipitación media anual generalmente se regionaliza a través de las líneas isohietas. Para la determinación de esta variable es necesario disponer de un número representativo de estaciones pluviométricas, La precipitación máxima está relacionada con una duración de ocurrencia. Como la mayoría de las estaciones pluviométricas no poseen instrumentos registradores, la precipitación máxima que generalmente se utiliza es la de 1 día de duración. La variable explicativa que puede ser utilizada en este caso es la precipitación máxima media anual.

b) Evapotranspiración potencial: La evapotranspiración potencial es una variable que presenta relativa incertidumbre en su determinación, debido a la poca cantidad de estaciones meteorológicas que la estiman y a la imprecisión de los métodos utilizados en su cálculo.

c) Caudal: La mayoría de las veces, la variable más utilizada es el caudal medio de largo período o caudal medio, que está definida como la media de los valores de caudal de la serie disponible en un determinado sitio de medición. Sin embargo, pueden utilizarse otros valores de caudal, como el caudal máximo, caudal mínimo, caudal asociado a diferentes períodos de retorno, etc.

Tucci (2002) menciona a los indicadores regionales como elementos a ser considerados en la regionalización. Un indicador regional es un valor medio de una variable o una proporción entre variables hidrológicas. Las variables dependen de la magnitud de la cuenca y varían dentro de la misma. De esa forma, la relación entre las variables, de forma adimensional, caracteriza un indicador que tiene menor variabilidad y permite su uso con mayor eficiencia.

Algunos de estos indicadores son el caudal específico medio, relaciones que se obtienen a partir de la curva de permanencia de caudales e índices de creciente y el de caudal mínimo, etc.

El *Caudal específico medio* es el caudal específico medio como el caudal por unidad de área, tal como se observa en la siguiente expresión:

$$q = \frac{Q_m}{A} \quad (12)$$

Donde q es el caudal específico (l/s.km²); Q_m es el caudal medio de largo período (m³/s) y A es el área de la cuenca (km²).

Por otra parte, a partir de la curva de permanencia de caudales se pueden establecer relaciones definidas por las siguientes expresiones:

$$rcp_{95} = \frac{Q_{95}}{Q_m} \quad (13)$$

$$rcp_{50} = \frac{Q_{50}}{Q_m} \quad (14)$$

Donde Q₉₅ y Q₅₀ es el caudal del 95% y del 50% de la curva de permanencia de caudales (m³/s). El caudal del 95% de la curva de permanencia es un valor característico del comportamiento de la cuenca en estiaje y el caudal medio es una síntesis de todos los caudales a lo largo del tiempo. La relación entre las dos representa el caudal natural y el caudal máximo potencialmente regularizable.

Existen dos índices para valorar las crecientes. Esos son el r_{mc} y r₁₀₀, cuyas expresiones son las siguientes:

$$r_{mc} = \frac{Q_{mc}}{Q_m} \quad (15)$$

Donde r_{mc} relaciona el caudal medio de creciente y el caudal medio de largo período en un determinado sitio. El caudal medio de crecidas es un indicador de las crecidas, pues representa el caudal correspondiente a un tiempo de retorno del orden de 2 años. Por otra parte, Q₁₀₀, es el caudal correspondiente a un período de retorno de 100 años, que representa, generalmente, el límite de inundación ribereña. Relacionando este valor con el caudal medio de largo período, se obtiene el índice r₁₀₀, cuya expresión es la siguiente:

$$r_{100} = \frac{Q_{100}}{Q_m} \quad (16)$$

En tanto que dentro de los índices de caudal mínimo se pueden establecer $r_{7,10}$ y r_m , cuyas expresiones son las siguientes:

$$r_{7,10} = \frac{Q_{7,10}}{Q_m} \quad (17)$$

$$r_m = \frac{Q_{95}}{Q_{7,10}} \quad (18)$$

Donde $Q_{7,10}$ corresponde al caudal de 7 días de duración con un período de retorno de 10 años y la relación identifica la variabilidad entre el caudal medio y un caudal mínimo característico. Por otra parte, r_m relaciona las dos condiciones usualmente utilizadas de caudal mínimo, donde Q_{95} caracteriza una situación de permanencia, $Q_{7,10}$ indica una condición de estado mínimo.

MÉTODOS ESTADÍSTICOS MULTIVARIADOS Y CURVAS DE ANDREWS

Según expresa Paris (2010), los métodos estadísticos adquieren gran importancia en el manejo de datos hidrológicos debido fundamentalmente a su capacidad de optimización y síntesis en la generación de información. Además, al considerar numerosas variables, el problema en estudio presenta una múltiple referenciación y/o se conforman bases de datos de gran tamaño. Esta situación implica la necesidad de adoptar un enfoque multivariado para el procesamiento y análisis, ya que de lo contrario, sólo se realizaría la interpretación circunscripta e independiente de cada una de estas variables.

Métodos como el análisis de agrupamiento, análisis factorial, componentes principales y análisis de correspondencias, están dirigidos a la identificación de asociaciones o grupos de entidades similares, contemplando las particularidades de los datos observados (diferentes escalas de medida, unidades, órdenes de magnitud, etc.). Por otra parte, las diferentes alternativas de representación de los resultados obtenidos (dendrogramas, diagramas de cargas, distribución espacial de las marcas, curva de Andrews, etc.) facilitan la interpretación de los mismos.

Si bien existen diferentes estrategias para el tratamiento de los datos, la elección de alguna de ellas depende de: *i*) las interrelaciones entre las variables; *ii*) las preferencias del investigador y *iii*) la aplicación del principio de la parsimonia, donde la simplicidad de la interpretación es un aspecto primario (Brown, 1998). En todos los casos, la caracterización conceptual preliminar del problema a analizar, el examen y la preparación

de los datos básicos que se utilizarán en el tratamiento multivariado es una etapa importante, que incluye: la selección de las variables, el tratamiento previo o transformación de los datos y el análisis primario de las relaciones entre variables u observaciones, que permite no sólo fundamentar la elección del tipo de método a utilizar, sino también colabora en la posterior interpretación de los resultados.

En esta investigación, teniendo en cuenta además, que los datos n -dimensionales pueden ser representados como puntos en un espacio n -dimensional (y del mismo modo con las m observaciones), Andrews (1972) propuso un método simple y útil para representar gráficamente datos multidimensionales en sólo dos dimensiones.

De acuerdo con ello, en cada sitio de registro o punto de observación es posible definir una función armónica en donde los coeficientes que afectan a las funciones seno y coseno, y el término constante son definidos por los valores cuantificados para las n variables. Esto deriva en una expresión como la siguiente:

$$f_x(t) = \frac{X_1}{\sqrt{2}} + X_2 \text{sen}(t) + X_3 \cos(t) + X_4 \text{sen}(2t) + X_5 \cos(2t) + \dots \quad (19)$$

donde X_1, X_2, \dots, X_n , son las variables cuantificadas en cada sitio, t varía en el intervalo $-\pi$ y π .

En forma general, la expresión (1) puede escribirse de la siguiente manera:

$$f_x(t) = \frac{X_1}{\sqrt{2}} + \sum_{i=1}^{m1} X_{2i} \text{sen}(it) + \sum_{i=1}^{m2} X_{2i+1} \cos(it) \quad (20)$$

donde:

$$m1 = \frac{n-1}{2} = m2 \quad \text{si } n \text{ es impar}$$

$$m1 = \frac{n}{2} \quad \text{y} \quad m2 = \frac{n}{2} - 1 \quad \text{si } n \text{ es par}$$

Así, considerando los m sitios de medición, es posible obtener un gráfico de las llamadas curvas de Andrews, como el que se presenta en la Figura 3. A partir de éste también sería posible identificar las semejanzas en el comportamiento hidrológico de acuerdo con la similitud morfológica de estas funciones. Además, la curva promedio de cada grupo representará sus características medias a través de sus coeficientes (que son las variables hidrológicas consideradas).

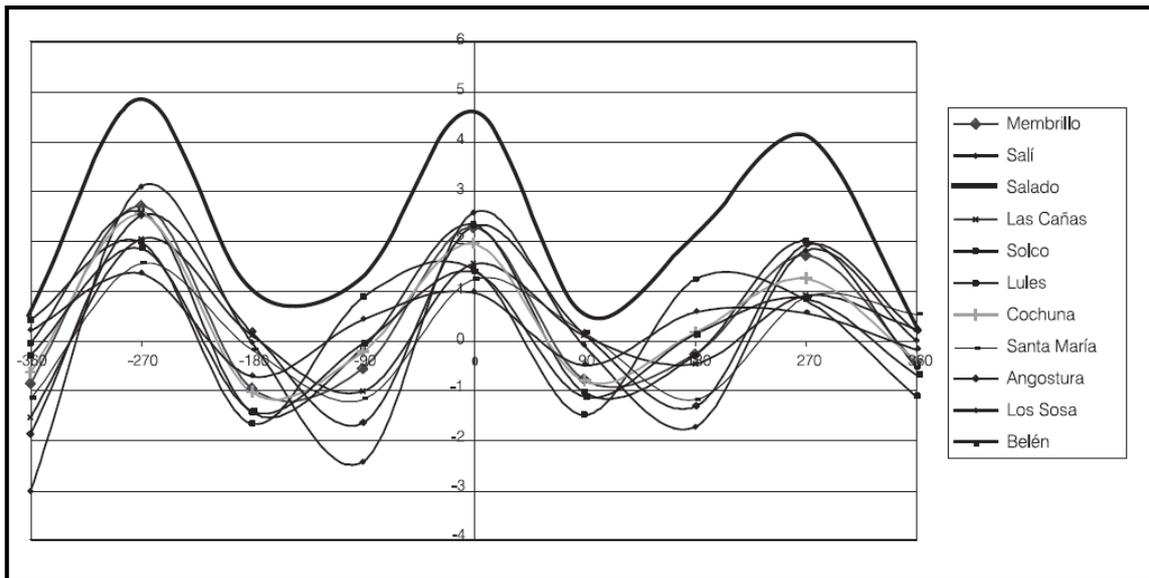


Figura 3. Curvas de Andrews. Aplicación a cuencas del noroeste argentino.

Fuente: Paris y Zucarelli (2004)

Una característica importante del método es que los resultados obtenidos dependen del tipo de variables seleccionadas. Las primeras son asociadas con componentes cíclicos de baja frecuencia y las últimas con componentes de frecuencias más altas. Las bajas frecuencias son más fáciles de observar, de manera que X_1 representa la variable más importante, X_2 a la segunda y así sucesivamente.

Las curvas de Andrews fueron aplicadas por primera vez en una región hidrológica de la República Mexicana (Gutiérrez López, 1996). Posteriormente, Andrade y Hawkins (2000) utilizaron las curvas en cuencas de regiones áridas y semi áridas de Australia, Brasil y Estados Unidos, resultando una herramienta importante para explorar los datos (Embrechts y Herzberg, 1991).

Zucarelli y Werlen, (2002) aplicaron las curvas de Andrews a 9 estaciones del Noroeste argentino usando como variables al área de la cuenca, el caudal, el caudal sólido fino, el caudal sólido grueso y la cota de la sección de interés. Sus resultados muestran que las variables analizadas producen curvas similares para cuencas homogéneas.

DATOS Y PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS EMPLEADOS

La Tabla 8 presenta las características geomorfológicas principales de las cuencas de Perú (área, perímetro, altura máxima, altura mínima, longitud del curso principal, pendiente, precipitación anual, evapotranspiración anual, caudal medio anual del período 1997-2005, densidad de drenaje).

Tabla 8. Principales características de las regiones hidrológicas de Perú

Fuente: Ministerio de Minas (2010)

Orden	Nombre estación	Área (km ²)	hmax (m)	hmin (m)	Long (km)	S1 (m/km)	S10-85 (m/km)	Pa (mm)	ETPa (cm)	Caudal medio anual 1997-2005 (m ³ /s)	Densidad drenaje (km/km ²)
1	Aguas Calientes	538	4726	1335	54	63	69	201	69	0,9	0,32
2	Piedras Blancas	157	4096	944	42	76	90	139	73	0,4	0,42
3	Chucarapi	13052	4498	99	290	15	17	399	67	35,4	0,34
4	Aricota	363	4735	2878	47	40	43	380	54	2,2	0,33
5	Coranchay	888	4716	4144	53	11	6	466	56	1,9	0,36
6	Japojunco	79	4716	4518	8	24	18	516	53	0,4	0,35
7	La Tranca	1939	4601	643	116	34	42	237	66	2,6	0,33
8	El Cairo	931	4840	1194	69	53	57	194	66	0,6	0,35
9	Dique Los Espanoles	61	4665	4441	12	19	18	590	48	0,8	0,34
10	Huatiapa	12857	4539	702	318	12	14	629	60	108,2	0,33
11	MARIA PEREZ	694	4801	4440	44	8	7	737	59	1,6	0,30
12	Negropampa	7307	4539	2095	231	11	8	761	56	59,2	0,33

Orden	Nombre estación	Área (km ²)	hmax (m)	hmin (m)	Long (km)	S1 (m/km)	S10-85 (m/km)	Pa (mm)	ETPa (cm)	Caudal medio anual 1997-2005 (m ³ /s)	Densidad drenaje (km/km ²)
13	PALLCA- HUARURO	1591	4801	2184	88	30	15	720	59	18,4	0,31
14	Puente Carretera Camana	17145	4539	9	417	11	13	496	67	122,9	0,34
15	Puente Colgante- Sibayo	4080	4539	3795	145	5	5	821	65	29,4	0,34
16	Salamanca	1112	4797	3124	57	29	27	578	68	18,7	0,36
17	Aguada Blanca	4032	4615	3669	97	10	8	467	54	12,7	0,35
18	Charcani	4201	4615	2642	119	17	13	462	65	17,0	0,35
19	El Frayle	1079	4535	4050	56	9	7	436	54	2,5	0,35
20	Sumbay	573	4675	4435	51	5	4	540	50	5,6	0,36
21	Tingo Grande	1716	4745	2243	80	31	32	325	64	0,6	0,37
22	Conta	3041	4657	271	127	35	36	462	68	15,8	0,30
23	El Molino	495	3984	664	68	49	57	426	88	0,5	0,39
24	La Achirana	2126	4142	473	99	37	39	491	83	8,8	0,32
25	La Peña	847	4051	381	74	50	51	358	88	0,6	0,32

Orden	Nombre estación	Área (km ²)	hmax (m)	hmin (m)	Long (km)	S1 (m/km)	S10-85 (m/km)	Pa (mm)	ETPa (cm)	Caudal medio anual 1997-2005 (m ³ /s)	Densidad drenaje (km/km ²)
26	Las Trancas	606	4044	595	85	41	50	382	88	0,4	0,37
27	Letrayoc	3485	4650	639	137	29	33	540	69	31,2	0,31
28	Moyaque	554	4242	389	71	55	63	372	88	0,7	0,32
29	Orongo	457	3542	498	72	42	38	272	91	0,2	0,32
30	Puente Carretera	1861	4115	329	114	33	36	514	84	1,7	0,30
31	Puente Jaqui	4098	4589	246	162	27	27	344	73	5,2	0,35
32	San Agustin	257	4002	830	67	48	56	477	87	0,4	0,46
33	Socos	162	3657	493	59	53	65	250	95	0,0	0,40
34	Sol De Oro	452	4013	726	63	52	58	391	90	0,3	0,48
35	Paucarcocha (COES)	298	4500	4224	26	11	10	1118	64	6,0	0,30
36	Capillucas (COES)	3278	4500	1561	139	21	23	850	70	45,2	0,31
37	SOCSI	5798	4500	308	209	20	23	677	71	57,5	0,31
38	Sector Tutuma	1732	4346	121	81	52	46	471	86	6,0	0,30
39	Obrajillo	365	4650	2689	39	50	51	823	59	4,9	0,30
40	Santo Domingo	1852	4636	566	83	49	52	724	69	17,5	0,29

Orden	Nombre estación	Área (km ²)	hmax (m)	hmin (m)	Long (km)	S1 (m/km)	S10-85 (m/km)	Pa (mm)	ETPa (cm)	Caudal medio anual 1997-2005 (m ³ /s)	Densidad drenaje (km/km ²)
41	Puente Magdalena	1259	4650	895	83	45	49	587	68	7,9	0,30
42	Pariacancha	122	4650	4040	17	37	41	910	57	2,2	0,27
43	La Rinconada	1667	4528	235	84	51	50	437	74	3,7	0,33
44	Laguna Paton	44	4494	4021	10	45	48	874	59	1,7	0,28
45	Picoy	362	4651	3040	30	54	57	903	60	5,2	0,30
46	Sayan	2858	4509	678	113	34	36	703	69	23,9	0,30
47	Laguna Cochaquillo	29	4502	4261	5	46	44	890	63	0,5	0,21
48	Laguna Surasaca	53	4509	4373	10	13	13	943	61	0,6	0,28
49	Manchay	1273	4437	217	94	45	46	395	75	4,3	0,31
50	La Capilla	2122	4661	395	100	43	46	661	73	16,5	0,30
51	Puente Moro	1260	4273	363	43	91	72	776	81	3,5	0,32
52	Alpas y Tomas Altas	4101	4637	443	148	28	28	735	66	44,3	0,30
53	Yuracmayo (COES)	96	4755	4288	13	35	37	1001	63	1,7	0,29

Orden	Nombre estación	Área (km ²)	hmax (m)	hmin (m)	Long (km)	S1 (m/km)	S10-85 (m/km)	Pa (mm)	ETPa (cm)	Caudal medio anual 1997-2005 (m ³ /s)	Densidad drenaje (km/km ²)
54	Chosica	2319	4755	982	95	40	44	675	68	36,7	0,30
55	Rio Blanco	202	4755	3588	32	37	29	922	61	2,4	0,29
56	San Mateo	446	4755	2961	41	44	39	862	62	10,5	0,29
57	Chancos	219	4799	2885	36	52	41	1186	70	8,9	0,31
58	Colcas	235	4237	2055	32	68	68	1307	67	6,0	0,32
59	Llanganuco	86	4570	3794	12	67	64	1414	67	3,0	0,25
60	Balsa	4748	4645	1907	201	14	12	1090	68	88,8	0,33
61	Chuquicara	3175	4128	644	105	33	29	982	67	29,1	0,31
62	Condorcerro	10402	4645	595	281	14	15	1038	68	142,4	0,31
63	Los Cedros	113	4736	2486	22	102	87	1415	68	3,4	0,29
64	Puente Carretera Santa	12389	4645	28	350	13	14	802	69	282,6	0,32
65	Cherrepr	897	1995	19	70	28	13	234	105	2,9	0,32
66	Racarumo	2375	3793	261	121	29	26	1028	76	37,6	0,32
67	Salinar	3675	3931	340	118	31	20	829	70	31,9	0,31
68	Chilete	1293	3423	933	52	47	41	1148	81	11,1	0,30

Orden	Nombre estación	Área (km ²)	hmax (m)	hmin (m)	Long (km)	S1 (m/km)	S10-85 (m/km)	Pa (mm)	ETPa (cm)	Caudal medio anual 1997-2005 (m ³ /s)	Densidad drenaje (km/km ²)
69	Yonan	3304	3423	443	100	30	20	981	77	31,9	0,31
70	Las Paltas	1034	3578	801	67	41	47	1242	63	17,6	0,32
71	Quirihua	1887	3996	172	93	41	45	721	63	7,1	0,31
72	Puchaca	756	2287	635	20	81	72	857	75	7,4	0,29
73	Huacapongo	910	3961	172	68	56	57	787	65	3,4	0,30
74	Batan	695	3230	219	54	55	60	914	83	8,8	0,31
75	Ventanillas	3641	3423	236	126	25	16	901	80	28,7	0,31
76	Barrios	424	2627	283	28	84	82	1055	92	7,3	0,28
77	Carrasquillos	2995	1831	127	86	20	8	821	103	33,5	0,31
78	Chilique	160	2238	247	25	79	70	1043	127	3,0	0,33
79	Corral del Medio	340	2050	178	32	59	48	1063	112	5,8	0,28
80	La Greda	337	249	68	41	4	4	536	131	7,6	0,37
81	Malacasi	1855	1831	135	63	27	14	820	92	14,8	0,30
82	Puente Ñacara	4604	1831	88	114	15	5	761	113	24,4	0,32
83	Puente Paltashaco	142	1953	497	17	88	78	1198	122	2,3	0,26
84	Puente Piura	7689	1831	32	217	8	1	641	122	96,2	0,33

Orden	Nombre estación	Área (km ²)	hmax (m)	hmin (m)	Long (km)	S1 (m/km)	S10-85 (m/km)	Pa (mm)	ETPa (cm)	Caudal medio anual 1997-2005 (m ³ /s)	Densidad drenaje (km/km ²)
85	San Pedro	151	2075	360	20	88	84	1120	127	3,1	0,29
86	Tambo Grande	6127	1831	68	146	12	3	693	118	64,6	0,33
87	Alamor	433	343	139	34	6	4	783	133	7,6	0,30
88	Ardilla (Reservorio poechos)	12039	2780	123	246	11	7	1063	97	234,9	0,31
89	El Ciruelo	7062	2780	243	192	13	8	1134	90	140,9	0,31
90	Lagartera	399	3145	481	54	49	58	1099	121	2,1	0,30
91	Paraje Grande	2306	3044	536	100	25	25	1119	90	16,3	0,31
92	Puente Internacional	2443	2112	428	110	15	11	1115	79	41,4	0,31
93	El Tigre	5063	2611	12	197	13	4	1024	125	111,9	0,32
94	Puente Tumbes	5374	2611	3	212	12	4	1006	126	140,0	0,32
95	La Palma	810	472	15	66	7	8	881	134	15,5	0,35
96	Puente Bolsico	850	473	3	79	6	7	858	135	11,3	0,35
97	Foz Do Breu	7713	373	243	167	1	0	1733	149	198,6	0,35
98	Tinyayoc	30	2649	2102	5	111	115	992	68	0,6	0,24

Orden	Nombre estación	Área (km ²)	hmax (m)	hmin (m)	Long (km)	S1 (m/km)	S10-85 (m/km)	Pa (mm)	ETPa (cm)	Caudal medio anual 1997-2005 (m ³ /s)	Densidad drenaje (km/km ²)
99	QN-805	137	4620	4196	15	28	33	727	47	0,8	0,31
100	QN-809	65	4680	4251	11	38	22	706	46	0,9	0,30
101	Jadibamba	24	3843	3687	7	21	17	1078	43	1,0	0,32
102	QN-811	142	4668	4448	17	13	10	718	49	1,1	0,31
103	QN-812	28	4593	4193	8	48	51	729	48	1,6	0,30
104	Dsondor	148	3597	2692	15	62	56	1026	60	1,7	0,34
105	Desaguadero	141	704	637	12	5	11	1560	118	1,7	0,30
106	Puente Maygas	121	3775	2543	22	56	57	1040	46	1,7	0,35
107	Rio Pallanga	59	4582	4223	12	29	30	731	48	2,2	0,22
108	Hijadero	162	3824	2548	28	45	53	1047	51	2,3	0,30
109	QN-815	159	4847	4341	19	26	19	708	46	2,6	0,32
110	Las Juntas	267	2530	1074	24	62	58	903	92	2,7	0,29
111	Quebrada Canario	130	3256	1276	26	77	57	807	70	2,8	0,28
112	Lag. Marpomacocha	143	4603	4401	12	16	14	722	48	3,0	0,30312
113	Granja Azul	82	2829	1916	10	94	90	846	47	3,1	0,25

Orden	Nombre estación	Área (km ²)	hmax (m)	hmin (m)	Long (km)	S1 (m/km)	S10-85 (m/km)	Pa (mm)	ETPa (cm)	Caudal medio anual 1997-2005 (m ³ /s)	Densidad drenaje (km/km ²)
114	Rayusca	1347	4414	3745	69	10	7	563	56	3,2	0,34
115	Puente Conchan	39	2560	2066	10	52	19	1031	63	3,4	0,24
116	Quebrada Cululan	108	2872	1189	19	91	80	838	64	3,6	0,24
117	91	97	4427	4082	18	19	21	764	49	3,8	0,32
118	Bocatoma	475	3830	2402	35	41	31	1019	60	5,1	0,34007
119	JesusTuneñ	820	3783	2504	53	24	20	973	56	6,0	0,36226
120	Cahuacayan	581	4600	4109	33	15	14	735	47	6,6	0,29
121	Cumbaza	180	1034	270	28	27	25	1750	122	7,2	0,29
122	Sauces	166	3242	932	24	95	90	827	73	7,2	0,27
123	Los Libertadores	307	4533	3895	29	22	18	731	51	7,4	0,30
124	Guayaquil	573	2894	1643	43	29	19	995	65	7,6	0,31
125	Quebrada Ingeriaco	342	2829	1081	28	62	50	854	63	7,7	0,25
126	Llaucano	336	3894	2612	28	46	49	1033	48	8,1	0,33
127	Túnel Chotano	396	2894	1981	28	33	22	1010	62	8,3	0,31
128	Chotano Lajas	357	2894	2139	22	35	28	1014	61	8,4	0,32

Orden	Nombre estación	Área (km ²)	hmax (m)	hmin (m)	Long (km)	S1 (m/km)	S10-85 (m/km)	Pa (mm)	ETPa (cm)	Caudal medio anual 1997-2005 (m ³ /s)	Densidad drenaje (km/km ²)
129	LlaucanoCorellama	606	3894	2550	35	39	39	1035	50	10,6	0,32
130	Angostura	1298	4681	4142	43	12	13	652	44	12,9	0,35
131	Huasapamapa	2150	4369	2895	73	20	24	562	50	16,9	0,35
132	Maguinchal	763	2955	703	66	34	37	1160	68	21,4	0,29
133	QN-801	2616	4338	4093	55	4	4	789	50	21,5	0,36
134	San Crsitobal	1992	1459	243	129	9	6	1335	135	24,4	0,33
135	QN-802	5460	4338	3843	126	4	3	767	50	27,5	0,34
136	Huallanille	1922	2894	880	97	21	17	917	72	29,3	0,28
137	Cacao	973	3054	901	65	33	24	1004	78	30,0	0,29
138	Chichagua	3467	3230	905	142	16	10	879	75	33,1	0,30
139	Yuncan	1583	4288	1889	72	33	35	959	50	39,0	0,32
140	Puente Chunchuca	1170	3054	575	80	31	21	1007	81	39,5	0,29
141	Puente Crsinejas	4213	3783	1958	109	17	12	1027	60	48,7	0,34
142	Pisac	6925	4956	2953	211	9	9	1186	47	50,9	0,31
143	Puente Taruca	3792	4527	2034	118	21	21	855	55	63,7	0,31
144	QN-803	18523	4338	2668	377	4	4	761	52	106,6	0,32

Orden	Nombre estación	Área (km ²)	hmax (m)	hmin (m)	Long (km)	S1 (m/km)	S10-85 (m/km)	Pa (mm)	ETPa (cm)	Caudal medio anual 1997-2005 (m ³ /s)	Densidad drenaje (km/km ²)
145	Toma	9160	4956	2134	312	9	7	1120	49	131,9	0,31
146	Biavo	5945	1682	253	214	7	5	1843	118	154,1	0,35
147	Shanao	8468	1378	285	215	5	4	1547	90	386,8	0,34
148	Taumaturgo	25486	373	184	392	0	0	1921	151	392,3	0,34
149	CUMBAZA	36526	4661	1125	721	5	4	1110	62	591,8	0,30
150	Palmeiras Do Javari	16537	240	102	304	0	0	2364	161	634,5	0,35
151	Ladário	19331	256	78	488	0	0	2617	155	768,9	0,35
152	Corral Quemado	45043	4661	1125	748	5	4	1076	66	913,6	0,30
153	Santa Maria	25286	234	86	444	0	0	2525	159	1011,2	0,35
154	Ladário - Jusante	37046	256	77	519	0	0	2670	155	1748,4	0,34
155	Estirão Do Repouso	61417	240	71	736	0	0	2580	159	2568,2	0,35
156	Borja	114809	4661	1125	1033	3	3	1365	80	4601,0	0,31
157	Chiuapalca	1564	4600	4138	78	6	4	427	49	3,7	0,32
158	Vilacorta	77	4600	4424	12	14	10	437	47	0,4	0,21

Orden	Nombre estación	Área (km ²)	hmax (m)	hmin (m)	Long (km)	S1 (m/km)	S10-85 (m/km)	Pa (mm)	ETPa (cm)	Caudal medio anual 1997-2005 (m ³ /s)	Densidad drenaje (km/km ²)
159	Lagunillas	837	4765	4093	68	10	8	680	50	6,2	0,30
160	Rio Verde	750	4594	4180	31	13	13	731	48	9,6	0,30
161	Puente Coata	1133	4806	3811	83	12	6	742	52	32,8	0,34
162	Puente Maravillas	4596	4594	3816	126	6	4	713	52	48,6	0,33
163	Puente Huancane	3628	4579	3802	89	9	4	791	53	19,6	0,33
164	Puente Ramis	14840	4760	3775	292	3	2	903	51	78,7	0,33
165	Puente Ilave	8188	4622	3839	166	5	5	647	52	37,3	0,34
166	Puente Zapatilla	296	4028	3842	40	5	4	771	56	0,9	0,31

Las áreas oscilan entre 24 km² y 114 809 km²; con valores de precipitación mínimo de 139 mm y máximo 2 670 mm y caudales entre 0,4 m³/s y 4601 m³/s (para el período 1997-2005).

La Tabla 9 presenta los valores de área, perímetro, índice de compacidad Kc, relación de circularidad, C; relación de elongación, E y tiempo de concentración estimado por la ecuación de Kirpich (en hs).

Tabla 9. Cuencas del río Uruguay hasta Salto Grande

Orden	Nombre Cuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Kc	C	E	Kirpich (hs)
1	Afluente I	2276	205,2	1,93	0,26	0,47	25,22
2	Afluente II	887	305,3	1,79	0,31	0,46	36,83
3	Apue I	3673	418,3	1,78	0,25	0,46	35
4	Arapey Grande I	3496	430,6	2,04	0,24	0,47	32,72
5	Arapey Grande II	3442	382,3	1,82	0,3	0,54	29,33
6	Arapey Grande III	2163	366,7	2,21	0,2	0,4	30,77
7	Arapey Grande IV	2190	353,8	2,12	0,22	0,45	28,43
8	Arapey Grande V	570	194,4	2,28	0,19	0,5	15,59
9	Aguapey I	4323	519,8	2,21	0,2	0,41	51,63
10	Aguapey II	2772	422,2	2,25	0,2	0,51	36,83
11	Dayman	3418	459,6	2,2	0,2	0,39	37,7
12	Gualeguaychú I	1305	303,8	2,35	0,18	0,5	27,89
13	Gualeguaychú II	2275	419,3	2,46	0,16	0,43	39,05
14	Gualeguaychú III	1512	300	2,16	0,21	0,5	29,83

Orden	Nombre Cuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Kc	C	E	Kirpich (hs)
15	Gualeguaych ú IV	1258	226,6	1,79	0,31	0,58	24,53
16	Miriñay	2280	424,3	2,49	0,16	0,49	35,21
17	Miriñay-Ayuí Grand I	5318	552,5	2,12	0,22	0,72	36,58
18	Miriñay- AyuíGrand II	4519	526,1	2,19	0,21	0,63	37,97
19	Mocoretá	3814	539,8	2,45	0,16	0,44	46,41
20	Queguay Grande I	2099	358,1	2,19	0,21	0,44	28,67
21	Queguay Grande II	4263	551,5	2,37	0,18	0,37	42,32
22	Queguay Grande III	2198	350,4	2,09	0,22	0,46	36,42
23	Rio Negro I	42619	1628	2,21	0,2	0,45	116,56
24	Rio Negro II	28497	1486	2,46	0,16	0,39	112,28
25	San Salvador	3133	408,5	2,04	0,24	0,43	44,54
26	Santa María I	6066	621,8	2,24	0,2	0,39	61,01
27	Santa María II	6009	553,7	2	0,25	0,51	49,7
28	Santa Maria III	3682	523,2	2,41	0,17	0,62	35,54
29	Uruguay XII	5365	646,8	2,63	0,14	0,61	41,25
30	Uruguay XIII	2102	386,4	2,36	0,18	0,44	37,11
31	Uruguay XIV	2775	446,2	2,37	0,18	0,51	37,11
32	Uruguay XIX	2381	474	2,72	0,13	0,36	46,01
33	Uruguay XV	1424	273,6	2,03	0,24	0,39	35,2
34	Uruguay XVI	2912	455,5	2,36	0,18	0,73	28,61
35	Uruguay XVII	1803	368,4	2,43	0,17	0,64	26,42

Orden	Nombre Cuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Kc	C	E	Kirpich (hs)
36	Uruguay XVIII	1128	320,6	2,67	0,14	0,43	29,55
37	Uruguay XX	1833	356,4	2,33	0,18	0,56	29,38
38	Uruguay XXI	6696	829	2,84	0,12	0,43	58,97

Las áreas oscilan entre 570 km² y 42 619 km²; los tiempos de concentración varían entre 16 y 117 hs. El coeficiente de compacidad varía entre 1,78 y 2,84 lo que indica que se trata de cuencas de forma óval-oblonga a rectangular-oblonga.

En ambos sistemas hidrográficos, se trata de variables medidas o estimadas en las cuencas hidrográficas.

Cada una de estas series fue analizada con herramientas de la Estadística Descriptiva (estadísticos, histogramas, boxplot, etc.), para identificar la eventual presencia de valores anómalos, obtener una caracterización sintética y gráficos de sus principales características, así como verificar el ajuste a la distribución Normal. Esto permitió decidir por la no transformación de los datos por la aplicación del log natural para la corrección de asimetrías.

Como paso previo a la aplicación de los métodos multivariados, las series fueron estandarizadas, utilizando la expresión de tipificación de la Ley Normal. Esto contribuye a que las heterogeneidades intrínsecas del conjunto de datos sean más relevantes y no se vean enmascarados por diferencias de las unidades de medida y/o rango de variación de las variables consideradas.

Se utilizó el Análisis de Agrupamiento en modo R para evaluar las relaciones entre las variables consideradas. En este caso se emplearon los coeficientes de correlación y distancia euclídeana como medida de similitud y el método Ward basado en la varianza entre los grupos (Everitt et al., 2001). Para el caso de la cuenca del río Uruguay se empleó únicamente el método de Ward.

Posteriormente, a fin de identificar las relaciones entre las cuencas, se realizó el Análisis de Agrupamiento en modo Q. En este caso se consideró el método de Ward para la determinación de los grupos homogéneos. Para este procesamiento se empleó el programa computacional Past versión 3.08:2015 (Hammer et al., 2001).

En el caso de la asociación entre variables, la interpretación del dendrograma es sencilla. En cambio, en el Modo Q deben establecerse diferentes niveles de corte para establecer los grupos homogéneos (regiones). Para disminuir la incertidumbre asociada esta decisión, los resultados de los grupos fueron graficados utilizando las curvas de Andrews, a modo de validación cruzada y el Análisis de Componentes Principales en Modo R. Este último método contribuyó también a definir el orden jerárquico de importancia de las variables.

Debe tenerse en cuenta además, que las curvas de Andrews representan funciones armónicas, cuyos coeficientes están definidos por los valores cuantificados para las n variables, y que el orden de las variables en la función tiene notable influencia en los resultados obtenidos (Embrechts y Herzberg, 1991).

Finalmente, los resultados obtenidos se interpretaron considerando la caracterización general de los sistemas hidrológicos analizados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

REGIONALIZACIÓN EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE PERÚ

Las Figuras 4 a 6 ilustran el resultado del análisis agrupamiento entre variables (Modo R), utilizando el coeficiente de correlación, el coeficiente de distancia euclidiana y el Método Ward, respectivamente.

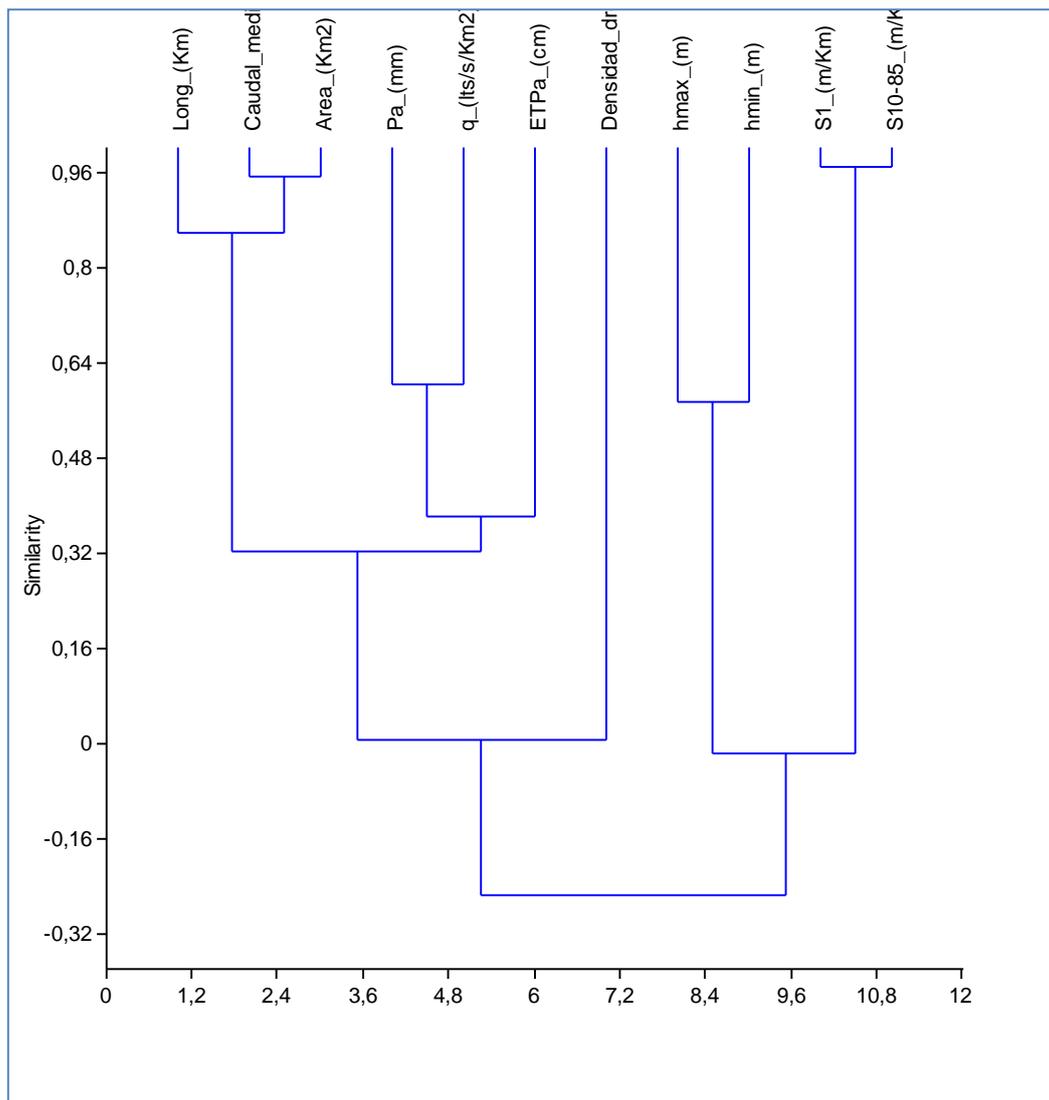


Figura 4. Modo R – Coeficiente de similitud: Correlación muestral

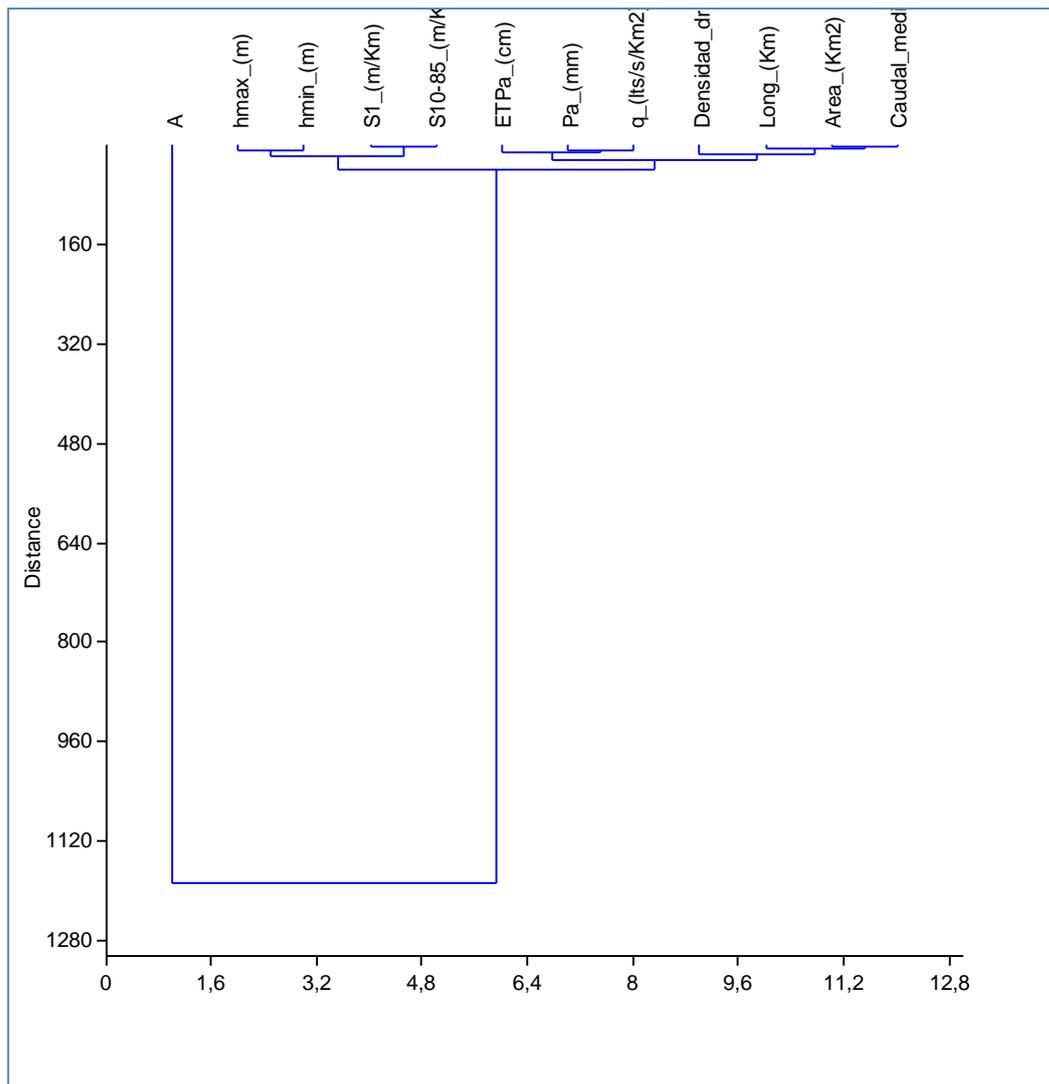


Figura 5. Modo R – Coeficiente de similitud: distancia euclidiana

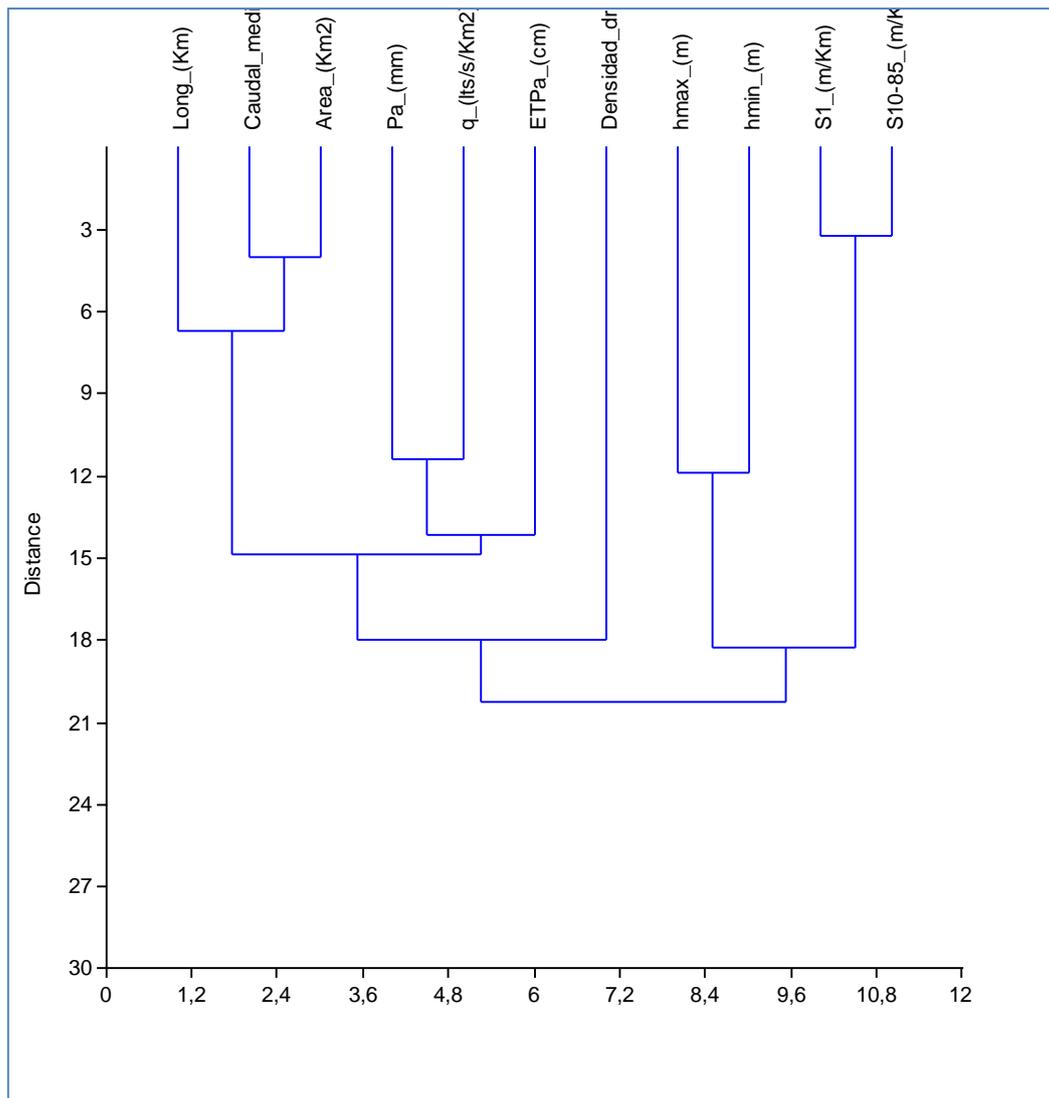


Figura 6. Modo R –Método Ward

Del análisis de los dendrogramas se deduce que hay, por un lado, una fuerte relación entre las variables que reflejan la topografía de la cuenca (hmax, hmin, S1 y S10_85). Por el otro lado, también hay una fuerte relación entre las variables que tienen en cuenta la respuesta de la cuenca (longitud, caudal, área). Finalmente, existe una relación entre las variables que intervienen en el balance hídrico (precipitación, caudal específico, EVT y densidad de drenaje).

La Figura 7 ilustra el resultado del análisis de agrupamiento entre las observaciones (Modo Q) de acuerdo con el Método Ward. Es posible identificar allí dos grandes regiones principales. La Región 1 tiene 7 cuencas, mientras que la Región 2 reúne al resto (159 cuencas).

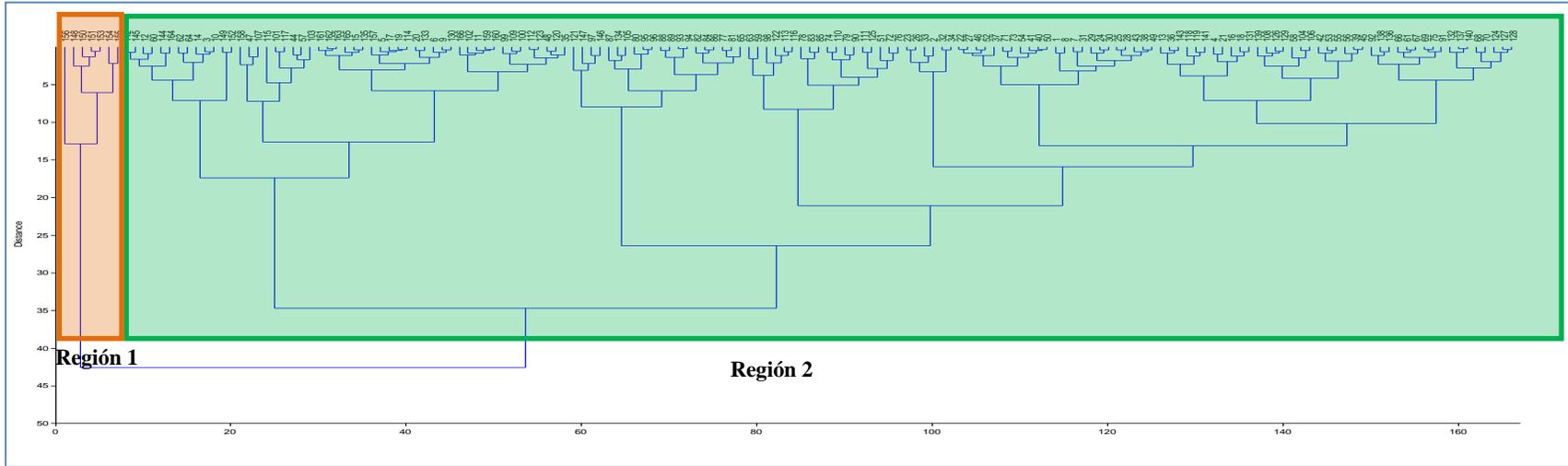


Figura 7. Modo Q – Método Ward

Indudablemente podrían diferenciarse otras regiones modificando el nivel de corte en el dendrograma de la figura anterior. Pero estos niveles se definirían arbitrariamente. Como se indicó en el apartado de *Metodología*, para disminuir la incertidumbre asociada a esta decisión, complementariamente se plantea el Análisis de Componentes Principales en Modo R y la visualización de los resultados con el empleo de las curvas de Andrews, como estrategia de validación cruzada.

Las Tablas 10 y 11 y la Figura 8 presentan dichos resultados. Se han señalado en **negritas** las cargas que señalan la relación entre las variables observadas y los ejes principales. Esto además permite poner en evidencia el orden de significación de las variables intervinientes en la regionalización.

Teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- El valor del autovalor (mayor a 1) y/o la varianza representada individualmente (mayor a 10%).
- La varianza total representada en forma acumulativa (valor umbral arbitrario, por ejemplo 70%).
- Relación autovalor vs orden (punto de quiebre en el diagrama scree)
- Comunalidad representada de cada variable, que es la varianza representada de cada variable al considerar en este caso los 3 ejes principales. El valor debe ser lo más próximo a la unidad.

De acuerdo a ello se consideran 4 componentes principales, que logran representar el 86,69% de la varianza total.

La Tabla 11 muestra las cargas que caracterizan a cada una de las componentes en relación a las variables consideradas. Se observa que las principales variables que intervienen en la regionalización son: el área, la precipitación, la longitud del cauce y el caudal, y que definen la Componente Principal 1, de mayor representatividad en términos de varianza (38%, según Tabla 10).

Tabla 10. Resultados del ACP

Orden	Autovalor	Varianza
1	4,18566	38,051
2	2,36633	21,512
3	1,65432	15,039
4	1,32968	12,088
5	0,633641	5,7604
6	0,337661	3,0696
7	0,26654	2,4231
8	0,107159	0,97417
9	0,0855896	0,77809
10	0,0252703	0,22973
11	0,00814288	0,074026

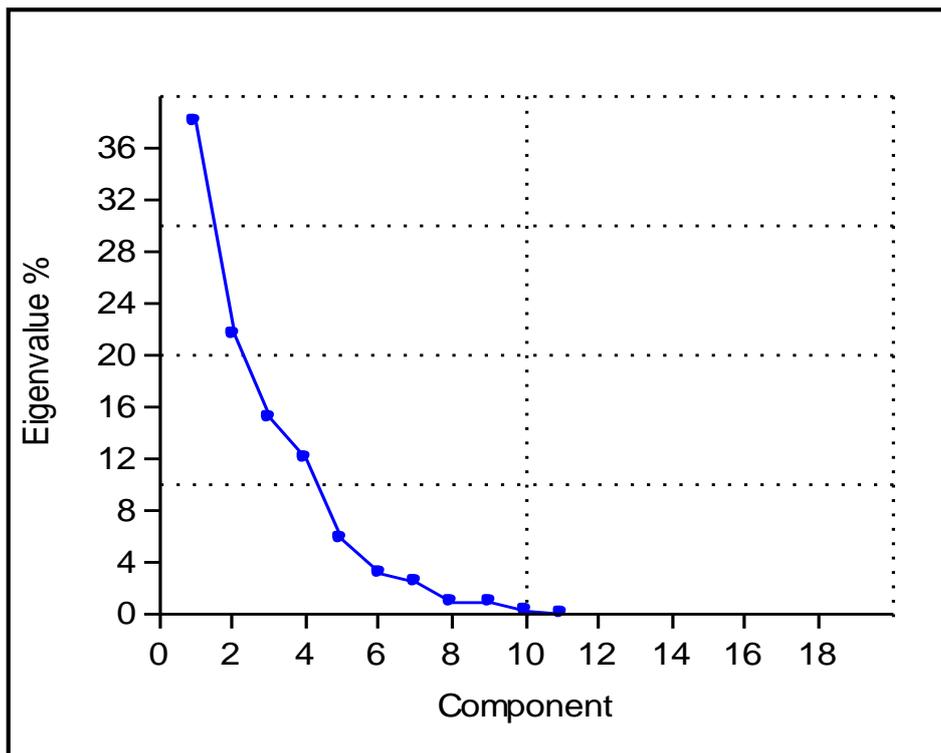


Figura 8. Resultados del ACP

Tabla 11. Resultados del ACP

Variable	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Comunalidad
Area_(km ²)	0,8157	-0,2892	0,3231	0,3619	0,98
Densidad_drenaje_(km/km ²)	0,1452	-0,2714	-0,6477	0,3115	0,61
hmax_(m)	-0,6103	-0,5864	0,3422	0,285	0,91
hmin_(m)	-0,4371	-0,5527	0,3943	-0,3838	0,80
Long_(km)	0,8307	-0,3162	0,1398	0,3215	0,91
S1_(m/km)	-0,4769	0,6991	0,3182	0,3917	0,97
S10-85_(m/km)	-0,4834	0,6501	0,2766	0,4717	0,96
Pa_(mm)	0,724	0,301	0,2085	-0,3599	0,79
ETPa_(cm)	0,6704	0,5241	-0,4334	-0,0247	0,91
Caudal_medio_anual_1997-2005_(m ³ /s)	0,7993	-0,1802	0,3711	0,3212	0,91
q_(lts/s/km ²)	0,4148	0,388	0,5398	-0,4007	0,77

Las Figuras 9 y 10 muestran las curvas de Andrews para cada una de estas regiones.

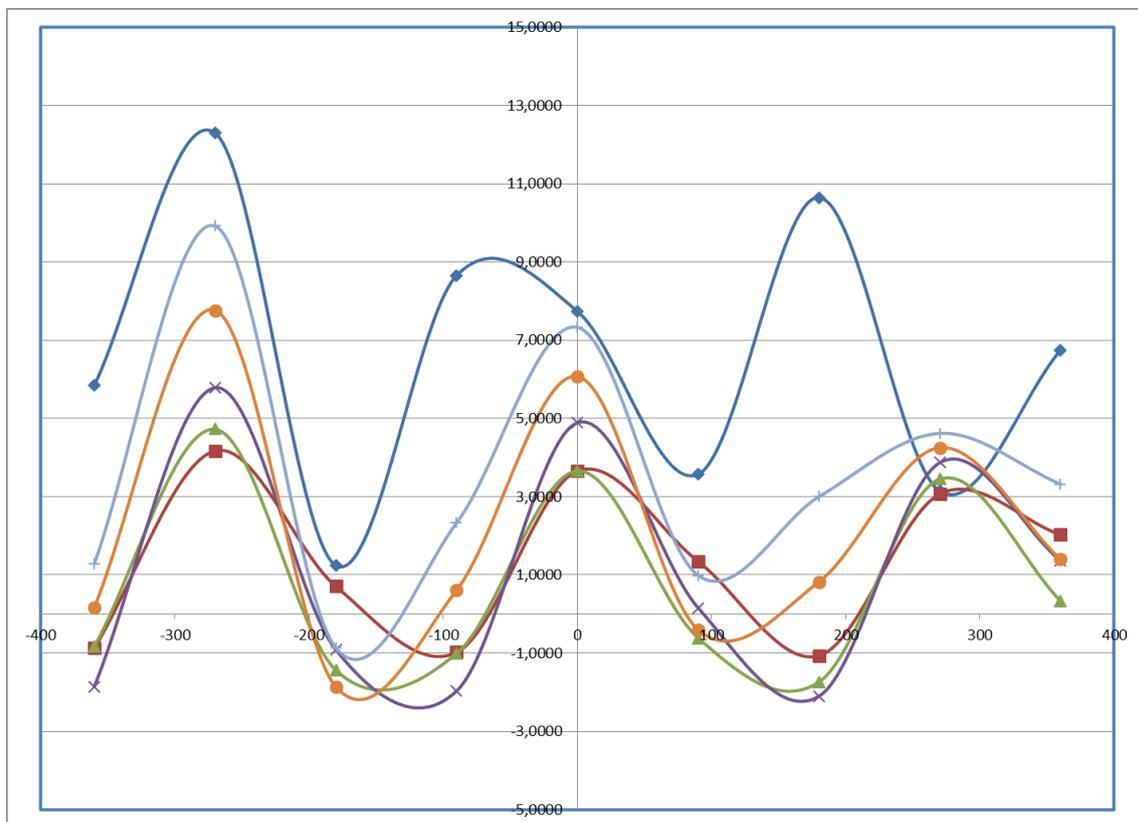


Figura 9. Curvas de Andrews Región 1

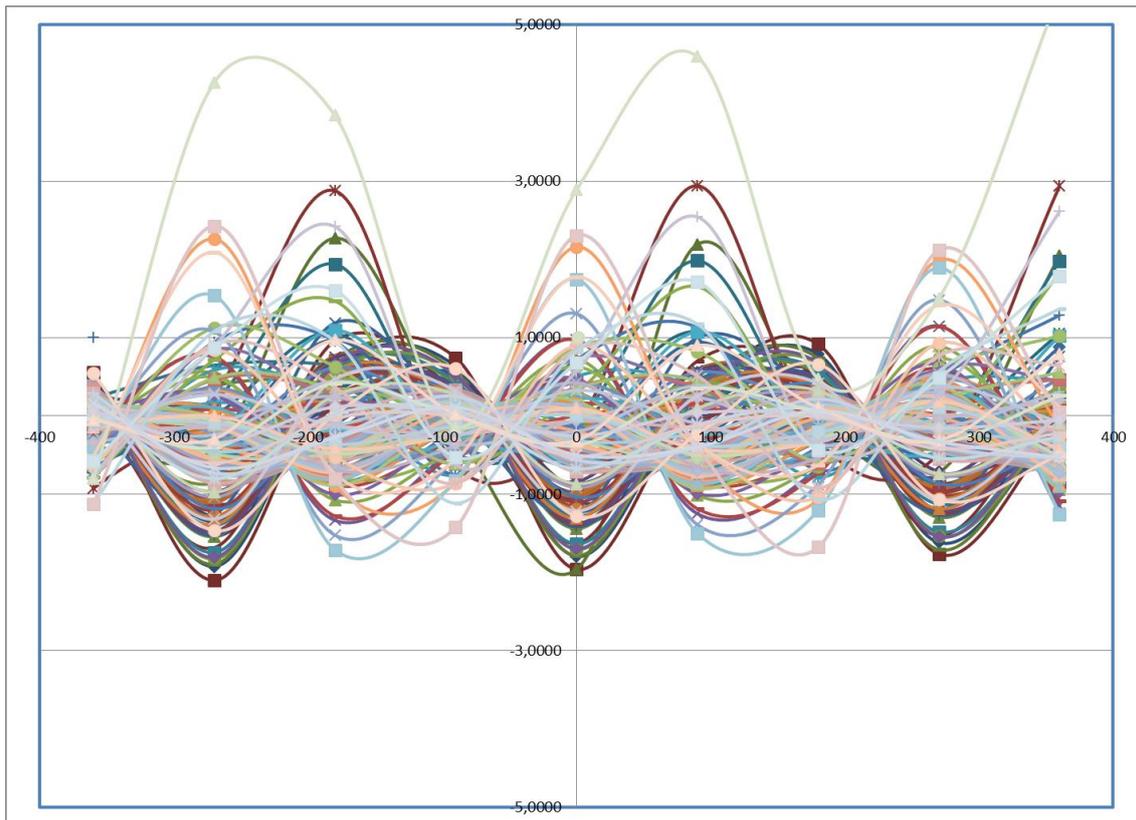


Figura 10. Curvas de Andrews Región 2

A partir de esto, se define un nuevo nivel de corte en el dendrograma logrado con el análisis de agrupamiento en Modo Q, estableciendo ahora 4 regiones principales, como se observa en la Figura 11.

Las 4 regiones están compuestas de 64, 20, 18 y 64 cuencas, respectivamente. Las Figuras 12 a 15 ilustran las curvas de Andrews para las 4 regiones.

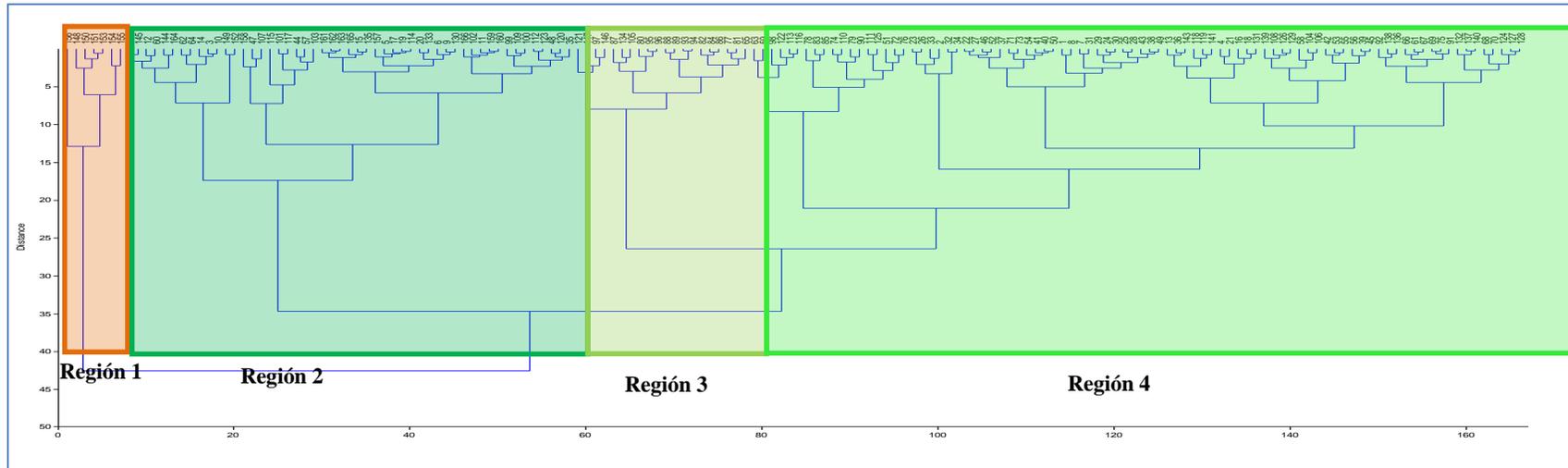


Figura11. Método Ward – 4 regiones

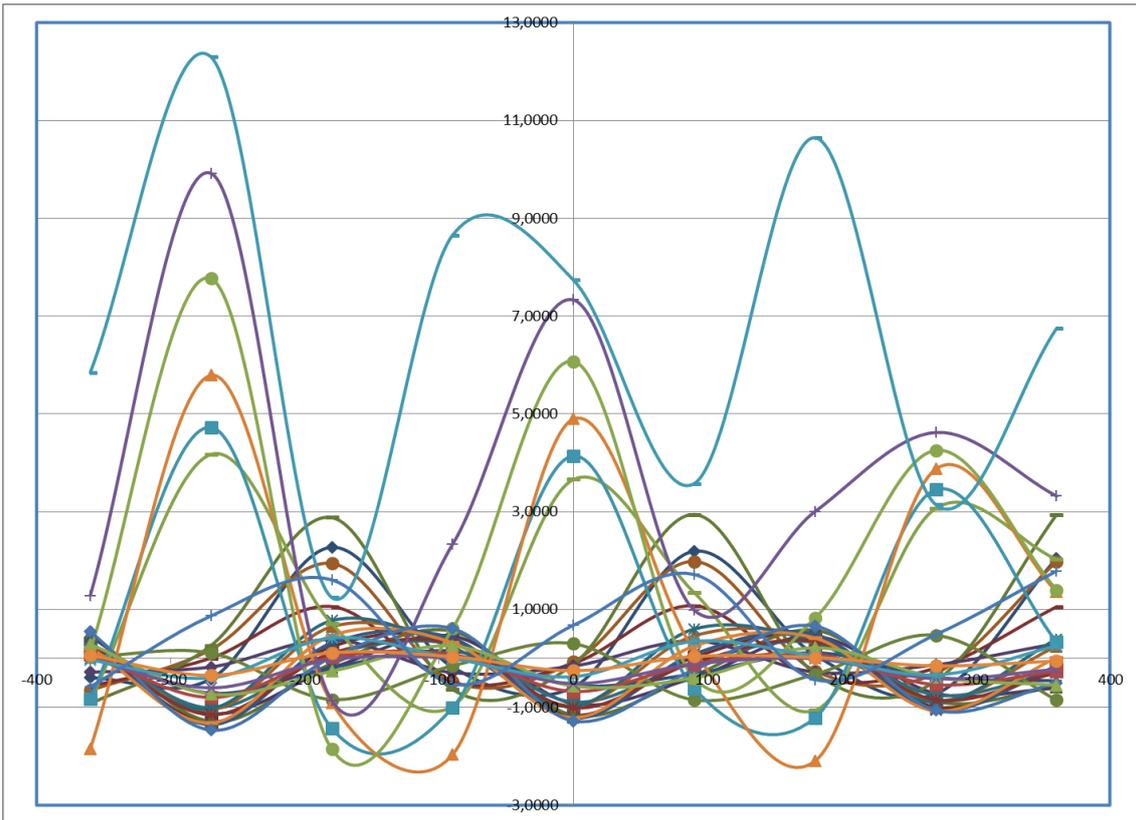


Figura 12. Curvas de Andrews Región 1

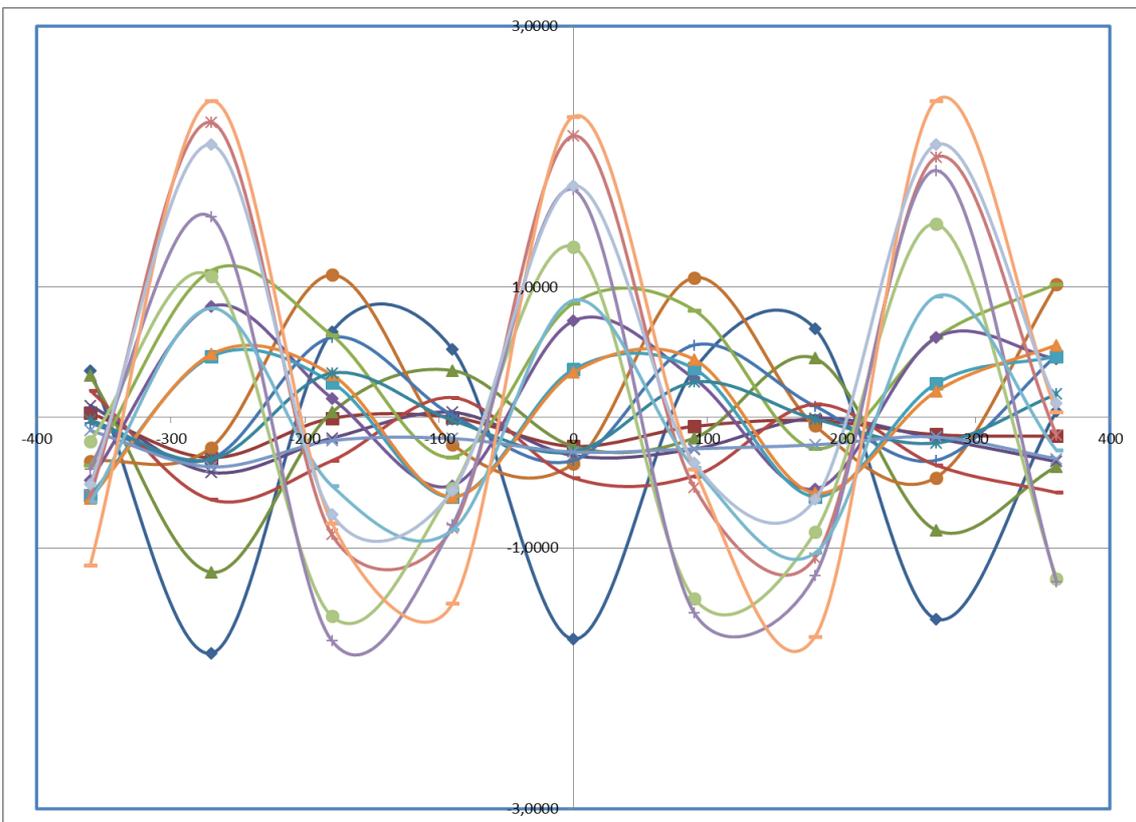


Figura 13. Curvas de Andrews Región 2

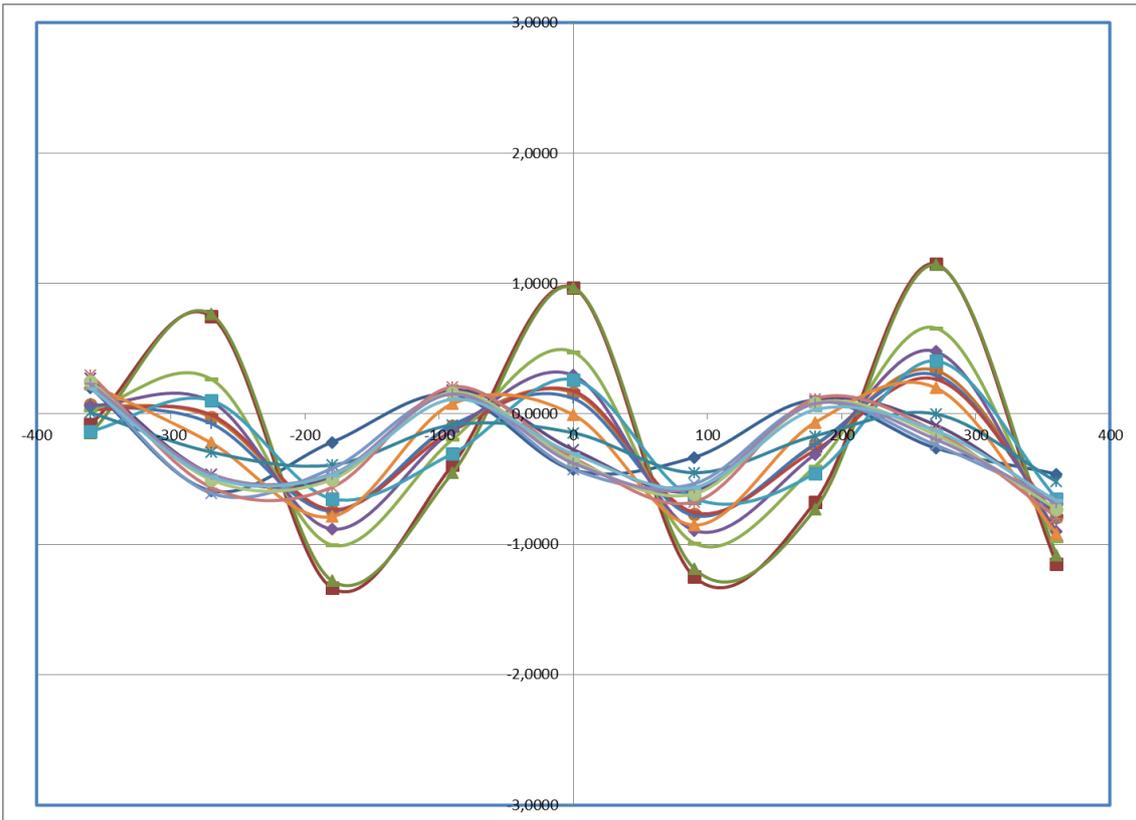


Figura 14. Curvas de Andrews Región 3

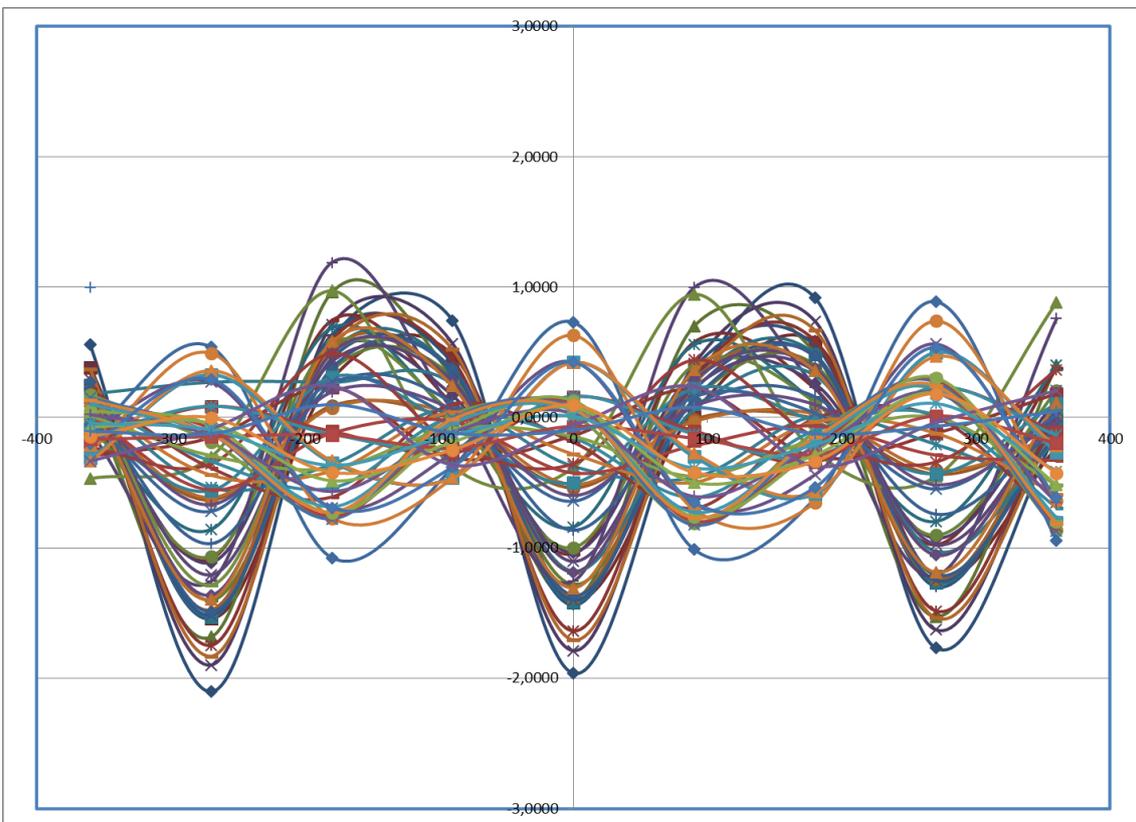


Figura 15. Curvas de Andrews Región 4

Como puede apreciarse, la forma de las curvas no muestra homogeneidad interna de los grupos. Por esta razón se decide adoptar nuevos niveles de corte en el dendrograma que dan lugar primero a 10 regiones e (Figuras 17 a 26) y luego a 17 regiones homogéneas. La Figura 16 ilustra el dendrograma para las 10 regiones y la Figura 27 el dendrograma para las 17 regiones.

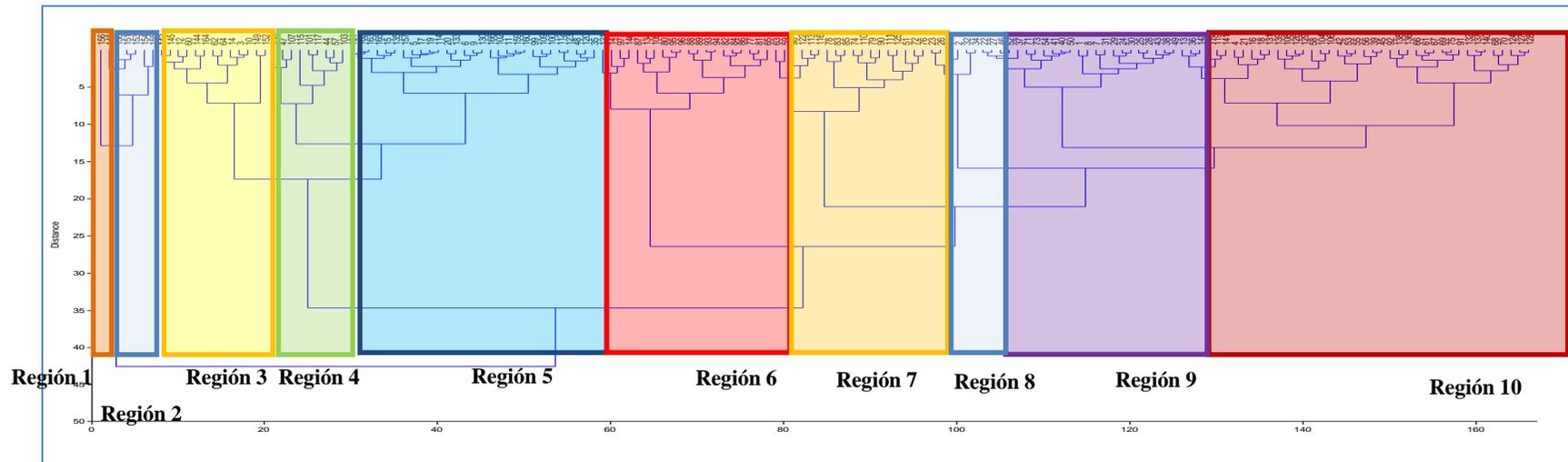


Figura 16. Método Ward – 10 regiones

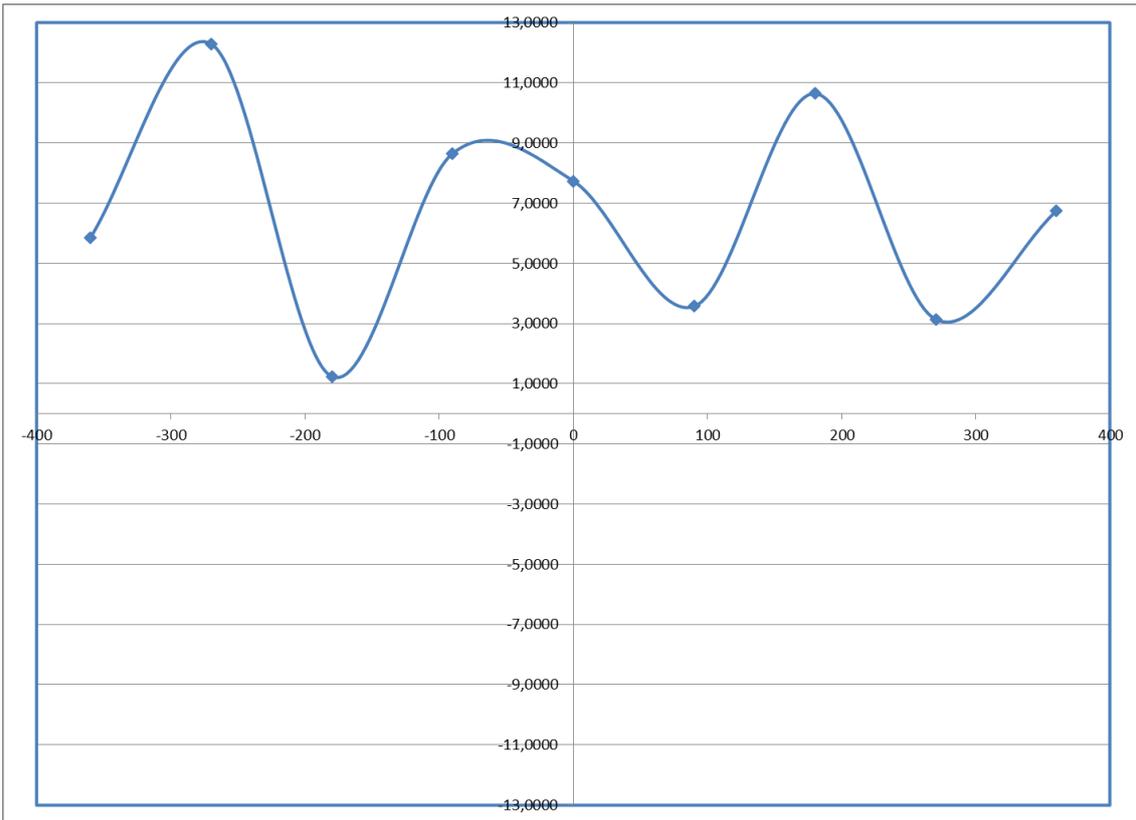


Figura 17. Curvas de Andrews Región 1

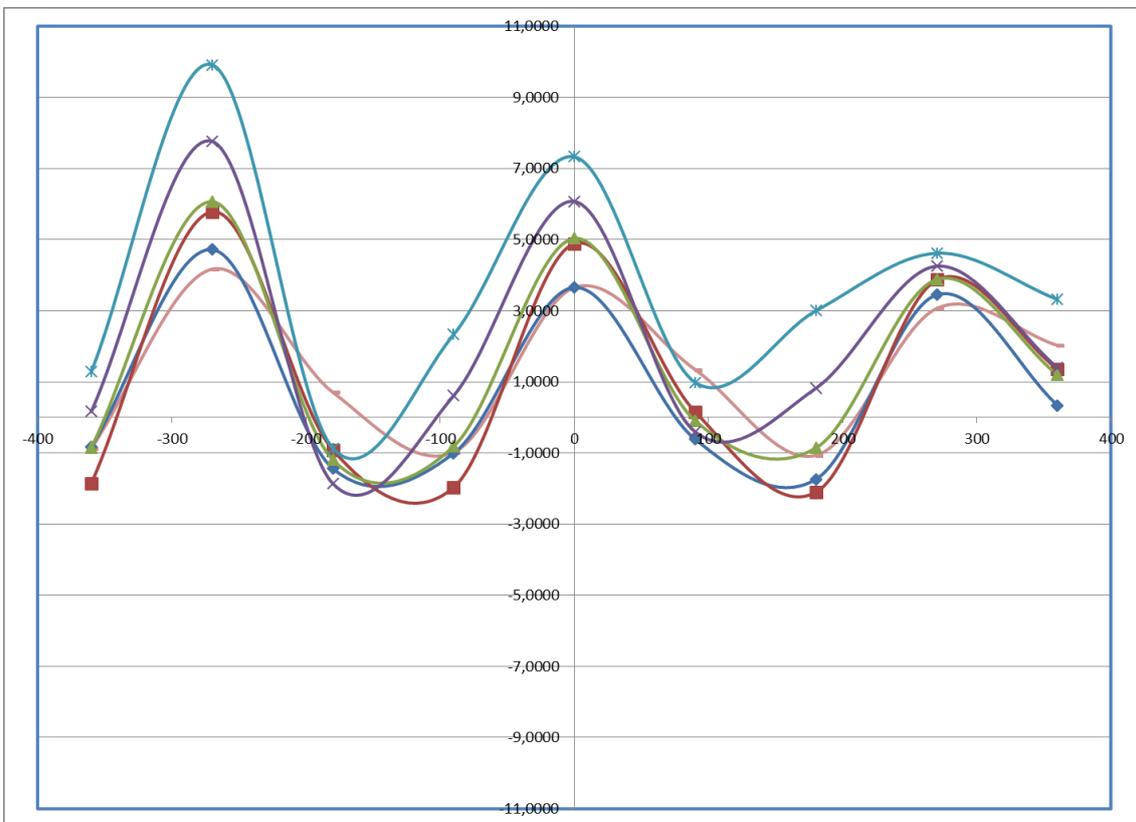


Figura 18. Curvas de Andrews Región 2

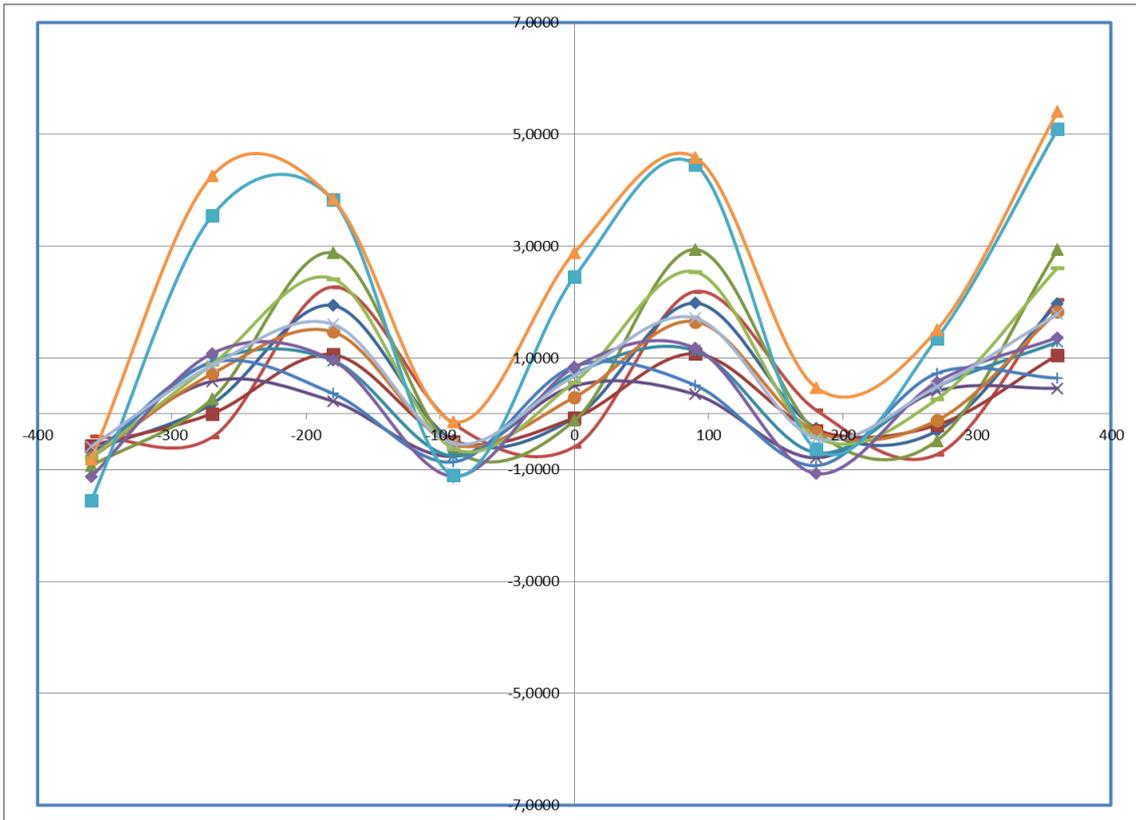


Figura 19. Curvas de Andrews Región 3

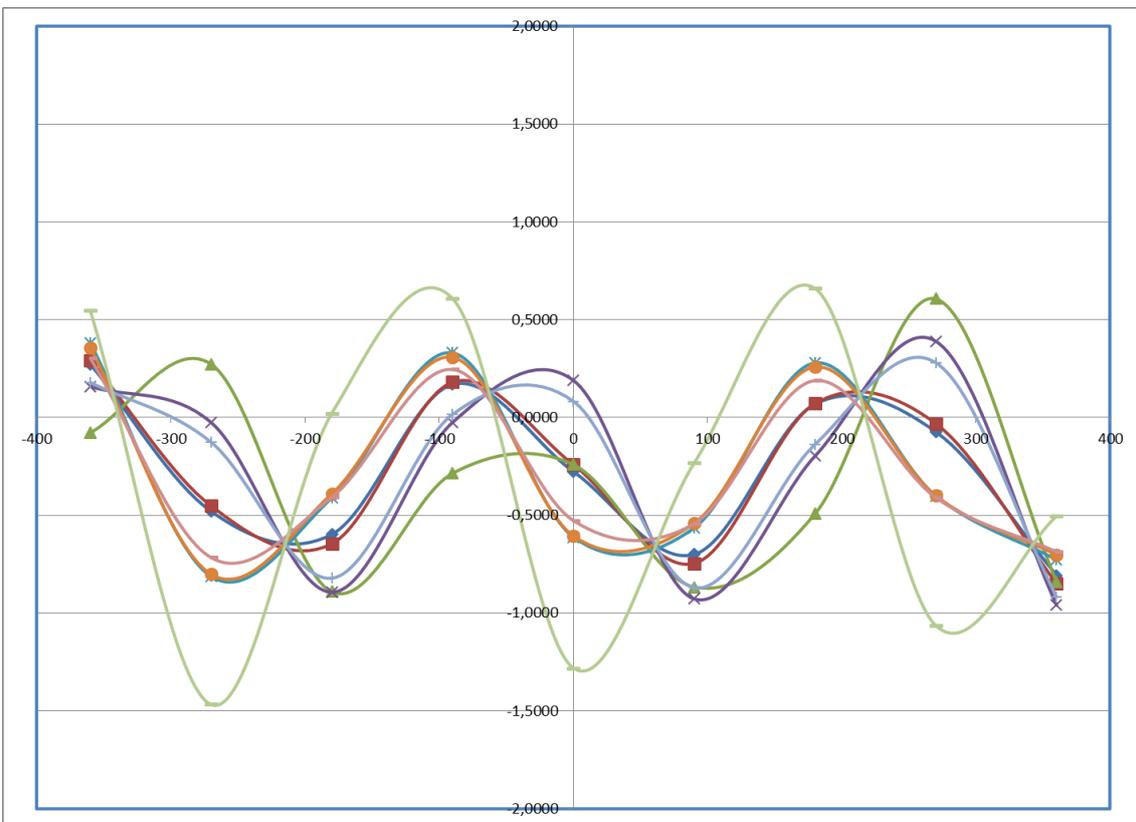


Figura 20. Curvas de Andrews Región 4

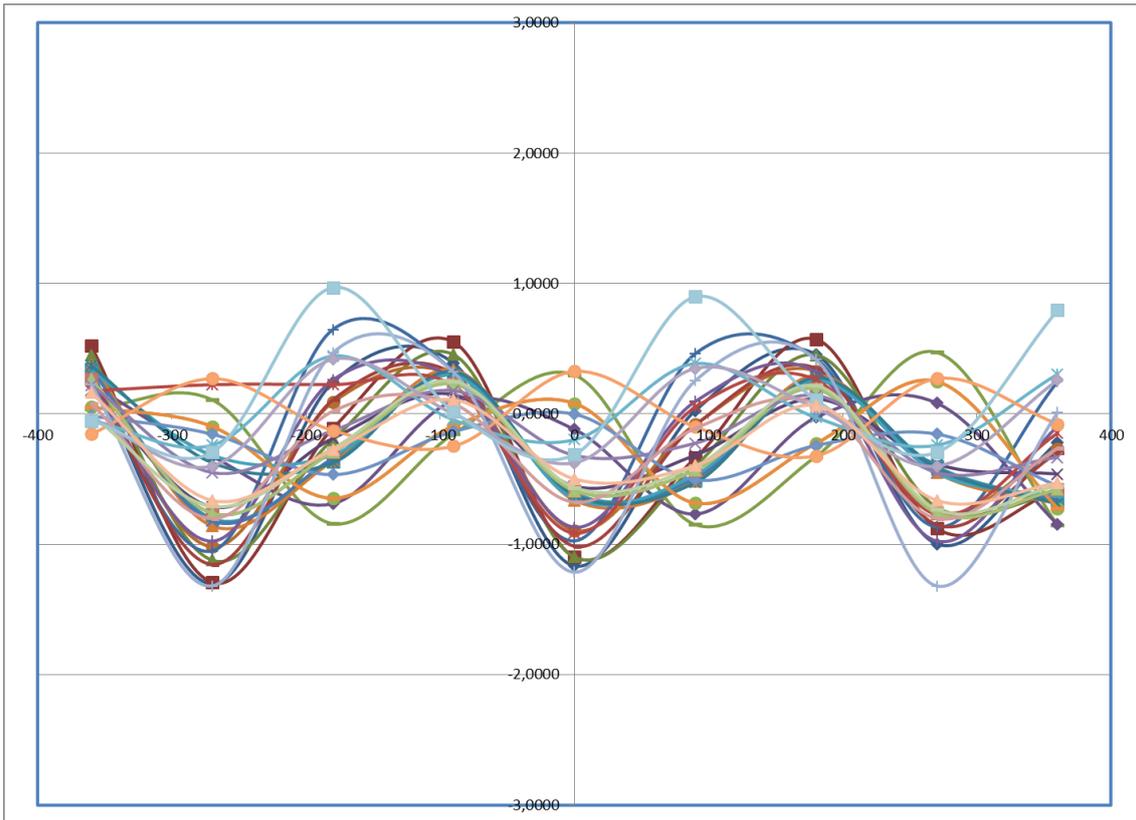


Figura 21. Curvas de Andrews Región 5

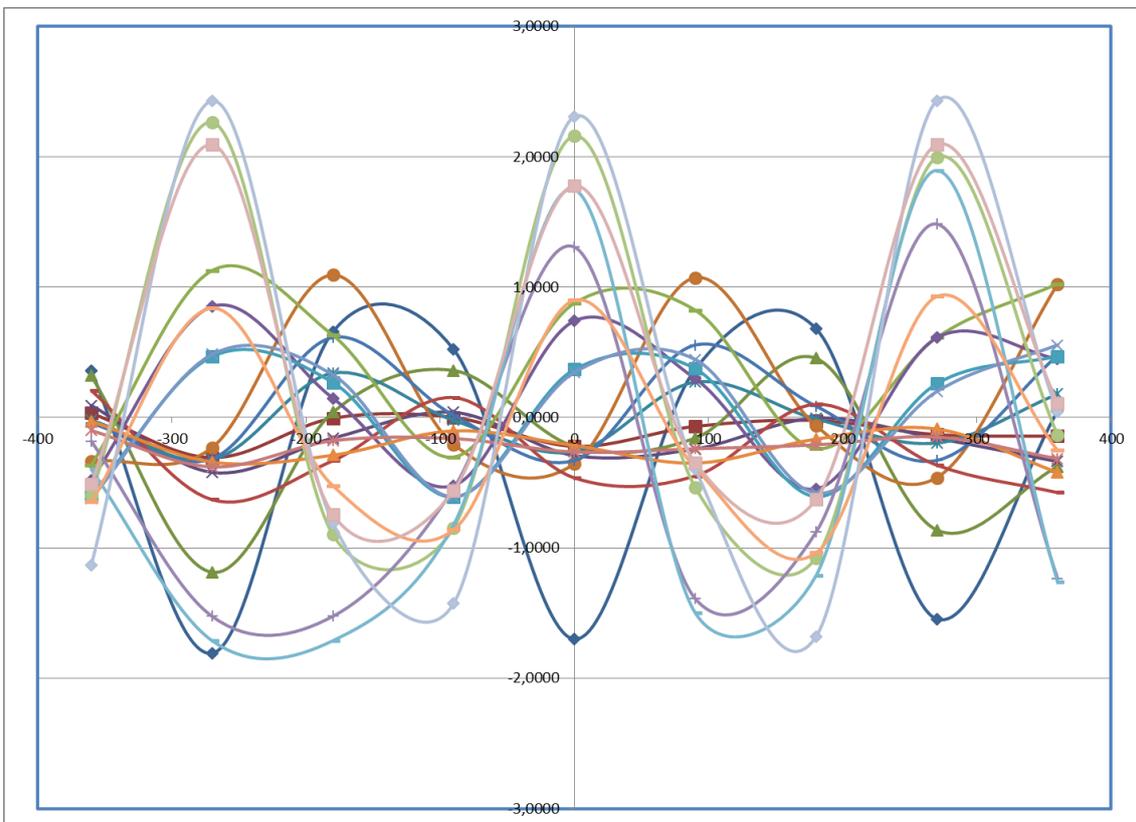


Figura 22. Curvas de Andrews Región 6

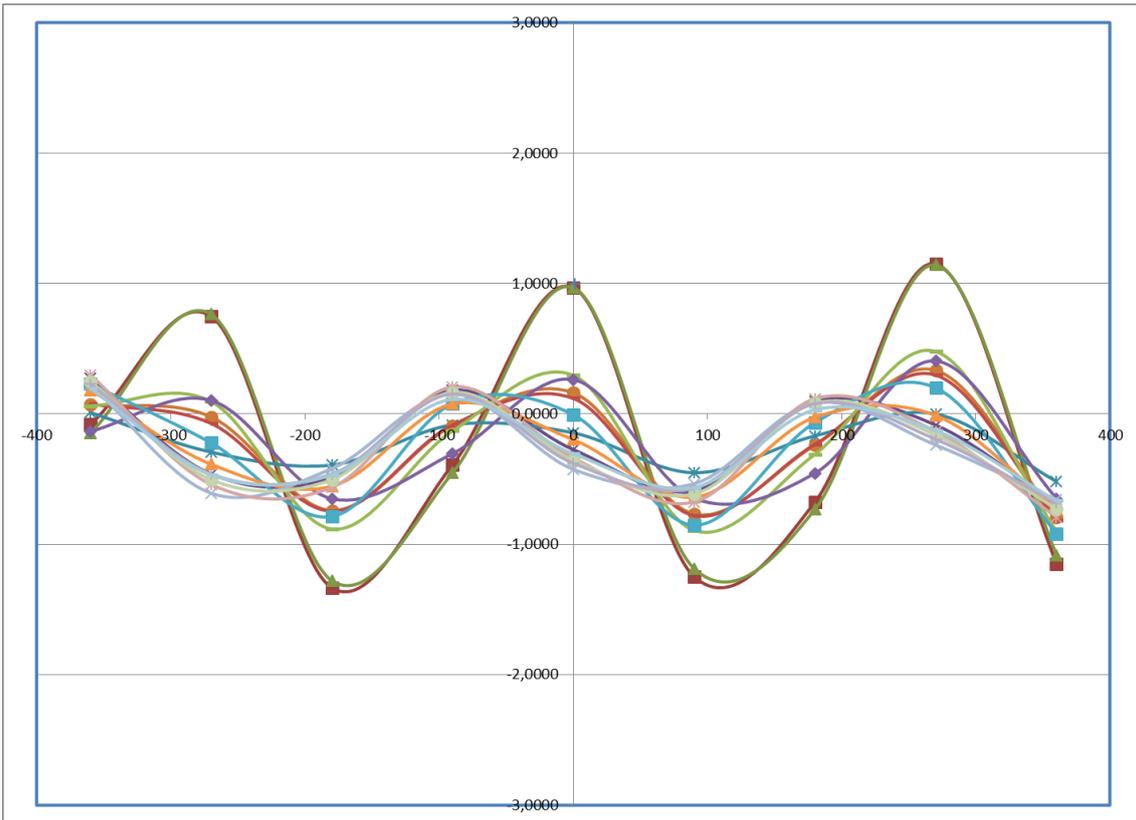


Figura 23. Curvas de Andrews Región 7

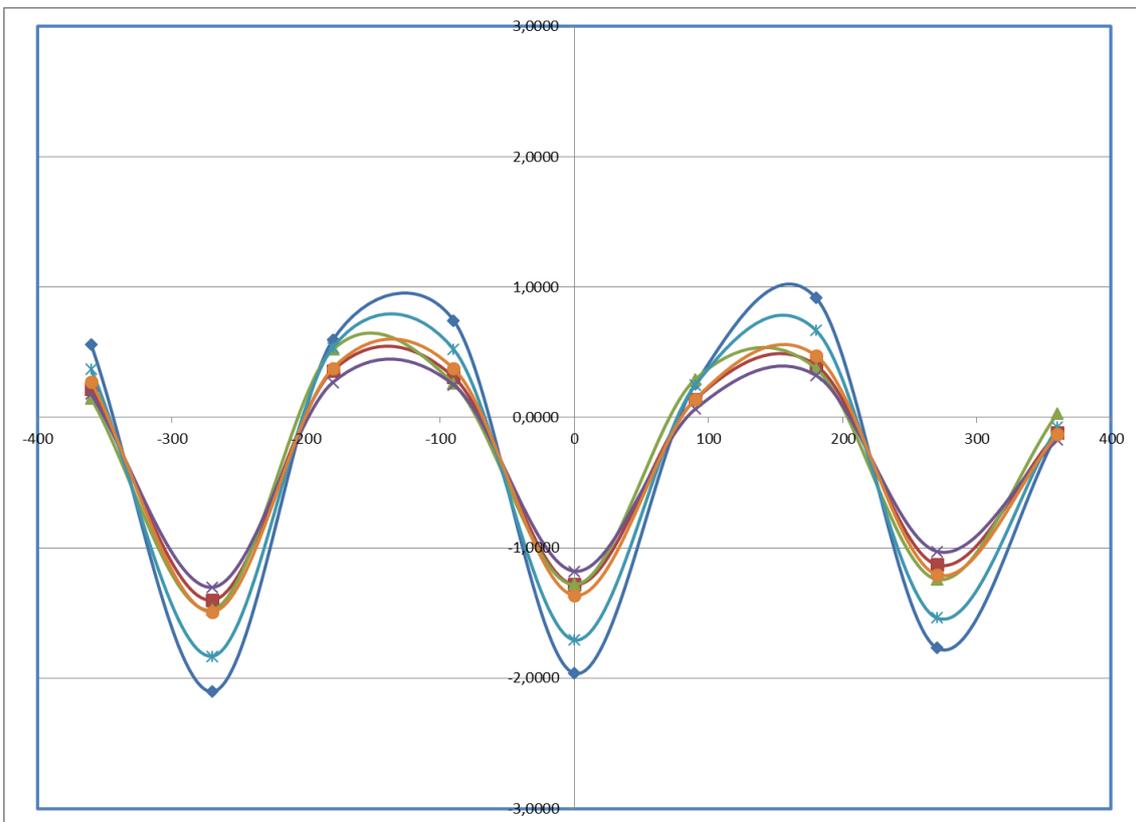


Figura 24. Curvas de Andrews Región 8

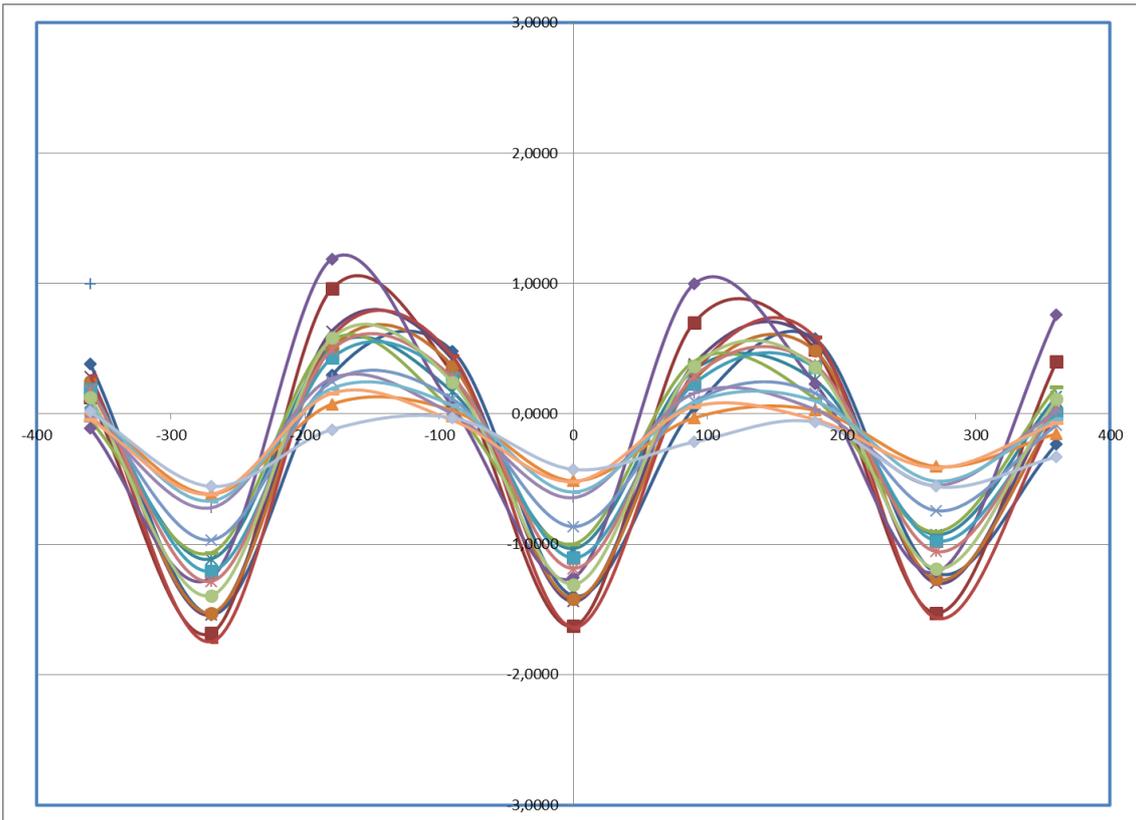


Figura 25. Curvas de Andrews Región 9

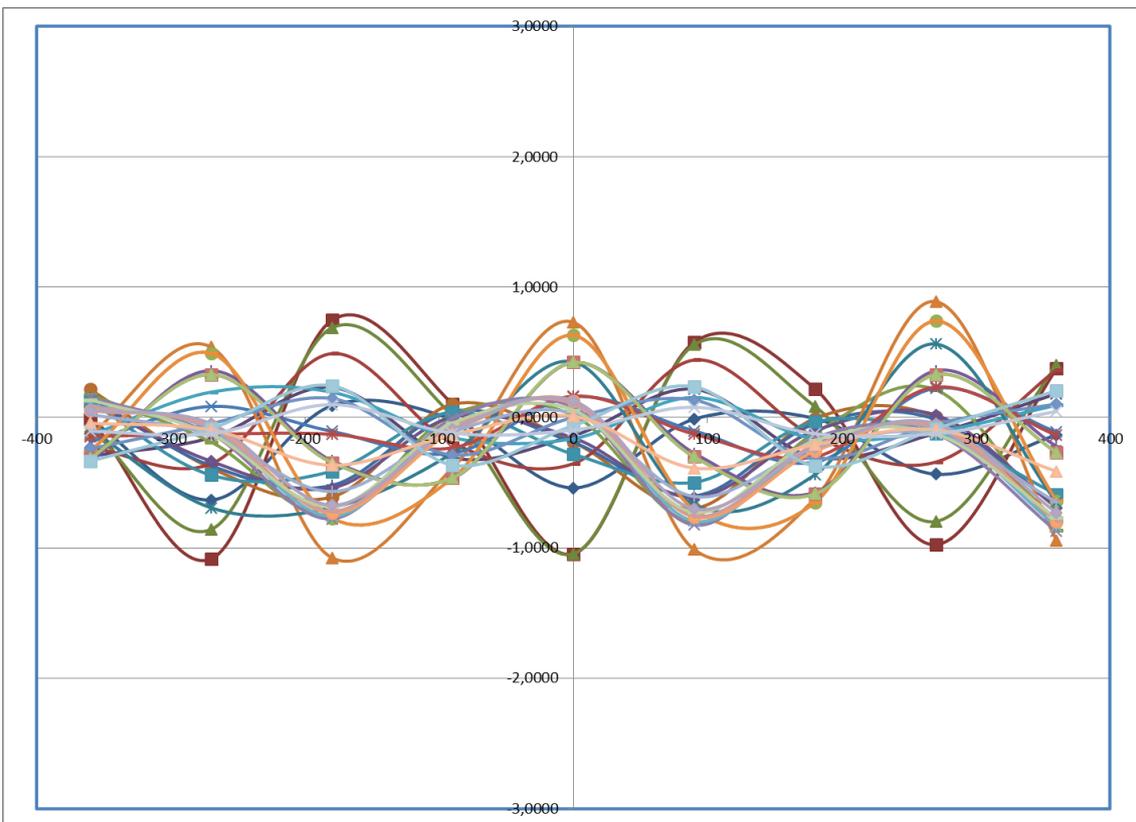


Figura 26. Curvas de Andrews Región 10

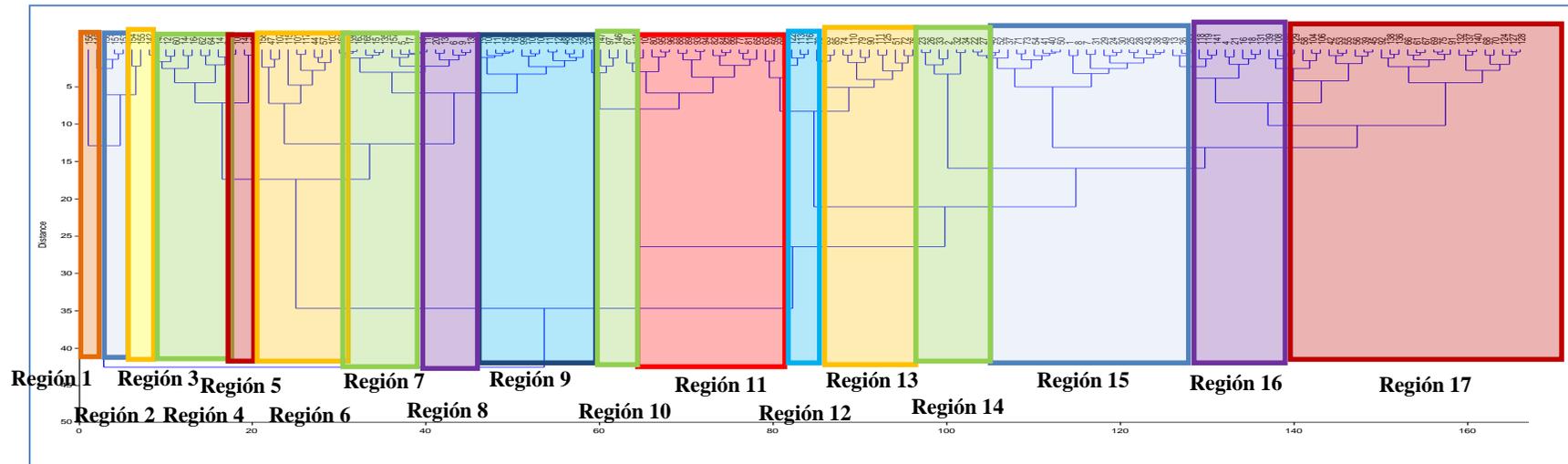


Figura 27. Método Ward – 17 regiones

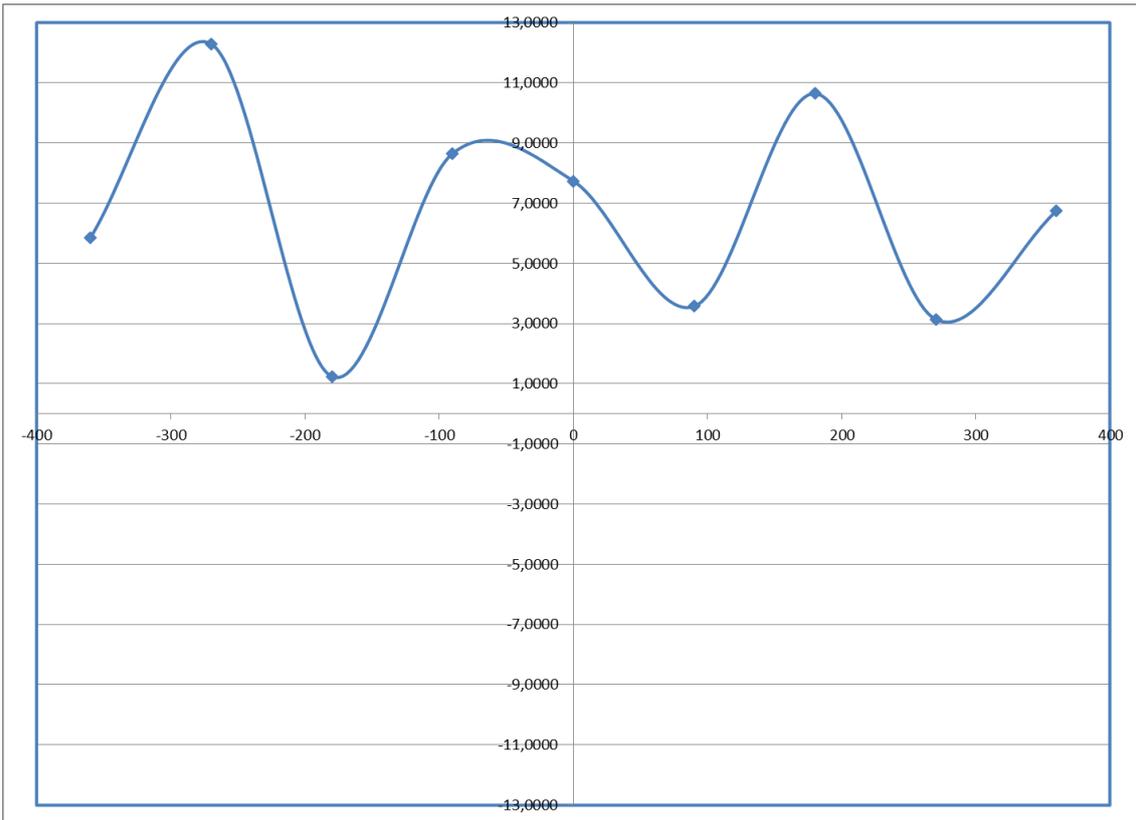


Figura 28. Curvas de Andrews Región 1

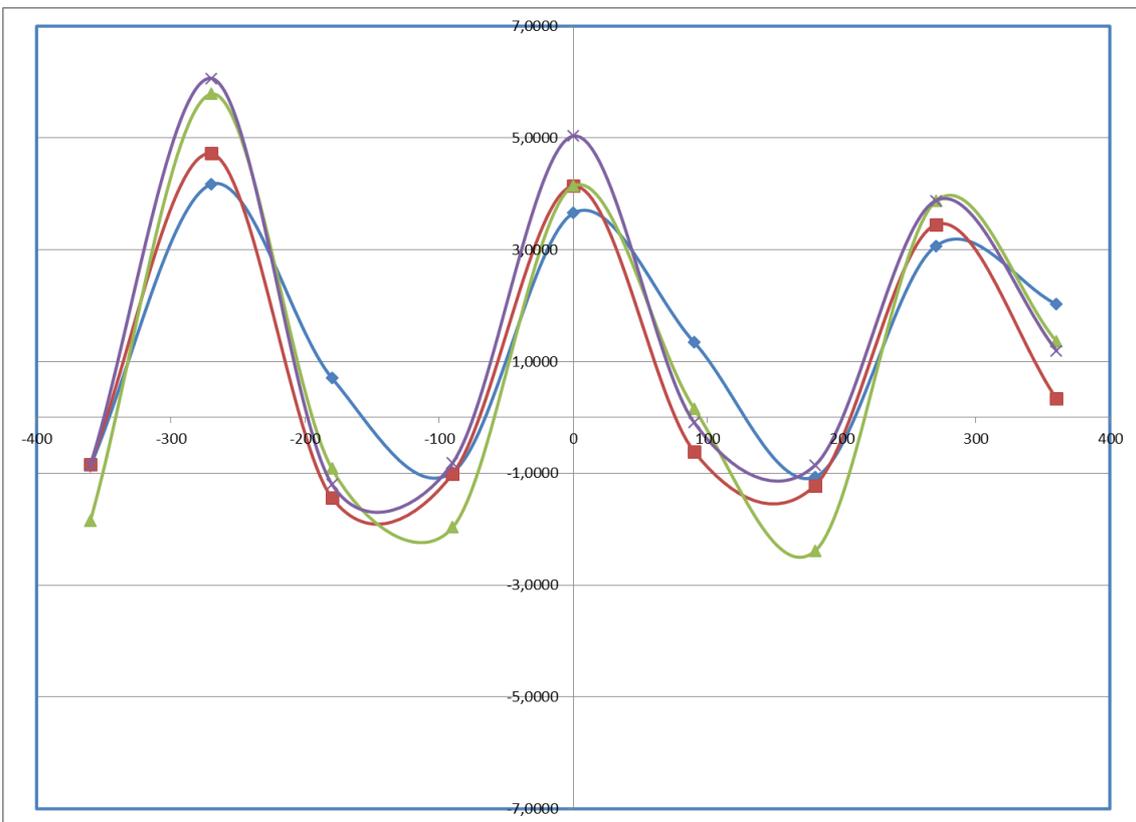


Figura 29. Curvas de Andrews Región 2

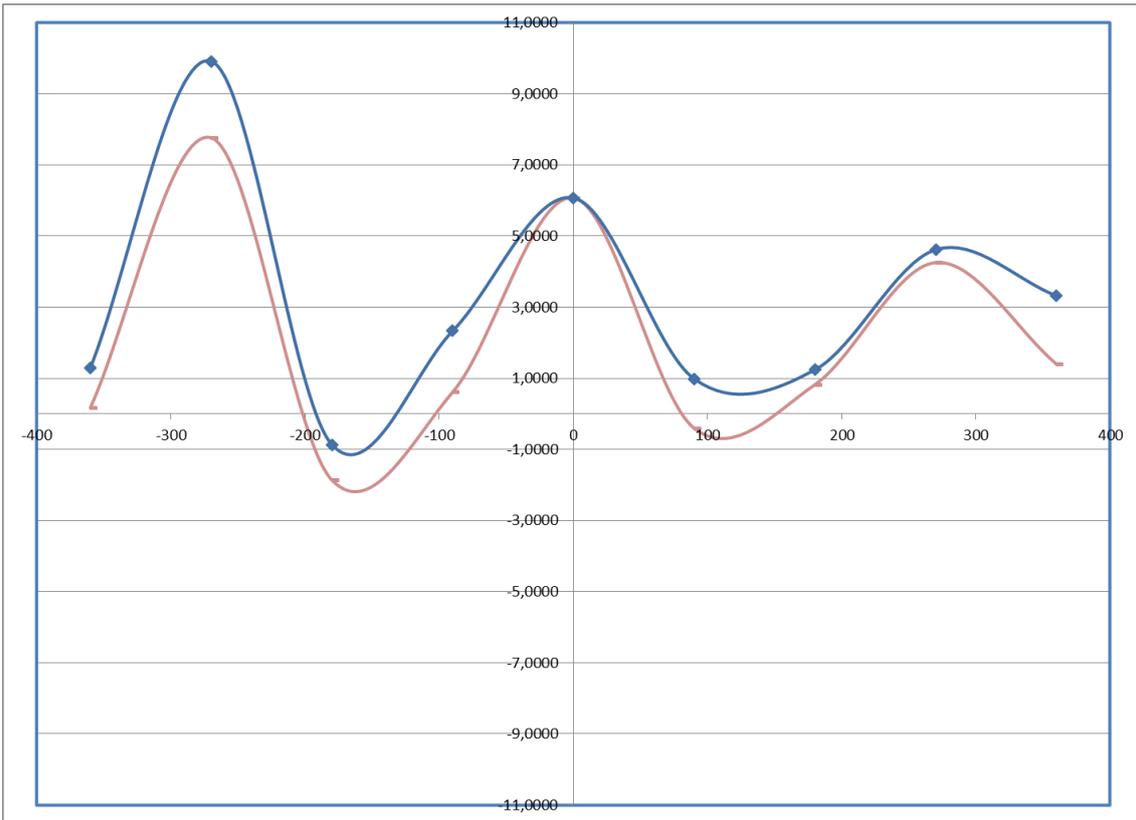


Figura 30. Curvas de Andrews Región 3

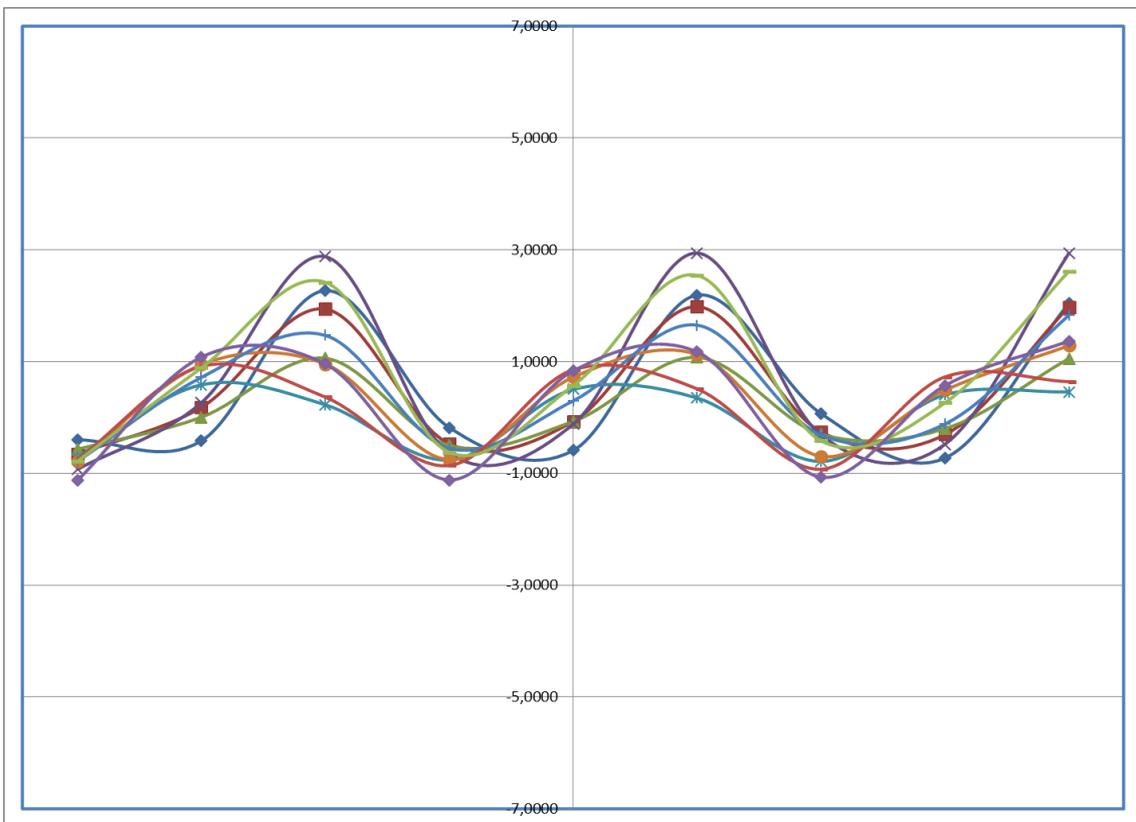


Figura 31. Curvas de Andrews Región 4

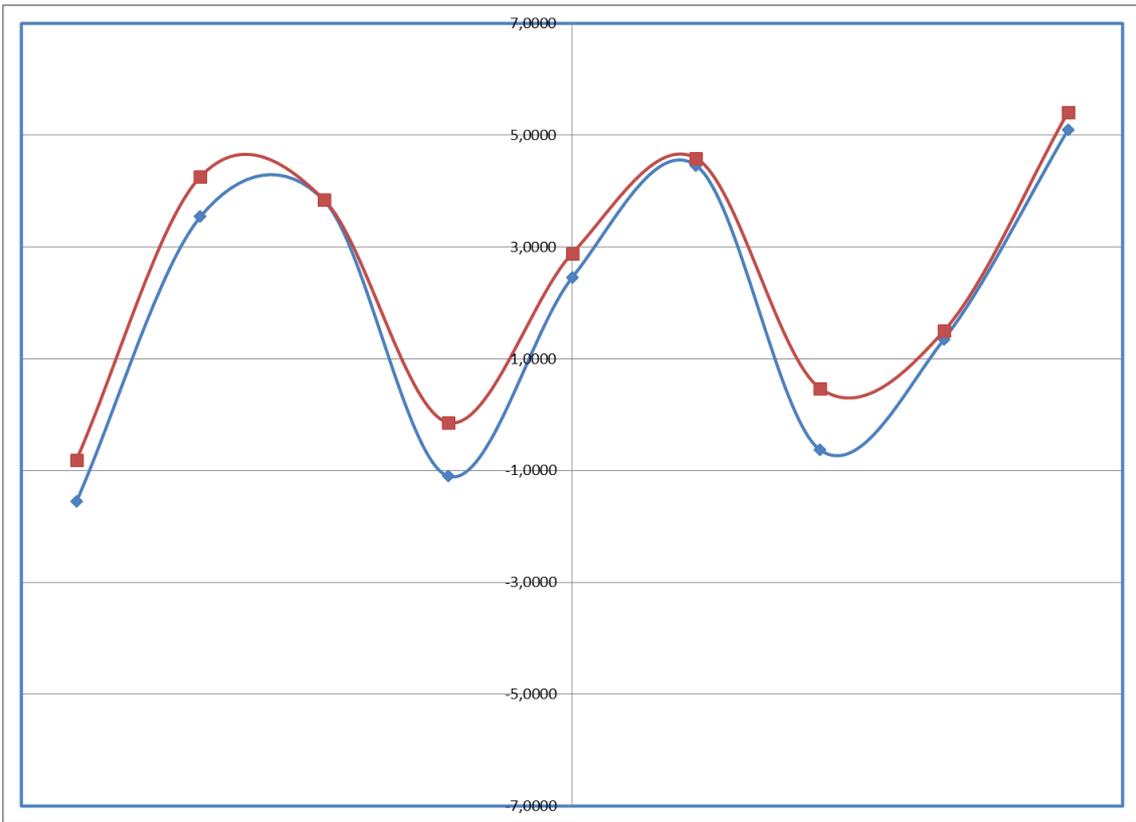


Figura 32. Curvas de Andrews Región 5

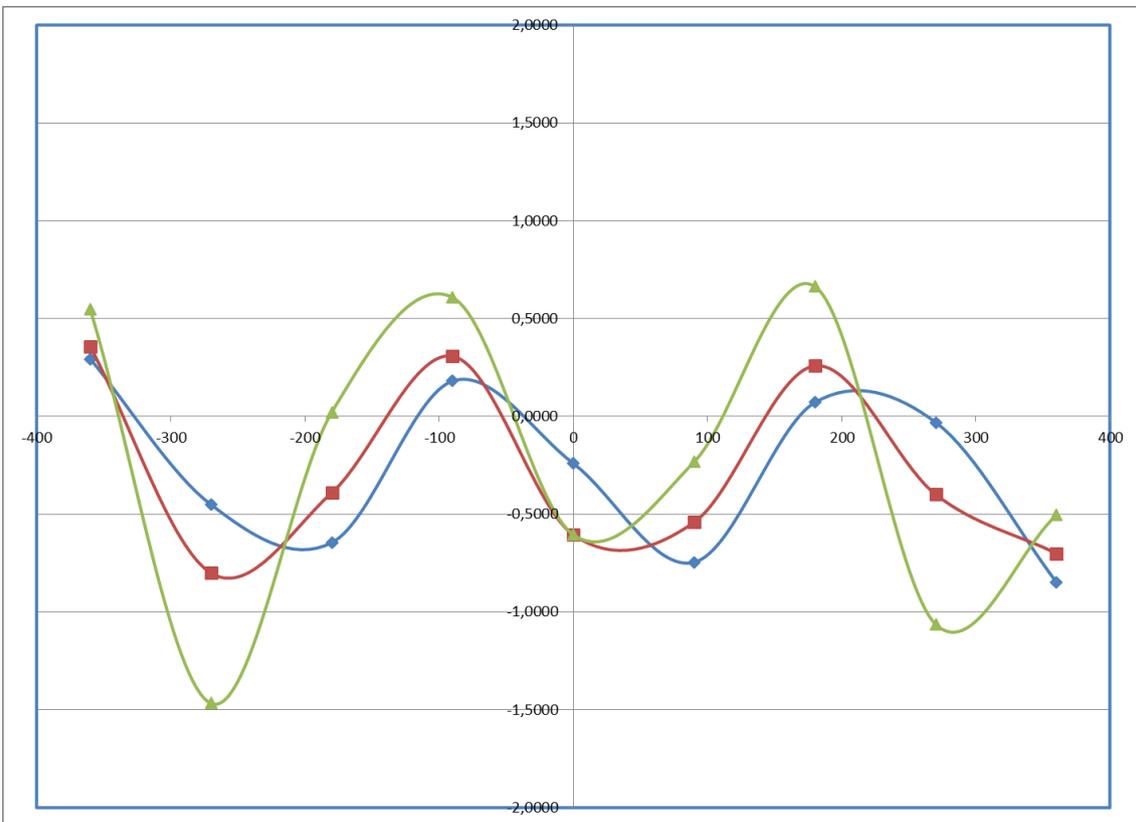


Figura 33. Curvas de Andrews Región 6

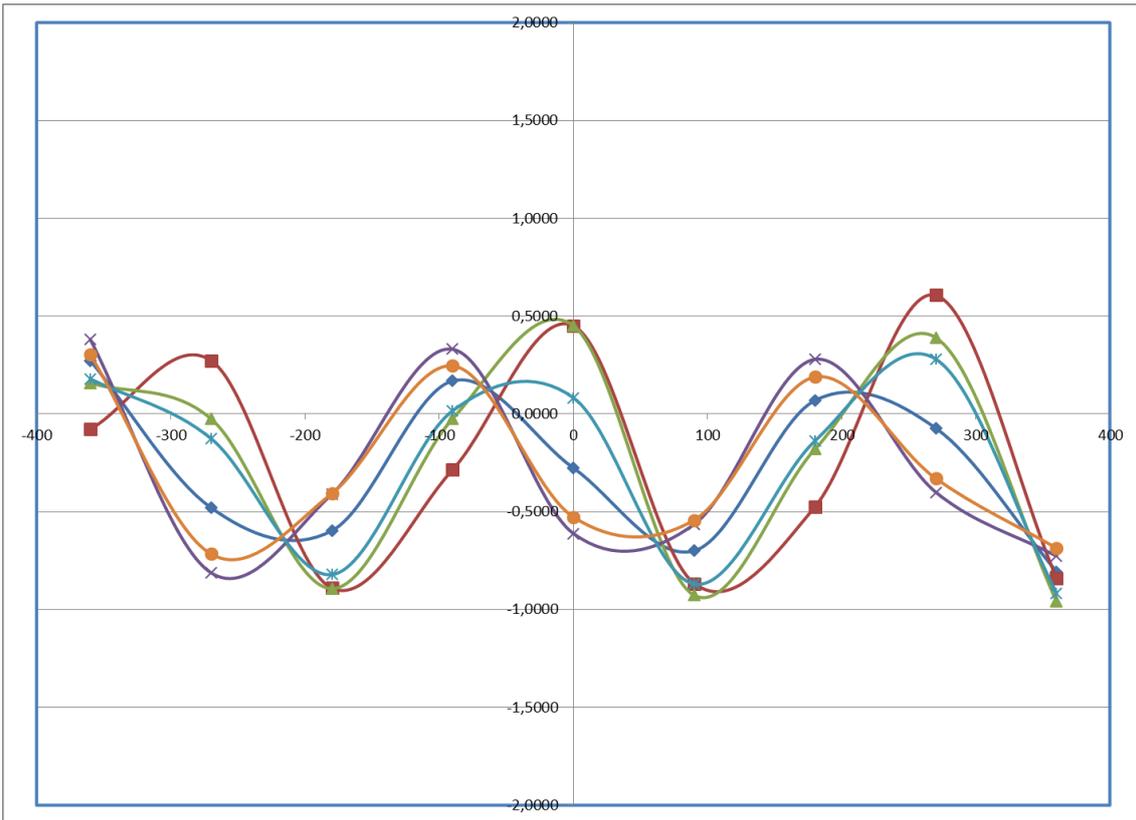


Figura 34. Curvas de Andrews Región 7

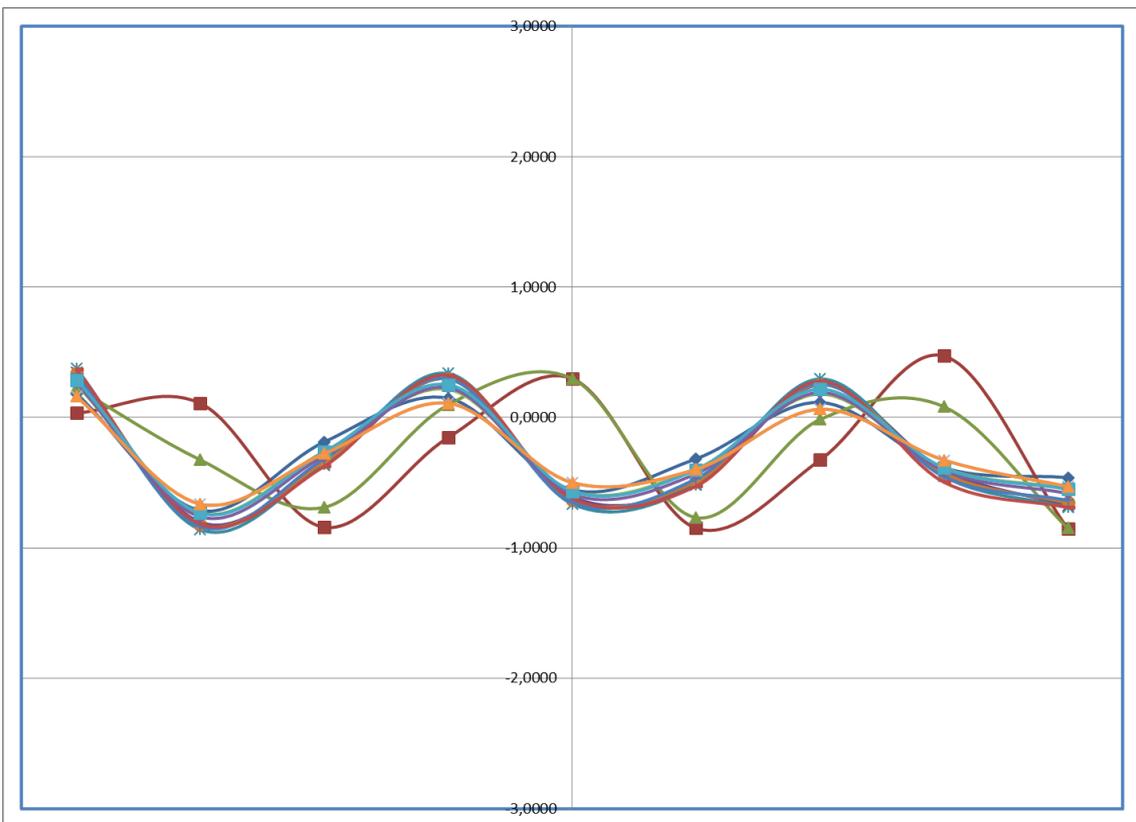


Figura 35. Curvas de Andrews Región 8

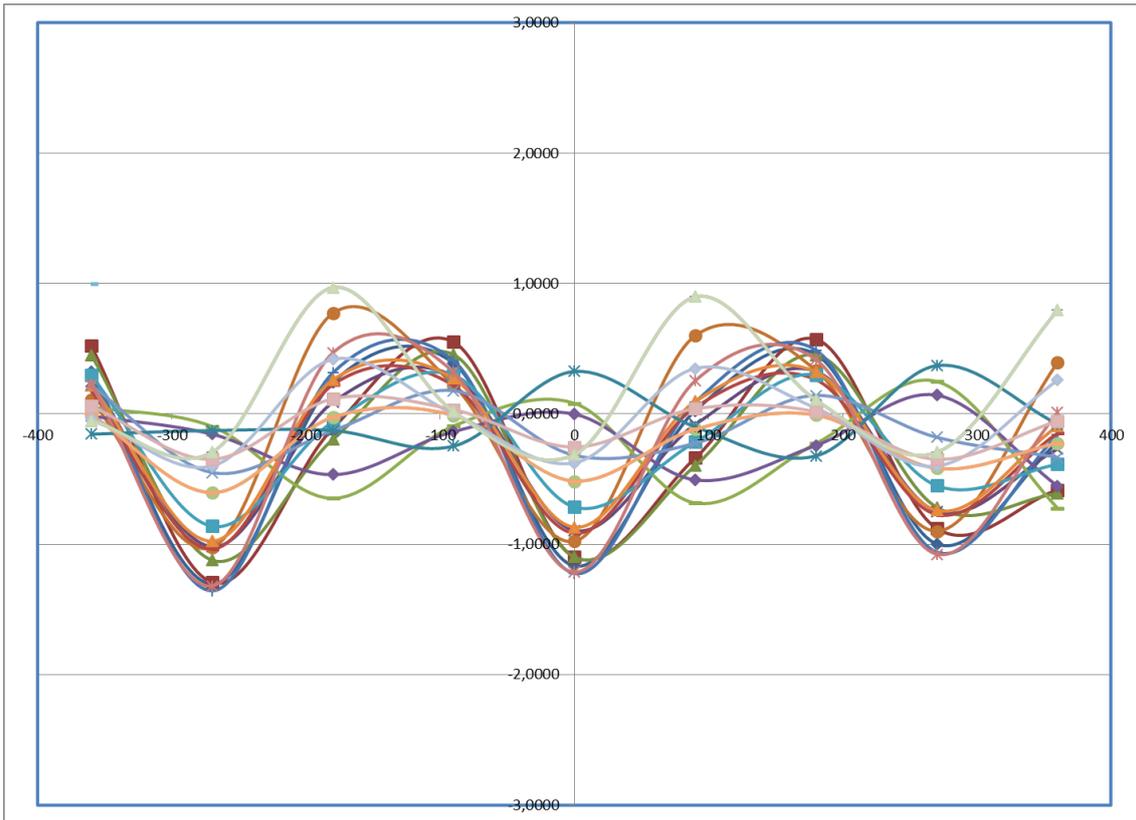


Figura 36. Curvas de Andrews Región 9

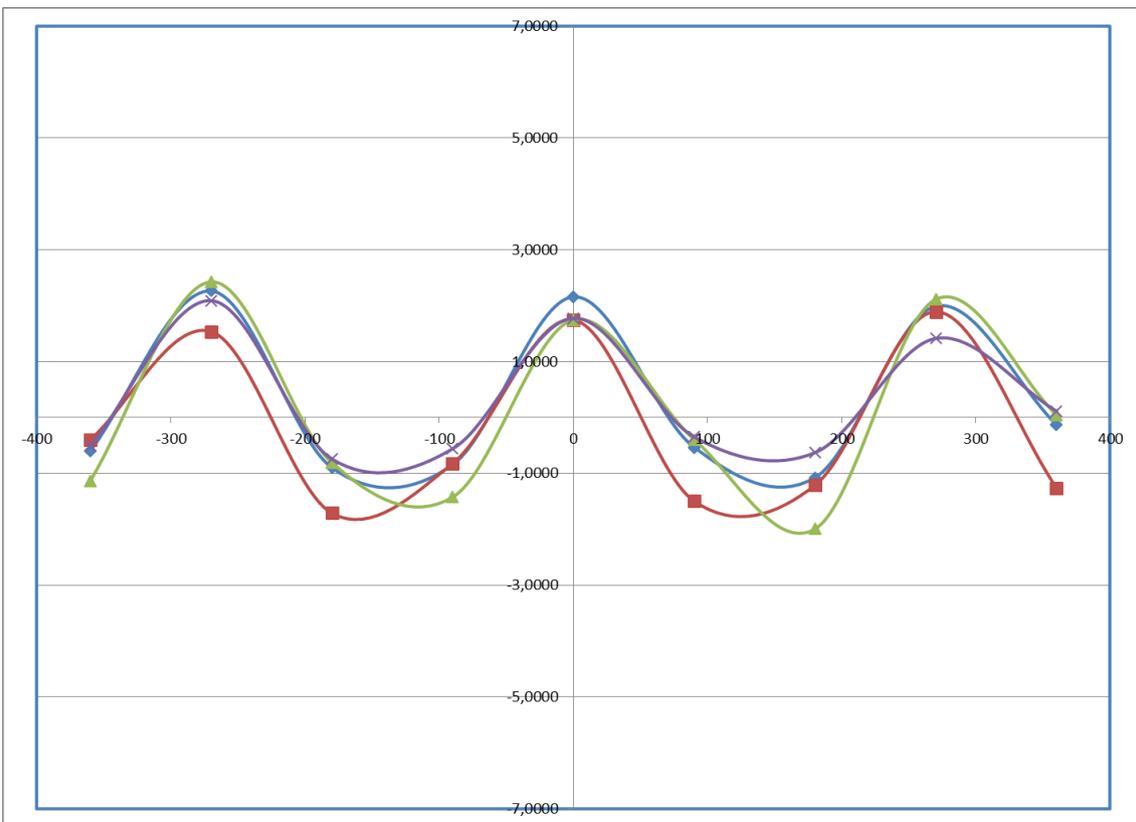


Figura 37. Curvas de Andrews Región 10

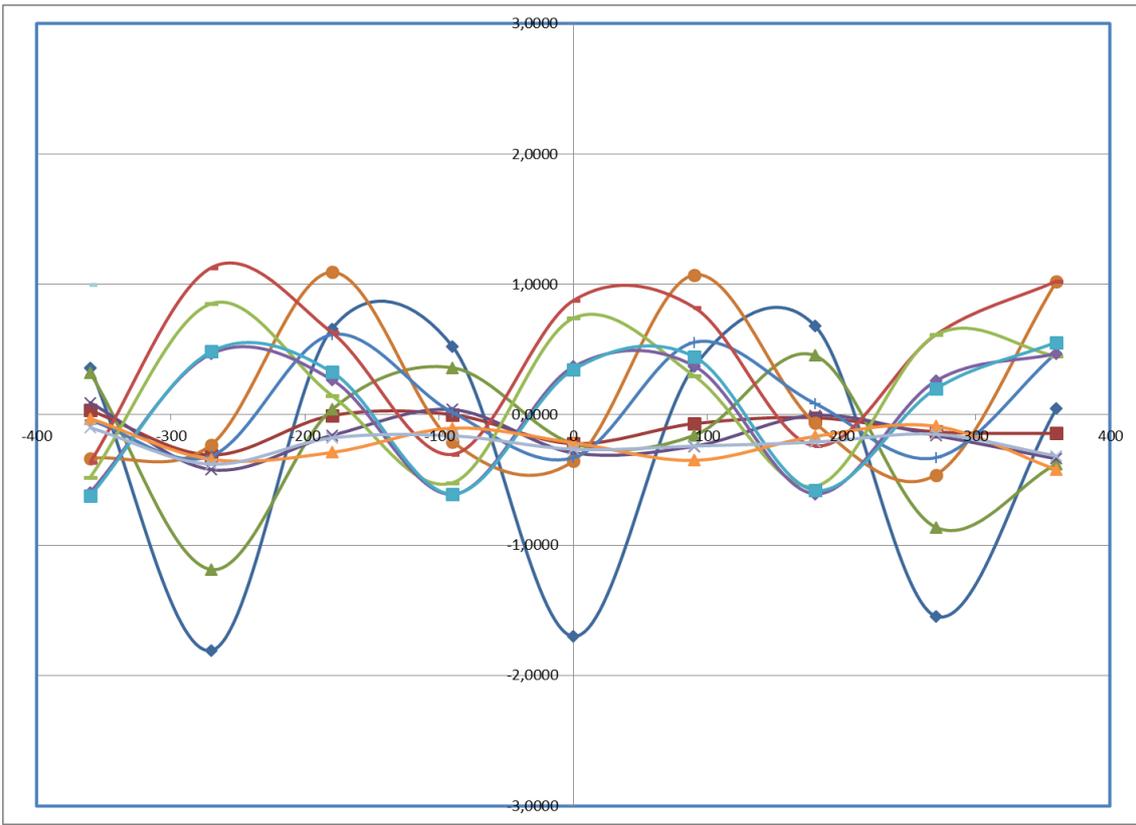


Figura 38. Curvas de Andrews Región 11

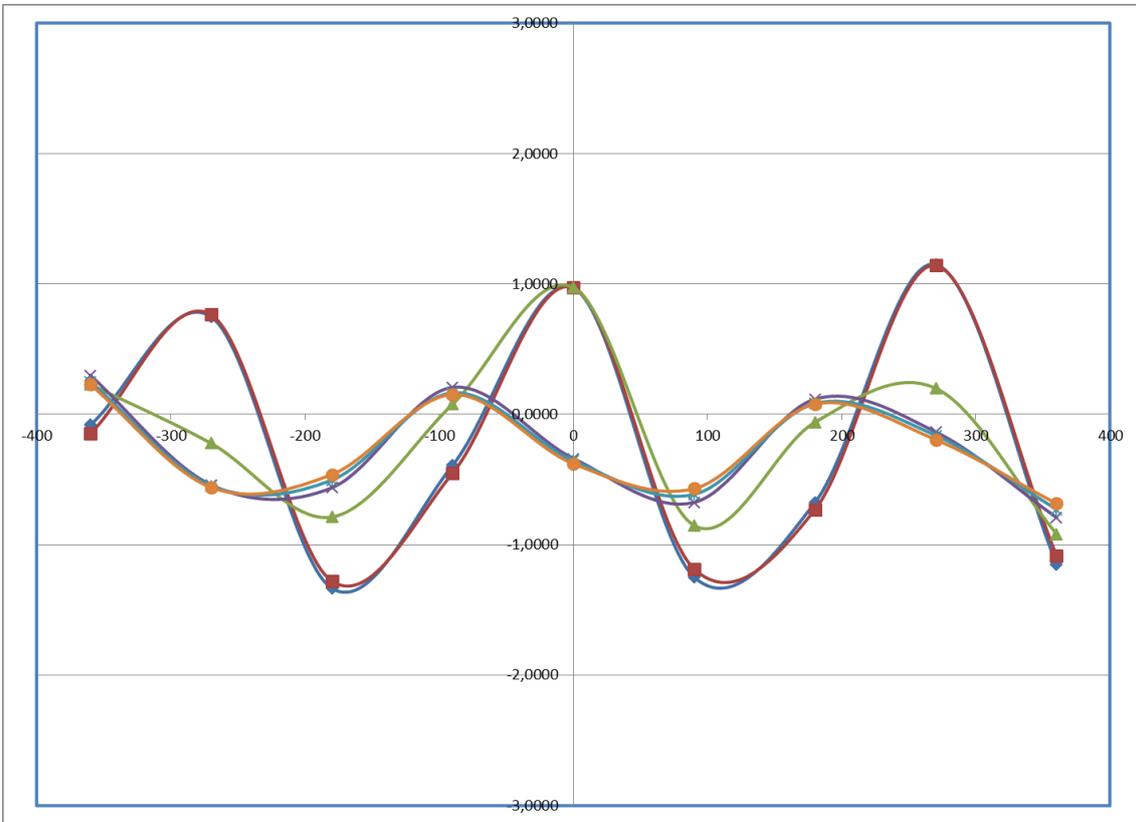


Figura 39. Curvas de Andrews Región 12

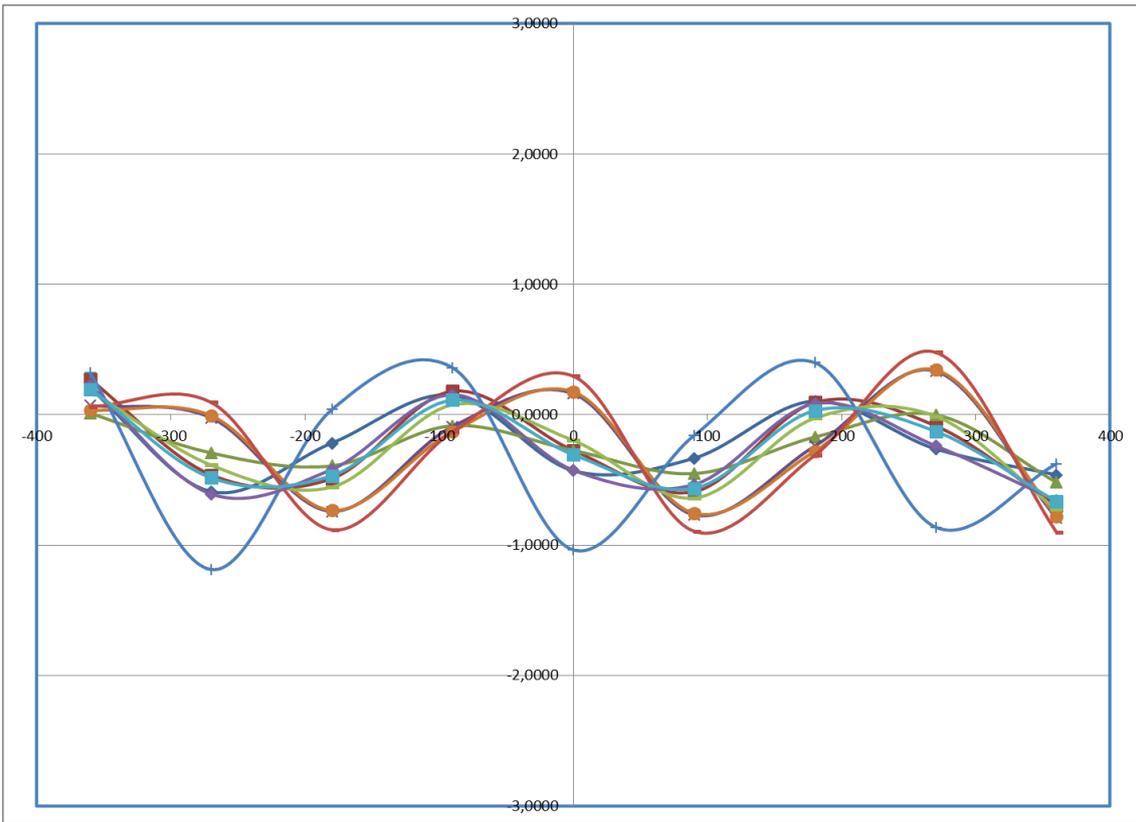


Figura 40. Curvas de Andrews Región 13

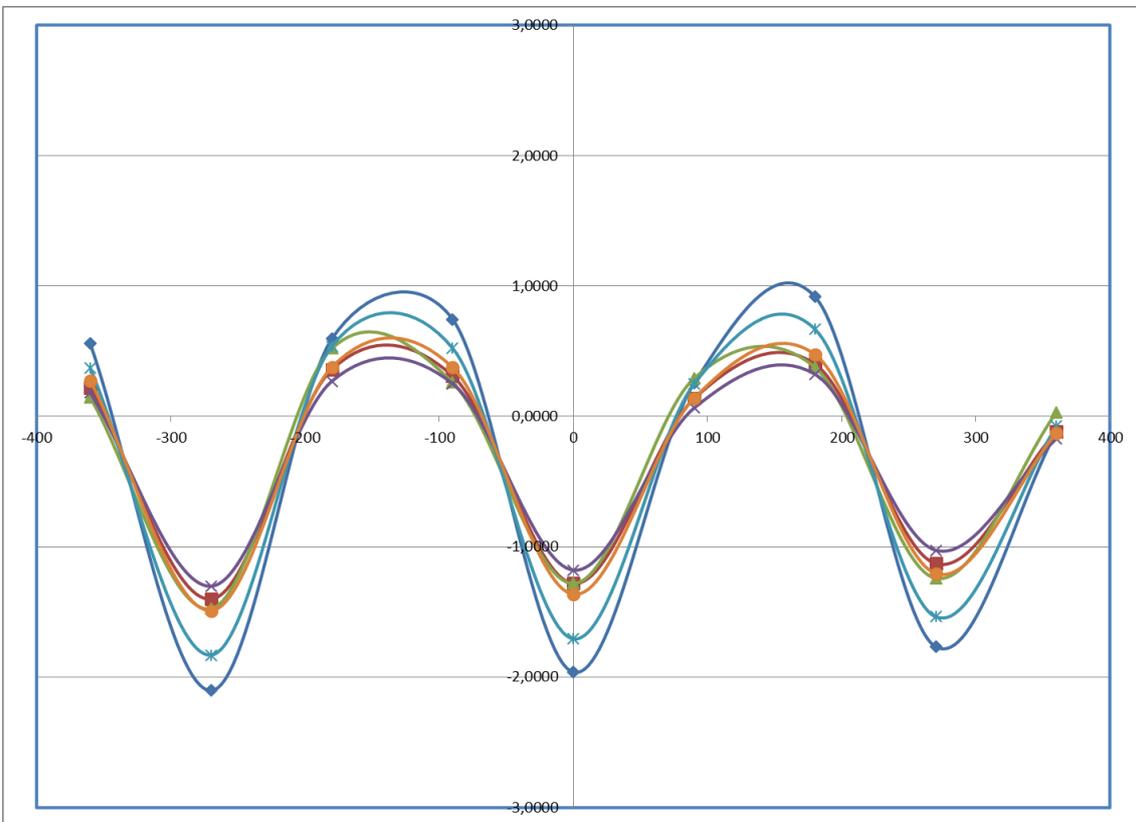


Figura 41. Curvas de Andrews Región 14

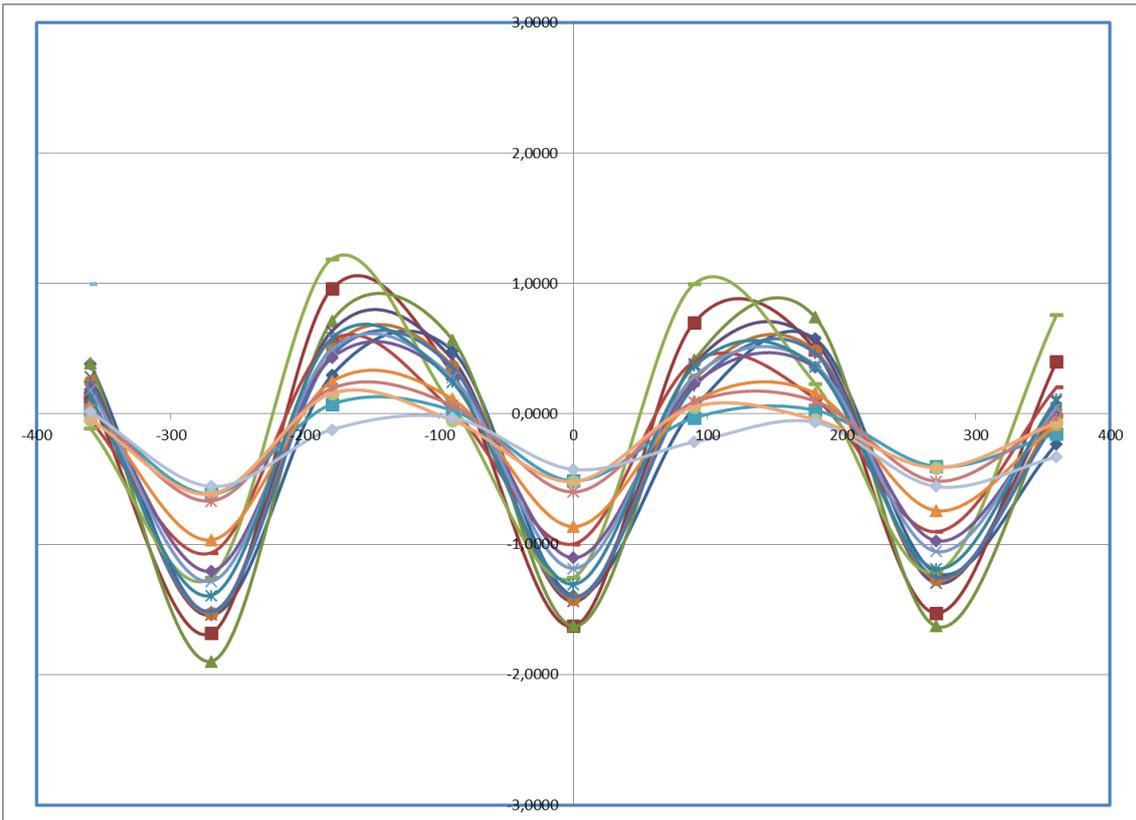


Figura 42. Curvas de Andrews Región 15

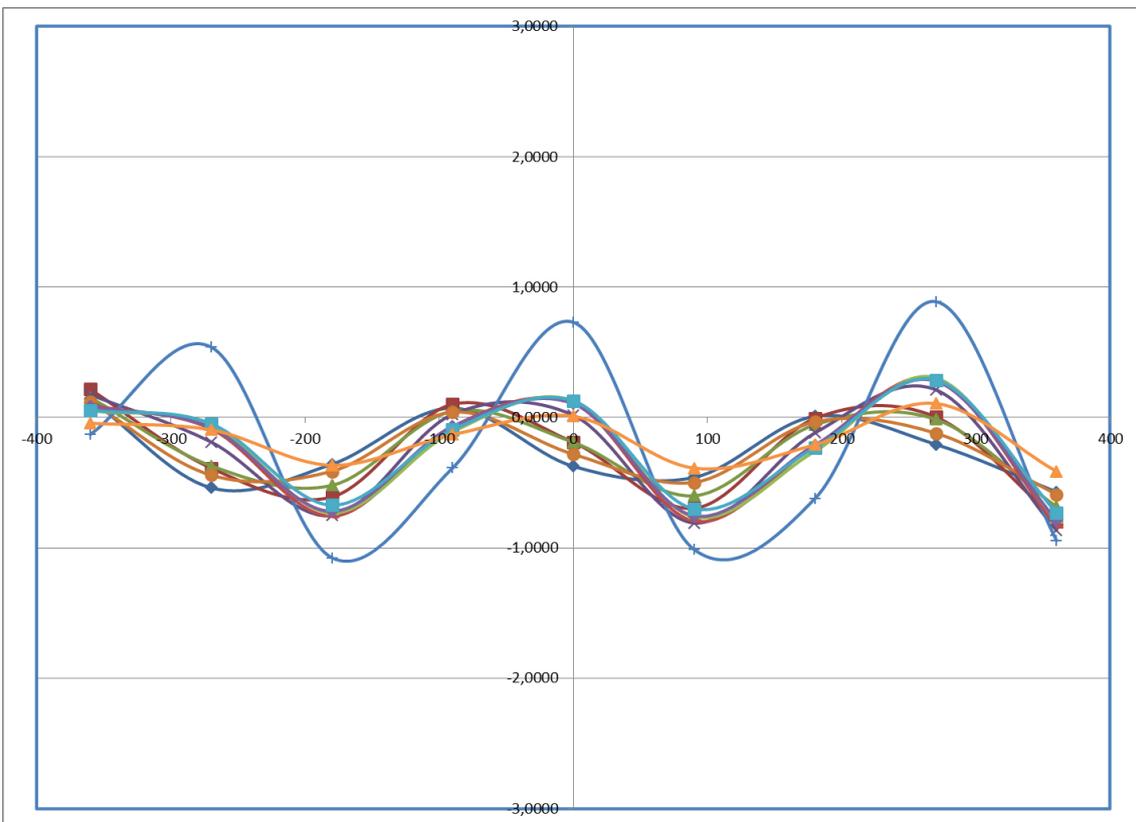


Figura 43. Curvas de Andrews Región 16

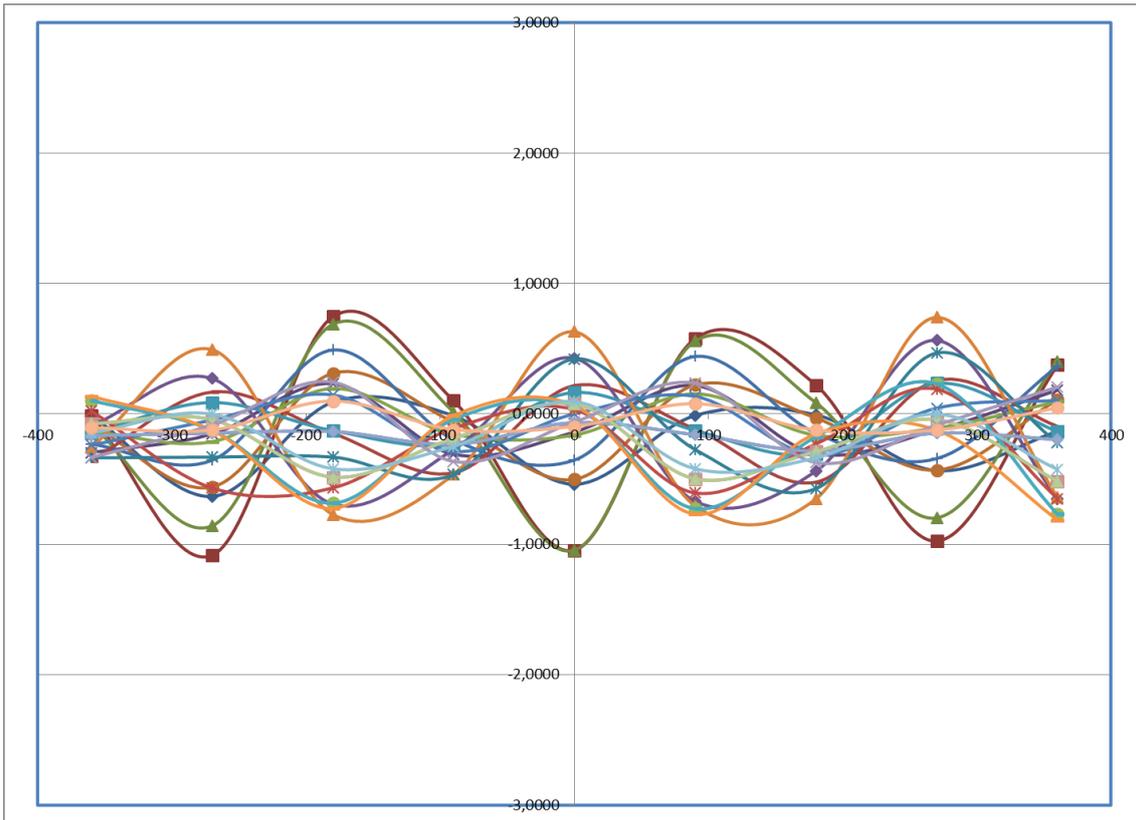


Figura 44. Curvas de Andrews Región 17

REGIONALIZACIÓN EN CUENCA DEL RÍO URUGUAY

La Figura 45 ilustra el resultado del análisis agrupamiento entre variables (modo R), utilizando el Método Ward. En este caso las variables disponibles fueron: Área, Perímetro, Índice de compacidad (K_c), Relación de circularidad (C); Relación de elongación (E) y Tiempo de concentración estimado por la ecuación de Kirpich (T_c Kirpich, en hs).

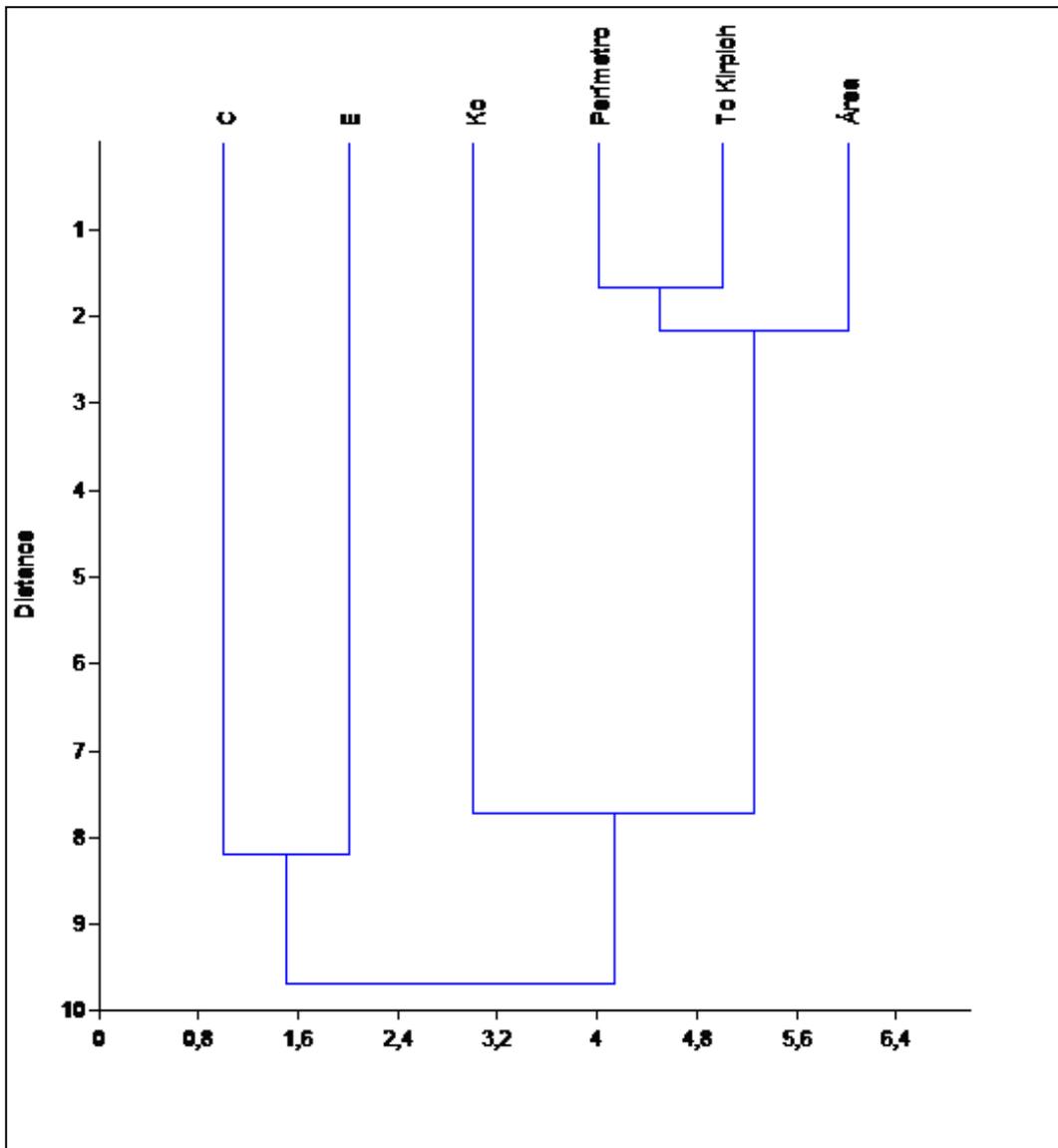


Figura 45. Modo R – Método Ward

Se observa que el área de aporte de la cuenca guarda una relación estrecha con otra de sus características físicas (el Perímetro) y con el Tiempo de concentración estimado por la

ecuación de Kirpich (T_c Kirpich, en hs), que refiere a la respuesta hidrológica de la cuenca.

La Tabla 12 muestra los autovalores y varianza representada por cada uno de los ejes definidos en el Análisis de Componentes Principales. En este caso, siguiendo los mismos criterios de selección utilizados en el análisis de las cuencas de Perú, se ha decidido considerar 3 componentes principales. La varianza total representada en este caso es del 99,31%. La Tabla 13 muestra los coeficientes de carga con los que contribuye cada una de las variables originalmente consideradas en la definición de estos tres ejes principales. Se han señalado en **negritas** las cargas que señalan la mayor contribución en cada eje. Se observa que el orden de importancia de las variables intervinientes está dado por: área y el perímetro de la cuenca y el tiempo de concentración. Estas variables definen la Componente Principal 1, de mayor representatividad en términos de varianza (53%, según Tabla 12).

Tabla 12. Resultados del ACP

Orden	Autovalor	Varianza
1	3,1611300	53,685
2	1,7719300	29,532
3	0,9656020	16,093
4	0,0593868	0,9897
5	0,0280809	0,46811
6	0,013869	0,23116

Tabla 13. Resultados del ACP

Variable	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Comunalidad
Área_(km ²)	0,498	0,298	0,151	0,90
Perímetro (km)	0,538	0,163	0,160	0,74
Índice de compacidad (Kc)	0,271	-0,651	0,028	0,12
Relación de circularidad (C)	-0,284	0,640	-0,019	0,11
Relación de elongación (E)	-0,160	-0,033	0,970	0,60
Tiempo de concentración estimado por la ecuación de Kirpich (Tc Kirpich)	0,531	0,220	-0,036	0,51

La Figura 46 presenta el resultado del agrupamiento en modo Q para las cuencas. Considerando los resultados del ACP anteriormente presentados se han definido 3 Regiones. Las Figuras 47 a 49 ilustran las curvas de Andrews para cada una de ellas.

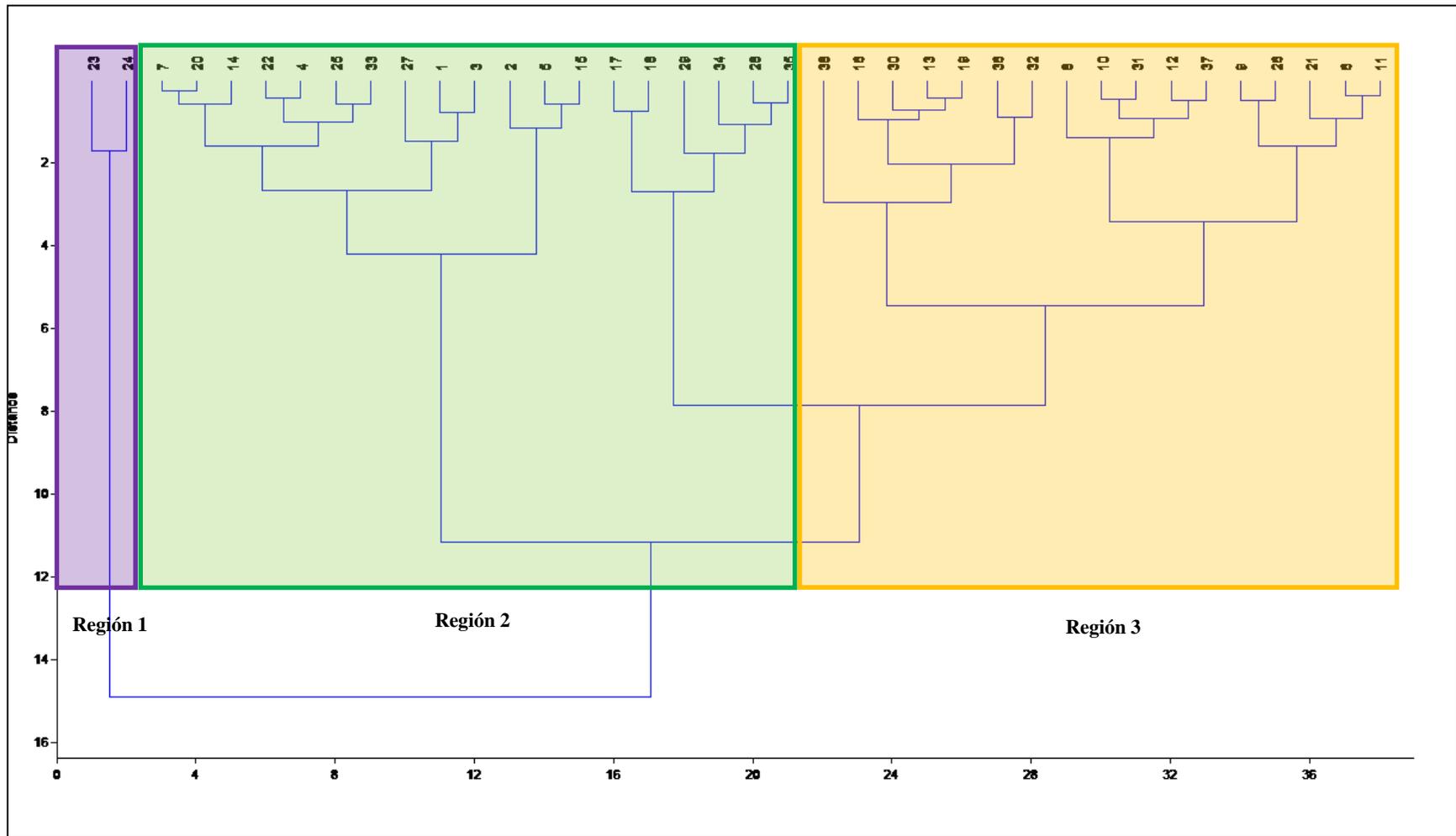


Figura 46. Modo Q – Método Ward

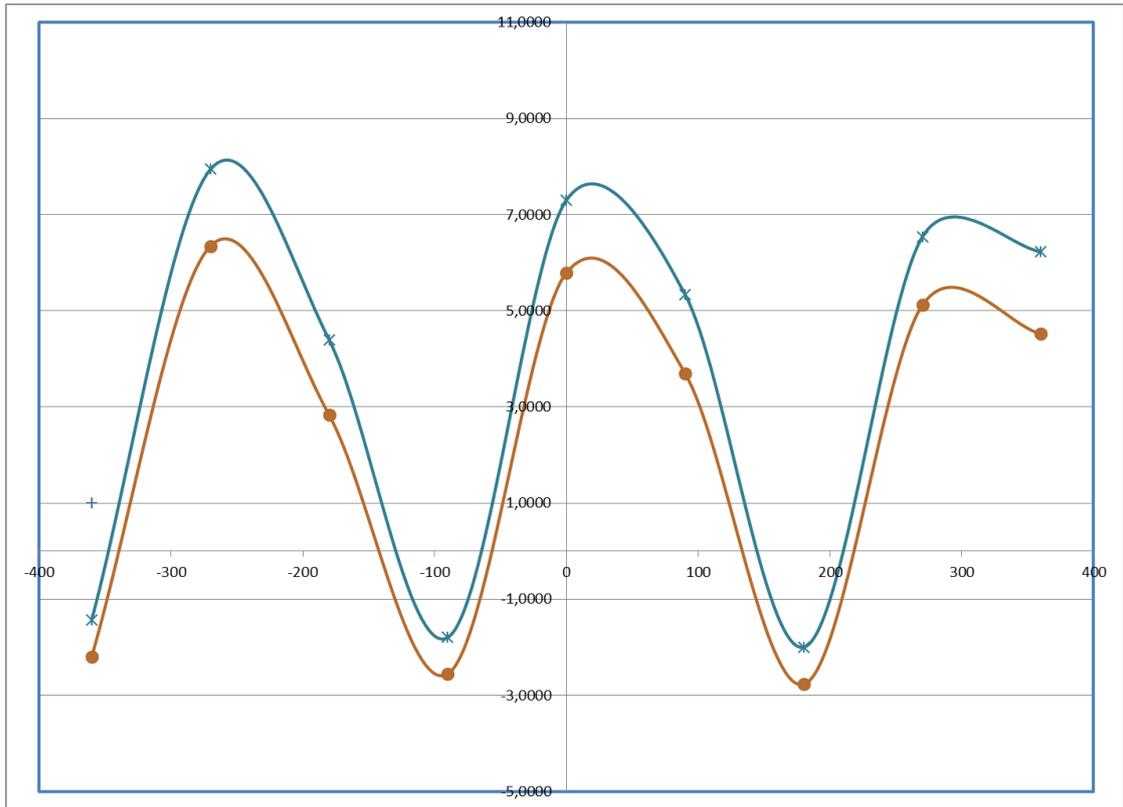


Figura 47. Curvas de Andrews Región 1

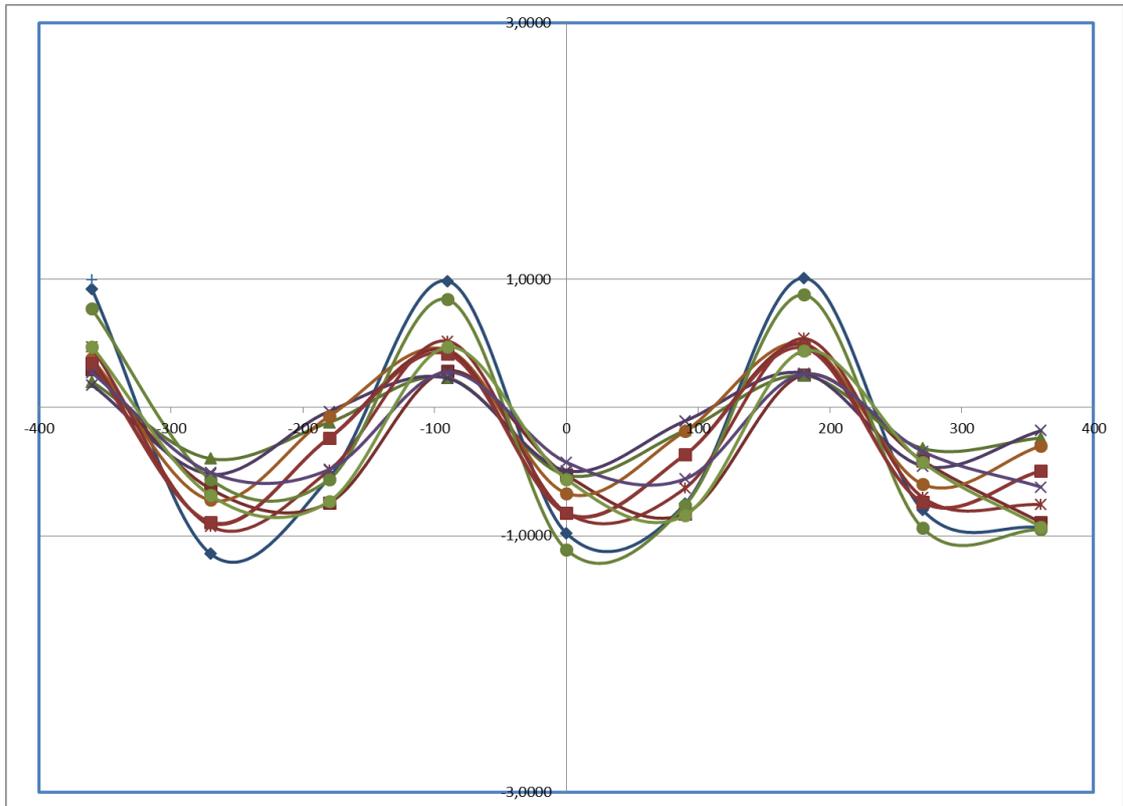


Figura 48. Curvas de Andrews Región 2

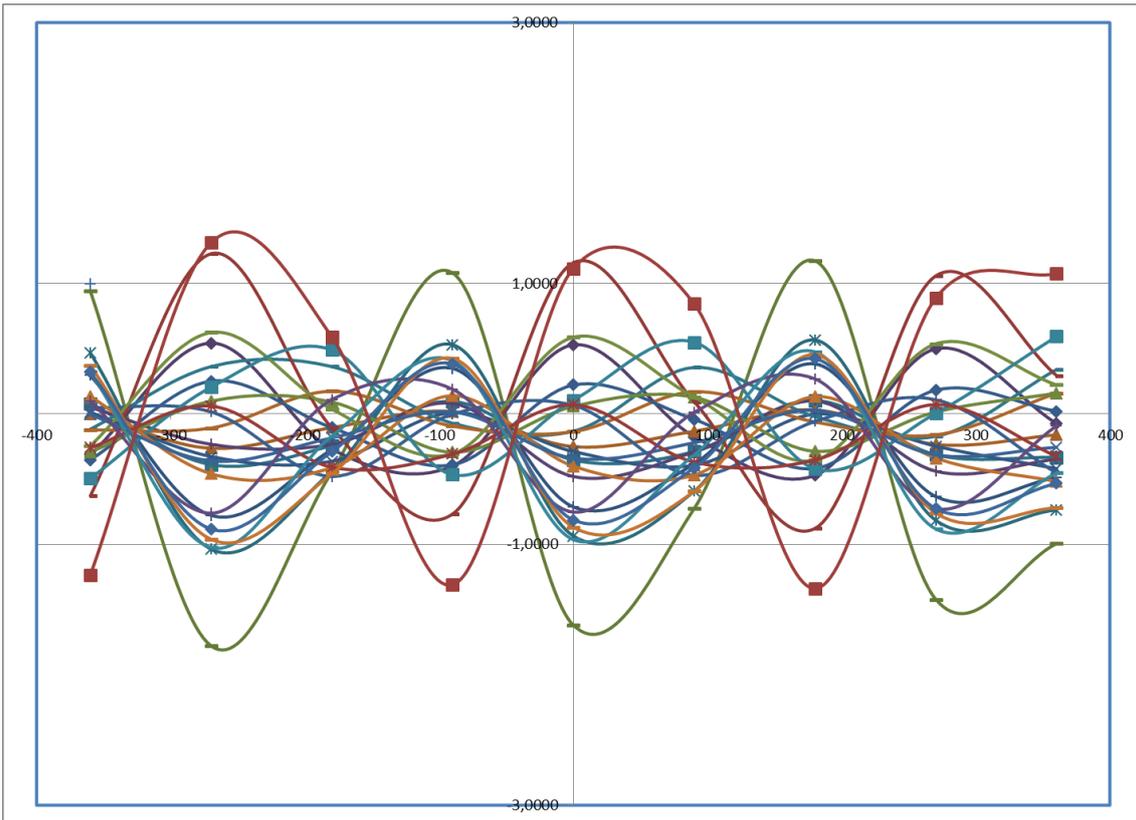


Figura 49. Curvas de Andrews Región 3

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

A través del desarrollo de esta investigación fue posible verificar la hipótesis de trabajo, pues se ha comprobado que, del conjunto de variables y parámetros que caracterizan la respuesta hidrológica de una cuenca, hay algunas que son significativamente importantes para diferenciar regiones con comportamiento hidrológico semejante.

En los dos casos de estudio considerados el área resultó ser una de las variables de mayor relevancia en la regionalización hidrológica. En el caso de las cuencas hidrográficas del Perú se suman la longitud del cauce, la precipitación y el caudal. Para la cuenca del río Uruguay el área, el perímetro de la cuenca y el tiempo de concentración. Merece consignarse que en ambos casos se trabajó con los datos disponibles y que estos no eran los mismos para los dos casos de estudio. Para la regionalización de cuencas de Perú se utilizaron variables que fueron medidas (área de la cuenca, longitud del curso, la precipitación y el caudal); mientras que para las cuencas del Río Uruguay se utilizaron variables que fueron medidas (área y perímetro) y una variable que fue estimada (tiempo de concentración), en función de la longitud del canal desde aguas arriba a la salida y S es la pendiente promedio de la cuenca.

Se ha logrado cumplir tanto con el objetivo general como con los específicos de esta investigación. La determinación de las regiones hidrológicas homogéneas se realizó mediante una combinación de métodos estadísticos multivariados que además permitieron determinar qué variables resultan significativas para la delimitación, como se señaló precedentemente.

De ello es posible concluir:

- En el Análisis de agrupamiento en Modo R aplicado a las cuencas de Perú, el coeficiente de distancia euclidiana no permite hacer una buena diferenciación de las relaciones entre las variables. Mientras que el uso del coeficiente de correlación como medida de similitud o el empleo del método Ward aportan una buena diferenciación e incluso arrojan similares. A partir de ello, para el río Uruguay se aplicó directamente el Análisis de agrupamiento en Modo R por el Método de Ward. Del mismo modo se empleó el Método Ward para diferenciar los agrupamientos en Modo Q.
- En el caso de las cuencas de Perú, los dendrogramas Modo R (Figuras 6) muestran una fuerte relación entre las variables que reflejan la topografía de la cuenca

(hmax, hmin, S1 y S10_85), por otro lado, las variables que tienen en cuenta la respuesta de la cuenca (longitud, caudal, área) y finalmente, las variables que intervienen en el balance hídrico (precipitación, caudal específico, EVT y densidad de drenaje). Para la cuenca del río Uruguay, (Figura 45) se ha encontrado una relación entre el área, el perímetro de la cuenca y el tiempo de concentración. Esta conclusión se corrobora a través de los resultados del Análisis de Componentes Principales (ACP) en Modo R mediante el análisis de las cargas con las que contribuyen las variables originales a los ejes principales identificados (Tablas 11 y 13).

- Para la identificación de las regiones hidrológicas homogéneas, en ambos casos de estudio se aplicó una combinación de métodos estadísticos multivariados. El Análisis de Componentes Principales (ACP), mediante la selección de los ejes principales a través de los autovalores y la varianza representada (entre otros criterios, Tablas 10 y 12) permitió definir el primer nivel de corte adoptado para diferenciar las regiones en los dendrogramas logrados con el Análisis de agrupamiento en Modo Q (Figuras 7 y 46). El uso complementario de las curvas de Andrews para visualizar el resultado de los agrupamientos permitió: a) en el caso de las cuencas peruanas re definir nuevos niveles de corte de modo tal de lograr homogeneidad interna en las regiones y, b) corroborar el nivel de corte inicialmente realizado en el caso de la cuenca del río Uruguay. En las curvas de Andrews los grupos similares resultan en curvas que conforman una sola franja. Las curvas que caen fuera de esa franja señalan que dichas cuencas pertenecen a regiones diferentes. Es decir, para que una cuenca se identifique dentro de un grupo, su curva sigue el comportamiento de la envolvente que identifica al grupo.
- A pesar de la diferencia de información con la que se contaba en los dos sistemas hídricos (cuencas del Perú con 10 variables topográficas e hidroclimáticas y cuencas del río Uruguay con 6 variables topográficas), fue posible aplicar las metodologías propuestas, identificando el área como una de las variables más importante a tener en cuenta para la regionalización.
- A partir de los resultados logrados en ambos casos de estudio se recomienda que para la definición de las regiones hidrológicas homogéneas es importante contar con mediciones de las características físicas como el área, la longitud de los cursos de agua, la pendiente y la medición sistemática de variables como la precipitación y el caudal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ OLGUIN, G.; SUSTAITA RIVERA; F.; HOTAIT SALAS N. 2011. Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado en Ingeniería Investigación y Tecnología. Volumen XII, Número 3, pp. 277-284
- ANDRADE, E. y HAWKINS, R. 2000. Aplicação da função de Andrews na avaliação da regionalização de bacias em regiões áridas esemi-áridas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volumen 5, Número 4, pp. 17-24.
- ANDREWS, F. 1972. Plots of High-dimensional data. Biometrics, pp. 125-136.
- BATIMA P. 2002. Some approaches in prediction of hydrological characteristics in ungauged basin. PUB IAHS Decade on prediction in ungauged basins.
- BENAVENTE HERRERA J., FRANCISCO CARRASCO CANTOS, ALBERTO PADILLA BENITEZ. 1984. Análisis multivariable de datos morfométricos en la Cuenca del río Guadalhorce (Málaga). I Congreso Español de Geología, Tomo III, pp.527-539.
- BRANDIZI, L.; SEQUEIRA, M.; FERNANDEZ, S.; LABRAGA, J. 2011. Estimación de la precipitación mensual por un procedimiento de regionalización del clima en el sudoeste bonaerense. XXIII Congreso Nacional del Agua. Resistencia, Chaco, Argentina.
- BROWN, C. 1998. *Applied multivariate statistic in geohydrologic and related sciences*. SpringerVerlag, 248 pp.
- BUSCH, G.; J. SUTMOLLER, J. P.; KRUGER; G. GEROLD. 1999. Regionalitation of runoff formation by aggregation of hydrological response units: a regional comparison. Regionalization in Hydrology, IAHS publ. 254, pp. 45-51.
- CHÁVEZ, A. 2009. Aplicación del método de regionalización para la determinación de caudales en el puente Carrasquillo. Tesis de Master en Ingeniería Civil con Mención en Recursos Hídricos. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú. 114 pp.
- CHIANG, S.; TSAY, T.; NIX. 2002. S. Hydrologic regionalitation of watersheds. I: methodology development. Journal of water resources planning and management, pp. 3-19.

- CLARKE R. T.; BRUSA L. C. 2002. The effects of errors in measuring drainage basin area on regionalized estimates of mean annual flood: a simulation study. PUB IAHS Decade on prediction in ungaged basins.
- CORTEZ LEDESMA C. N. 2003. Regionalización de tormentas de diseño en la cuenca del valle de México. Proyecto terminal. Universidad autónoma Metropolitana.
- DNER. 1990. Manual de Hidrología básica para estructuras de drenagem. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 370 p.
- EMBRECHTS, P. y HERZBERG, A. 1991. Variations of Andrews' plots. *International Statistical Review*. Vol. 59, núm. 2, pp. 175-194.
- ENTRAIGAS, I.; GANDINI, M.; USUNOFF, E.; VARNI, M. 1994. Identificación de áreas homogéneas con aplicaciones en Hidrología. II Congreso latinoamericano de Hidrología Subterránea, pp. 367-377.
- EUCLYDES, H.; FERREIRA, P.; VIEIRA RUBERT, O.; MEDEIROS DOS SANTOS, R. 2001. Regionalizacao Hidrológica bacía do Alto Sao Francisso a Montante da Barragem de Tres marías, Minas Gerais. ABRH, Revista Brasileira de Recursos Hidricos, Volumen 6, Número 2, pp. 81-105.
- EVARSA. 2007. Modelación hidrológica de Argentina y Uruguay para el Proyecto PADE de Salto Grande.
- EVERITT B., S. LANDAU & M. LEESE. 2001. *Cluster Analysis*. Oxford University Press Inc., New York.
- FRANCHINI, M. y SUPPO, M. 1996. Regional analysis of flow duration curves for a limestone region. Water resource management. Volumen 10, pp. 199-218.
- GANANCIAS MARTÍNEZ; F. M. 2010. Evaluación de Metodologías de Regionalización Hidrológica: Aplicación a Caudales Máximos de Cuencas Representativas de la Región Sur-Oeste de la Provincia de Córdoba. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mención en Recursos Hídricos – U. N. C.
- GÓMEZ MARTÍNEZ J., RAMÍREZ OROZCO A. 2004. Estimación de gastos máximos mediante análisis regional en una región hidrológica mexicana. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San Pedro, Estado de Sao Paulo, Brasil.

- GUTIERREZ LOPEZ, A. 1996. Identificación de regiones hidrológicamente homogéneas con base en las curvas de Andrews. XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Guayaquil, Ecuador.
- HAMMER O, HARPER, D.A.T., P. D. RYAN, 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *PalaeontologiaElectronica* 4(1): 9pp.
- HEREDIA-CALDERÓN E.; SICCARDI F. 1999. Regional analysis short duration precipitation annual maxima in Liguria (Italy). *Regionalization in Hydrology*, IAHS publ. 254, pp. 71-78.
- JÖRESKOG, K., KLOVAN, J. y REYMENT, R. 1976. *Geological factoranalysis*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- LOEBIS J.; AGUNG BAGIAWAN I. 2002. Prediction of runoff in ungaged catchment using geographic information systems and digital terrain model. *PUB IAHS Decade on prediction in ungaged basins*.
- LOPEZ, P.; MAZZA J.; BURGOS, V.; VARGAS ARANIBAR, FORNERO, L.; BONILLA, J. 2011. Regionalización paramétrica de curvas de duración de caudales, 2011. XXIII Congreso Nacional del Agua. Resistencia, Chaco, Argentina.
- MALLANTS D.; FEYEN, J. 1990. Defining homogeneous precipitation regions by means of principal components analysis. *Journal of Applied Meteorology*. Volumen 29, pp. 892-901.
- MESA SANCHEZ, O.; VELEZ UPEGUI, J.; GIRALDO OSORIO J.; QUEVEDO TEJADA, D. 2002. Regionalización de Características Medias de la Cuenca con Aplicación en la Estimación de Caudales Máximos. *XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR*.
- MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. 2010. "Evaluación preliminar del potencial hidroeléctrico del Perú". 989 p.
- LOUDIN, L.; VAZKEN, A.; CLAUDE, M.; LE MOINE, N. 2008. Spatialproximity, physicalsimilarity, regression and ungagedcatchments: a comparison of regionalizationapproachesbase don 913 French catchments. *WaterResorucesResearch*, Vol. 44,W03413.

- PARIS M., O. TUJCHNEIDER, M. FILI, M. PÉREZ & M. D'ELÍA. 1995. Hidrogeoquímica de las aguas Subterráneas en el área de Villa Maria Grande (Provincia de Entre Rios, Republica Argentina). VI Simposio de Hidrogeología. Sevilla. *Libro de la Colección Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. Tomo XX. Sección 4º: Geoquímica de las aguas subterráneas, pp. 221-234.
- PARIS, M.; ZUCARELLI, G. 2004. Regionalización de caudales. Propuesta metodológica para la identificación de regiones homogéneas. *Revista Ingeniería Hidráulica de México*, Volumen XIX, Número 4, pp. 1-21. ISSN 0186-4076.
- PARIS M. 2010. “*Métodos estadísticos multivariados aplicados en Hidrología Subterránea*” Tesis del Doctorado en Ciencias Geológicas, de la Universidad Nacional de Río Cuarto. Inédita.
- PESCHKE, G.; ETZENBERG C.; TOPPER J.; ZIMMERMANN S. 1999. Runoff generation regionalization: analysis and possible approach to a solution. *Regionalization in Hydrology*, IAHS publ. 254, pp.147-156.
- TAVAKKOLI; A.; HASHEM HOSSEINI S. 2014. Hydrological Regionalization in Relation to Accuracy of Maximum Discharge Estimation. *Current World Environment*, Vol 9(3), pp. 903-912.
- TUCCI, C. 1983. *Hidrología ciencia e aplicacao*. EDUSP/Editora Da Universidade. ABRH. 952 pp.
- TUCCI, C. 1987. *Hidrología*. Porto Alegre, Brasil: Universidad Federal do Rio Grande do Sul Editora, 942 p.
- TUCCI, C. 1991. *Regionalizacao de vazoes do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: companhia Estadual de Energía Eléctrica (CEEE)/instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS. 5v.
- TUCCI, C. 2002. *Regionalizacao de vazoes*. EDUSP/Editora Da Universidade. 255 p.
- VELEZ, J.; POVEDA, G.; MESA, O; HOYOS C.; MEJÍA, F.; QUEVEDO, D.; SALAZAR, L.; VIEIRA, S. 2002. Aplicación de diferentes metodologías para estimación de curvas Intensidad – Frecuencia – Duración en Colombia. *Memorias XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.
- VERSIANI, B.; MELO FRANCO CARNEIRO, R. 2001. Identificacao de regiones Homogeneas na Analisis regional de precipitacoes e de Vazoes Máximas na Bacia

do Rio São Francisco (minas Gerais). RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volumen 6, Número 3, pp. 67-80.

VICH, A. 1999. “Aguas continentales. Formas y procesos”. Manual de aplicaciones prácticas. Mendoza. 150 p.

ZAMANILLO, E.; LARENZE, G.; TITO M.; PEREZ, M.; GARATA M. 2009.

“Tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos”. Universidad tecnológica Nacional regional Concordia, Dirección de Hidráulica de Entre Ríos.

ZUCARELLI, G.; CEIRANO; E.; PARIS, M. 2003. Empleo de relaciones hidráulicas para la determinación de regiones homogéneas. Nuevas Tendencias en Hidráulica de Ríos. pp. 31-41.

ZUCARELLI, G.; WERLEN, M. 2002. Aplicación de las curvas de Andrews en cuencas del Noroeste argentino”. Cuadernos del CURIHAM. Vol. 8, Nº 2, Segundo Semestre, pp. 155-165.

ZUCARELLI, G.; MORRESI, M. 2004. Análisis relativo a la determinación del tiempo de concentración: Aplicación a cuencas urbanizadas. Cuadernos del CURIHAM. Vol. 10 pp. 45-55.