

USO DE VARIABLES MORFOMETRICAS EN EL ANALISIS DE LA DENSIDAD DE DRENAJE DE LAS MICROCUENCAS DE ORDEN 1 (STRAHLER) DEL RIO OCOA EN LA REPUBLICA DOMINICANA

ALBA CADETE, MIREL VOLCAN, YOENNY URBAEZ *Estudiantes de Maestría de Teledetección y Ciencias de la Información Geográfica, Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD)*

El análisis parte de datos de observación de 33 variables morfométricas de la cuenca del río Ocoa en la República Dominicana, previamente procesadas mediante el programa r.basin del software QGis. Mediante la aplicación de Análisis Exploratorio de Datos Espaciales apoyados por el software R, se determinó la correlación como criterio para seleccionar cuales podían ser de utilidad para el diseño de un modelo espacial. A partir de allí se establecieron las hipótesis de dependencia/autocorrelación y heterogeneidad espacial entre la densidad de drenaje como variable dependiente y las variables independientes seleccionadas para ser comprobadas en el análisis de los datos espaciales. Finalmente, se aplicó la técnica de interpolación espacial kriging ordinario, utilizando los 3027 puntos espaciales de la variable dependiente.

Keywords: analisis de datos espaciles, modelizacion, kriging, geomorfologia río ocoa

1 Introducción

La necesidad de estudiar y planificar el espacio ha conllevado a la geografía a experimentar un avance articulado a la estadística, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la estadística aplicada. Por otro lado, el estudio del ciclo hidrológico a nivel de cuenca hidrográfica como elemento fundamental de abastecimiento de agua en los territorios es el caso que nos ocupa en este análisis espacial del área de la cuenca del río Ocoa, cuyo objetivo general es la mera aplicación de un ejercicio académico para el logro del aprendizaje del uso de algoritmos informáticos del software libre R utilizando variables geomorfológicas de esta cuenca del Caribe en la República Dominicana.

Preguntas de investigación o tema abordado.

¿Qué patrón de asociación puede determinarse a partir de los datos de las variables geomorfológicas disponibles de la cuenca del río Ocoa en la República Dominicana correspondientes al año XXX?

¿Los resultados de las pruebas estadísticas de covariación de las variables seleccionadas, permiten predecir escenarios de comportamiento de la cuenca del río Ocoa a través del diseño de un modelo basado en dichas variables?

2 Metodología

Los datos con los cuales se desarrolla el análisis fueron los archivos pre procesados (R. Basin - QGis) de las características geomorfológicas del área de la cuenca del río Ocoa en formato .gpkg y los respectivos archivos poligonales del área de estudio, en el mismo formato.

El criterio de orden de cauces seleccionado fue el de STRAHLER (1957), el cual consiste en asignarle un número a cada uno de los cauces tributarios en forma creciente, desde el inicio de la línea divisoria o parte aguas hasta llegar al cauce principal, de manera que el número final señale el orden de la red de drenaje en la cuenca.

Este concepto de orden de cauces deriva de GONZÁLEZ de M. (2004) quien menciona que HORTON (1945) y STRAHLER (1957) definen una serie de leyes morfométricas relacionando el número de cauces, sus longitudes, pendientes y áreas de drenaje en una cuenca con el orden de cauces, basándose, por ejemplo, en que la longitud de los cauces afecta claramente a las ratios de recogida de aguas y su transmisión aguas abajo para el caso de la longitud, de igual modo para el resto de las variables.

Por su parte STRAHLER (1957) afirma que las propiedades adimensionales de la cuenca incluyen números de orden de la corriente, longitud de la corriente y relaciones de bifurcación, ángulos de unión, pendientes máximas del lado del valle, pendientes medias de las superficies de las cuencas hidrográficas, gradientes de canales, relaciones de relieve y propiedades e integrales de curva hipsométrica.

Tabla 1. variables seleccionadas para el análisis

VARIABLES			
CODIGO INDEPENDIENTES	CONCEPTO	FORMULA	
MS Mean_Slope	La pendiente promedio del canal principal (Km) calculada mediante el producto de la longitud de las curvas de nivel (L_i) y su equidistancia (E), dividida entre en área de la curva, multiplicada por 100 (%) y expresada en porcentaje.	$MS=100\sum L_i E/A$	
TS Total_Stream_Length_km	La longitud total del canal principal en Km2 (L) corresponde a la longitud más larga de la sucesión de segmentos que conectan una fuente a la salida de la cuenca	$TS=L$	
SF Shape_Factor	El factor de forma relaciona el área de la cuenca (A) y el cuadrado de la longitud del canal principal (L^2).	$SF=A/L^2$	
ER Elongation_Ratio	La razón de alargamiento relaciona el diámetro del círculo equivalente al perímetro de la cuenca (D) y la longitud del canal principal en Km2 (L).	$ER=D/L$	
DD Drainage_Density	La densidad de drenaje (DD) relaciona la longitud total de las ramificaciones del río (I) y el área de la cuenca en Km2	$DD=\frac{I}{A}$	
LogDD VARIABLE INDEPENDIENTE	Transformación logarítmica, dado el sesgo encontrado en las pruebas de dispersión de Moran de la variable DD.	$\log(DD)$	

Fuente: Elaboración propia a partir de DI LEO Margherita (2013).

Las variables fueron seleccionadas atendiendo a sus coeficientes de correlación obtenidos mediante la función "Cor" de R, dentro de las microcuenca de orden 1, resultando con mayor valor

de correlación la variable Densidad de drenaje con Elongation ratio y Shape factor. Sin embargo, se incluyeron dos variables adicionales para robustecer el análisis y modelo resultante. Las dos variables adicionales fueron Total stream lenght y Mean slope.

El procesamiento de los datos puede esquematizarse de la siguiente forma (Script reproducible en archivo adjunto):

- I. Importación, organización de datos e Interoperabilidad. Los datos de variables geomorfológicas en formato .gpkg y los polígonos en formato .geojson fueron cargados al RStudio conectado al servidor principal (New York). Posteriormente leídos y georeferenciados en el sistema de coordenadas EPSG:32619 WGS 84 / UTM zona 19N, convertidos en un simple feature (“sf”) para ser analizado en R.

Posteriormente, se seleccionó el grupo de microcuencas pertenecientes al Orden de Red de Cuencas 1 (clasificación de Strahler) y organizadas en columnas numéricas con sus respectivas varianzas y depurados de celdas vacías (NA). A partir de la organización de estos primeros datos se procedió a determinar la correlación de variables del estudio a los fines de seleccionar las variables idóneas para el modelo, atendiendo a su índice de correlación.

Una vez obtenidos los índices de correlación, se seleccionaron el grupo de variables con índice de correlación mayor a 0.5 y no tan próximos a 1 (correlación perfecta) que fueran coherentemente relacionables sometiéndolas a las respectivas pruebas de hipótesis en un modelo espacial de cuenca hidrográfica. Es así como se seleccionan la variable Densidad de Drenaje en función de las variables independientes Factor de Forma, Ratio de elongación, longitud total del curso en Km y media de la pendiente; las cuales fueron extraídas de los datos generales mediante un código de selección de la librería deploy el cual permite la Unión Espacial de Variables Seleccionadas para seguidamente diseñar un “sf” de tales variables seleccionadas unidas a los polígonos que permitirán hacer el análisis de agrupación espacial (clusters).

Previo a la evaluación cuantilar de las variables seleccionadas es necesario crear el objeto XY de referencia de cuadrantes para observar la dispersión de las observaciones de las variables analizadas. De tal evaluación cuantilar se determinó el sesgo de la variable dependiente, razón por la cual se hizo la transformación logarítmica de la misma. Hasta aquí se han creado dos objetos correspondientes, primero, al orden inicial de variables seleccionadas y segundo, arreglo de variables con la variable dependiente transformada. Posteriormente, un último objeto con el conjunto de variables completo unido al objeto de referencia cuantilar de normalidad de los datos (XY). Este último objeto, Varselpol3, será utilizado en todos los análisis ESDA subsiguientes para evaluar la relación vecinal y modelo espacial de predicción de la densidad de drenaje en la cuenca del río Ocoa.

II. Análisis exploratorio de datos espaciales (ESDA):

1. Autocorrelación espacial en entidades poligonales Cabe destacar la condición sine qua non del análisis de correlación espacial previo al análisis de vecindad, caso contrario, no se puede interpolar, ni modelar.

En esta fase se aplicaron las pruebas para comprobar tanto el supuesto de normalidad de los datos (Shapiro-Wilk) como el supuesto de autocorrelación de la variable dependiente transformada (I de Moran Global). Esta ultima prueba se hizo tanto gráficamente (moran.plot) como a través de los valores de la probabilidad cuyo valor menor a 0.05 es evidencia preliminar para rechazar la hipótesis nula, la cual niega la existencia de autocorrelación espacial global.

Posteriormente se evalúa la autocorrelación espacial local mediante el diagrama de dispersión de Moran a través de la función `moran.plot`. Finalmente, con el script 'lisacluster.R' diseñado previamente se ejecutó la función `lisamap` para generar el mapa LISA. En ese caso, el método LISA descompone el índice de Moran y verifica en cuánto contribuye cada unidad espacial a la formación del valor general, permitiendo obtener un valor de significancia para cada cluster formado por los valores similares de cada unidad espacial y sus vecinos. Estos agrupamientos o clusters de especial concentración de valores extremos de una variable se conocen también como zonas calientes/frías (hot spots/cold spots, respectivamente) según se trate de una concentración de valores especialmente altos/bajos de una variable, correspondientemente (Chasco Yrigoyen, 2006:44 citado por CELEMÍN (2009)).

En ese orden de ideas, ALDSTADT (2010), describe como métodos para el análisis de la asociación espacial dos categorías: las que se utilizan para determinar si hay agrupación en la región de estudio (agrupamiento global) y las que intentan identificar la ubicación de las agrupaciones (agrupación local). La primera categoría proporciona una estadística única que resume el patrón espacial de la región y el segundo examina subregiones o vecindarios específicos dentro del estudio para determinar si esa área representa un grupo de valores altos (hot spot) o valores bajos (cold spot).

En consecuencia, el primer paso es definir cuales relaciones entre observaciones deben ser consideradas con peso diferente a cero, es decir, el criterio de vecindad a ser utilizado. Lo segundo es asignar pesos a las conexiones y finalmente, determinar patrones de asociación entre las variables analizadas BIVAND (2013).

Para la elaboración del LISA Clúster, nos centraremos en la variable dependiente, "Logaritmo de Densidad de Drenaje (LogDD)" Las pruebas de vecindad se hicieron por: Contigüidad, los 5 vecinos cercanos, por el peso de las observaciones vecinas en el objeto que contiene las variables seleccionadas y finalmente, en las observaciones de la data completa.

2. Modelización (Autoregresión espacial – SAR, por sus siglas en inglés). En este análisis de modelización se exploró el grado de asociación entre la variable Densidad de drenaje (Dependiente) y las variables independientes Factor de Forma (SF), Ratio de elongación (ER), longitud total del curso en Km (TS) y media de la pendiente (MS), representado mediante la función lineal $DD = f(SF, ER, TS, MS)$.

El modelo fue sometido a las pruebas de supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk), Heterocedasticidad (Breush-Pagan) y significancia tanto con la variable original como con la transformada.

3. Geoestadística – Análisis puntual: Se inició el proceso con la selección y georreferenciación del sistema de Coordenadas WGS84 UTM Zona 19, EPSG:32619. Seguidamente se creó un objeto para delimitar el área de estudio al orden de red 1 de la clasificación de Strahler y el ajuste logarítmico de la variable dependiente, Densidad de Drenaje, la cual corresponde a una variable de categoría discreta la cual será tomada en este estudio de práctica académica como una variable continua en virtud de que la geoestadística se aplica a variables de carácter continuo, las cuales son interpoladas/inferidas a partir de puntos de muestra.

A partir de la delimitación del área y la transformación logarítmica de la variable dependiente seleccionada, se creó un nuevo objeto (v) a los fines de generar el variograma modelo para proceder a la interpolación. El referido variograma modelo fue evaluado en sus modalidades:

Modelo esférico, modelo Exponencial y modelo Gausiano con rango de 1000 metros respectivamente.

...

3 Resultados

I. Importación, organización de datos e interoperabilidad

```
## Reading layer 'paramsoutlet_orden1' from data source '/home/yoenn/unidad-0-asignacion-99-mi-p
## Simple feature collection with 3029 features and 32 fields
## geometry type: POINT
## dimension: XY
## bbox: xmin: 317775 ymin: 2019315 xmax: 351945 ymax: 2067525
## epsg (SRID): 32619
## proj4string: +proj=utm +zone=19 +datum=WGS84 +units=m +no_defs

## Simple feature collection with 3029 features and 32 fields
## geometry type: POINT
## dimension: XY
## bbox: xmin: 317775 ymin: 2019315 xmax: 351945 ymax: 2067525
## epsg (SRID): 32619
## proj4string: +proj=utm +zone=19 +datum=WGS84 +units=m +no_defs
## First 10 features:
##      subbasin.ID RectangleContaining_basin_N_W
## 1 /order1basin1000 ('332370', '2055210')
## 2 /order1basin1001 ('321090', '2055210')
## 3 /order1basin1002 ('321180', '2055270')
## 4 /order1basin1003 ('334800', '2055000')
## 5 /order1basin1004 ('342630', '2054850')
## 6 /order1basin1005 ('329820', '2055270')
## 7 /order1basin1006 ('335190', '2054820')
## 8 /order1basin1007 ('336780', '2054820')
## 9 /order1basin1009 ('327690', '2054880')
## 10 /order1basin100 ('324540', '2065080')
##      RectangleContaining_basin_S_E Area_of_basin_km2 Perimeter_of_basin_km
## 1 ('333060', '2054550') 0.2291625 2.2240054
## 2 ('321270', '2054820') 0.0452250 1.0242641
## 3 ('321690', '2054790') 0.1697625 1.8348885
## 4 ('335160', '2054790') 0.0443250 0.9715433
## 5 ('342900', '2054670') 0.0281250 0.7666905
## 6 ('330150', '2054790') 0.0914625 1.3724621
## 7 ('335550', '2054160') 0.1017000 1.7661017
## 8 ('337230', '2054190') 0.1937250 1.8582338
## 9 ('328200', '2054610') 0.0767250 1.3636753
## 10 ('325020', '2063940') 0.3344625 3.0609903
##      Max_Elevation Min_Elevation Elevation_Difference Mean_Elevation
## 1 1265.470 1053.700 211.770 1145.6620
## 2 1537.031 1276.934 260.097 1393.4840
## 3 1622.275 1292.326 329.949 1486.4480
## 4 1187.114 1023.730 163.384 1110.6510
## 5 571.791 527.592 44.199 542.5508
## 6 829.274 760.542 68.732 798.5983
## 7 1349.194 1015.026 334.168 1182.4160
```

```

## 8      1022.694      730.338      292.356      893.6440
## 9      1157.580      882.936      274.644      1029.6930
## 10     2132.003      1476.494      655.509      1834.1150
##   Mean_Slope Length_of_Directing_Vector_km
## 1      21.00          0.2410021
## 2      33.45          0.2016978
## 3      34.06          0.2696702
## 4      26.70          0.1891084
## 5      9.11           0.1346180
## 6      7.96           0.2725472
## 7      26.90          0.3349657
## 8      28.07          0.3304573
## 9      24.09          0.2410021
## 10     32.20          0.6316661
##   Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw Compactness_Coefficient
## 1                      0.128986974      4.117267
## 2                      1.113800504      4.268424
## 3                      1.105490345      3.946697
## 4                      0.328439418      4.089618
## 5                      0.453681162      4.051527
## 6                      1.464190947      4.021831
## 7                      1.103143399      4.907951
## 8                      1.476848780      3.741558
## 9                      0.004149354      4.363023
## 10                     1.524869849      4.690652
##   Circularity_Ratio Topological_Diameter Elongation_Ratio Shape_Factor
## 1      0.5822128          1          1.5446291      0.6553012
## 2      0.5417071          1          5.6559830      1.0659635
## 3      0.6336249          1          2.1397239      0.7813103
## 4      0.5901118          1          5.5994217      1.0447503
## 5      0.6012599          1          2.6127893      0.3883252
## 6      0.6101719          1          8.0434125      2.1557918
## 7      0.4097315          1          1.5665487      0.4427406
## 8      0.7050093          1          1.2122047      0.4728395
## 9      0.5184714          1          1.5257437      0.3745372
## 10     0.4485733          1          0.7526919      0.3857766
##   Concentration_Time_hr Length_of_Mainchannel_km
## 1      0.20953664        0.34970563
## 2      0.07086383        0.04242641
## 3      0.13584250        0.21727922
## 4      0.08857840        0.04242641
## 5      0.14655398        0.07242641
## 6      0.19198992        0.04242641
## 7      0.11078724        0.22970563
## 8      0.17363639        0.40970563
## 9      0.10674763        0.20485281
## 10     0.17643437        0.86698485
##   Mean_slope_of_mainchannel_percent Mean_hillslope_length_m Magnitudo
```

```

## 1          20.196890      1325      1
## 2          53.428988      753       1
## 3          58.152675      534       1
## 4          28.680251      1576      1
## 5          7.401385      4015      1
## 6          3.493107      2846      1
## 7          43.676110      1303      1
## 8          34.166123      2354      1
## 9          59.278371      1714      1
## 10         54.572867       49        1
##   Max_order_Strahler Number_of_streams Total_Stream_Length_km
## 1              1             1           0.3921
## 2              1             1           0.0849
## 3              1             1           0.2597
## 4              1             1           0.0849
## 5              1             1           0.1024
## 6              1             1           0.0724
## 7              1             1           0.2597
## 8              1             1           0.4521
## 9              1             1           0.2349
## 10             1             1           0.9094
##   First_order_stream_frequency Drainage_Density_km_over_km2
## 1                  4.363716      1.7110129
## 2                  22.111664     1.8772803
## 3                  5.890582      1.5297843
## 4                  22.560632     1.9153976
## 5                  35.555556     3.6408889
## 6                  10.933443     0.7915812
## 7                  9.832842      2.5535890
## 8                  5.161956      2.3337205
## 9                  13.033561     3.0615836
## 10                 2.989872      2.7189894
##   Bifurcation_Ratio_Horton Length_Ratio_Horton Area_ratio_Horton
## 1                      NA            NA            NA
## 2                      NA            NA            NA
## 3                      NA            NA            NA
## 4                      NA            NA            NA
## 5                      NA            NA            NA
## 6                      NA            NA            NA
## 7                      NA            NA            NA
## 8                      NA            NA            NA
## 9                      NA            NA            NA
## 10                     NA            NA            NA
##   Slope_ratio_Horton optional          geom
## 1             NA    TRUE POINT (332685 2054895)
## 2             NA    TRUE POINT (321165 2055015)
## 3             NA    TRUE POINT (321435 2055075)
## 4             NA    TRUE POINT (334965 2054895)

```

```

## 5 NA TRUE POINT (342765 2054775)
## 6 NA TRUE POINT (329985 2055075)
## 7 NA TRUE POINT (335355 2054505)
## 8 NA TRUE POINT (336975 2054475)
## 9 NA TRUE POINT (327945 2054775)
## 10 NA TRUE POINT (324735 2064585)

## Simple feature collection with 3027 features and 32 fields
## geometry type: POINT
## dimension: XY
## bbox: xmin: 317775 ymin: 2019315 xmax: 351945 ymax: 2067525
## epsg (SRID): 32619
## proj4string: +proj=utm +zone=19 +datum=WGS84 +units=m +no_defs
## First 10 features:
## subbasin.ID RectangleContaining_basin_N_W
## 1 /order1basin1000 ('332370', '2055210')
## 2 /order1basin1001 ('321090', '2055210')
## 3 /order1basin1002 ('321180', '2055270')
## 4 /order1basin1003 ('334800', '2055000')
## 5 /order1basin1004 ('342630', '2054850')
## 6 /order1basin1005 ('329820', '2055270')
## 7 /order1basin1006 ('335190', '2054820')
## 8 /order1basin1007 ('336780', '2054820')
## 9 /order1basin1009 ('327690', '2054880')
## 10 /order1basin100 ('324540', '2065080')
## RectangleContaining_basin_S_E Area_of_basin_km2 Perimeter_of_basin_km
## 1 ('333060', '2054550') 0.2291625 2.2240054
## 2 ('321270', '2054820') 0.0452250 1.0242641
## 3 ('321690', '2054790') 0.1697625 1.8348885
## 4 ('335160', '2054790') 0.0443250 0.9715433
## 5 ('342900', '2054670') 0.0281250 0.7666905
## 6 ('330150', '2054790') 0.0914625 1.3724621
## 7 ('335550', '2054160') 0.1017000 1.7661017
## 8 ('337230', '2054190') 0.1937250 1.8582338
## 9 ('328200', '2054610') 0.0767250 1.3636753
## 10 ('325020', '2063940') 0.3344625 3.0609903
## Max_Elevation Min_Elevation Elevation_Difference Mean_Elevation
## 1 1265.470 1053.700 211.770 1145.6620
## 2 1537.031 1276.934 260.097 1393.4840
## 3 1622.275 1292.326 329.949 1486.4480
## 4 1187.114 1023.730 163.384 1110.6510
## 5 571.791 527.592 44.199 542.5508
## 6 829.274 760.542 68.732 798.5983
## 7 1349.194 1015.026 334.168 1182.4160
## 8 1022.694 730.338 292.356 893.6440
## 9 1157.580 882.936 274.644 1029.6930
## 10 2132.003 1476.494 655.509 1834.1150
## Mean_Slope Length_of_Directing_Vector_km
```

## 1	21.00	0.2410021		
## 2	33.45	0.2016978		
## 3	34.06	0.2696702		
## 4	26.70	0.1891084		
## 5	9.11	0.1346180		
## 6	7.96	0.2725472		
## 7	26.90	0.3349657		
## 8	28.07	0.3304573		
## 9	24.09	0.2410021		
## 10	32.20	0.6316661		
##	Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	Compactness_Coefficient		
## 1		0.128986974		
## 2		1.113800504		
## 3		1.105490345		
## 4		0.328439418		
## 5		0.453681162		
## 6		1.464190947		
## 7		1.103143399		
## 8		1.476848780		
## 9		0.004149354		
## 10		1.524869849		
##	Circularity_Ratio	Topological_Diameter	Elongation_Ratio	Shape_Factor
## 1	0.5822128	1	1.5446291	0.6553012
## 2	0.5417071	1	5.6559830	1.0659635
## 3	0.6336249	1	2.1397239	0.7813103
## 4	0.5901118	1	5.5994217	1.0447503
## 5	0.6012599	1	2.6127893	0.3883252
## 6	0.6101719	1	8.0434125	2.1557918
## 7	0.4097315	1	1.5665487	0.4427406
## 8	0.7050093	1	1.2122047	0.4728395
## 9	0.5184714	1	1.5257437	0.3745372
## 10	0.4485733	1	0.7526919	0.3857766
##	Concentration_Time_hr	Length_of_Mainchannel_km		
## 1	0.20953664	0.34970563		
## 2	0.07086383	0.04242641		
## 3	0.13584250	0.21727922		
## 4	0.08857840	0.04242641		
## 5	0.14655398	0.07242641		
## 6	0.19198992	0.04242641		
## 7	0.11078724	0.22970563		
## 8	0.17363639	0.40970563		
## 9	0.10674763	0.20485281		
## 10	0.17643437	0.86698485		
##	Mean_slope_of_mainchannel_percent	Mean_hillslope_length_m	Magnitudo	
## 1	20.196890	1325	1	
## 2	53.428988	753	1	
## 3	58.152675	534	1	
## 4	28.680251	1576	1	

```

## 5          7.401385      4015      1
## 6          3.493107      2846      1
## 7          43.676110     1303      1
## 8          34.166123     2354      1
## 9          59.278371     1714      1
## 10         54.572867      49       1
##   Max_order_Strahler Number_of_streams Total_Stream_Length_km
## 1          1              1            0.3921
## 2          1              1            0.0849
## 3          1              1            0.2597
## 4          1              1            0.0849
## 5          1              1            0.1024
## 6          1              1            0.0724
## 7          1              1            0.2597
## 8          1              1            0.4521
## 9          1              1            0.2349
## 10         1              1            0.9094
##   First_order_stream_frequency Drainage_Density_km_over_km2
## 1          4.363716        1.7110129
## 2          22.111664       1.8772803
## 3          5.890582        1.5297843
## 4          22.560632       1.9153976
## 5          35.555556       3.6408889
## 6          10.933443       0.7915812
## 7          9.832842        2.5535890
## 8          5.161956        2.3337205
## 9          13.033561       3.0615836
## 10         2.989872        2.7189894
##   Bifurcation_Ratio_Horton Length_Ratio_Horton Area_ratio_Horton
## 1          NA             NA             NA
## 2          NA             NA             NA
## 3          NA             NA             NA
## 4          NA             NA             NA
## 5          NA             NA             NA
## 6          NA             NA             NA
## 7          NA             NA             NA
## 8          NA             NA             NA
## 9          NA             NA             NA
## 10         NA             NA             NA
##   Slope_ratio_Horton optional           geom
## 1          NA    TRUE POINT (332685 2054895)
## 2          NA    TRUE POINT (321165 2055015)
## 3          NA    TRUE POINT (321435 2055075)
## 4          NA    TRUE POINT (334965 2054895)
## 5          NA    TRUE POINT (342765 2054775)
## 6          NA    TRUE POINT (329985 2055075)
## 7          NA    TRUE POINT (335355 2054505)
## 8          NA    TRUE POINT (336975 2054475)

```

```

## 9          NA      TRUE POINT (327945 2054775)
## 10         NA      TRUE POINT (324735 2064585)

## Reading layer 'r_stream_basins_1' from data source '/home/yoenn/unidad-0-asignacion-99-mi-proy
## Simple feature collection with 4316 features and 4 fields
## geometry type: POLYGON
## dimension:     XY
## bbox:           xmin: 317400 ymin: 2019180 xmax: 352260 ymax: 2067690
## epsg (SRID):  32619
## proj4string:   +proj=utm +zone=19 +datum=WGS84 +units=m +no_defs

## Simple feature collection with 4316 features and 4 fields
## geometry type: POLYGON
## dimension:     XY
## bbox:           xmin: 317400 ymin: 2019180 xmax: 352260 ymax: 2067690
## epsg (SRID):  32619
## proj4string:   +proj=utm +zone=19 +datum=WGS84 +units=m +no_defs
## First 10 features:
##   fid cat value label               geometry
## 1 3.0e+09  2    1    POLYGON ((334500 2067660, 3...
## 2 4.0e+09  3    3    POLYGON ((334500 2067390, 3...
## 3 5.0e+09  7    2    POLYGON ((334440 2067330, 3...
## 4 6.0e+09 11   18   POLYGON ((333840 2067180, 3...
## 5 7.0e+09  8    8    POLYGON ((333750 2067240, 3...
## 6 8.0e+09  9    4    POLYGON ((334380 2067240, 3...
## 7 9.0e+09 12   10   POLYGON ((332640 2067120, 3...
## 8 1.0e+10 14   9    POLYGON ((333540 2067090, 3...
## 9 1.1e+10 15   14   POLYGON ((333330 2067090, 3...
## 10 1.2e+10 10   13   POLYGON ((332280 2067000, 3...

## Reading layer 'r_stream_basins_2' from data source '/home/yoenn/unidad-0-asignacion-99-mi-proy
## Simple feature collection with 890 features and 4 fields
## geometry type: POLYGON
## dimension:     XY
## bbox:           xmin: 317400 ymin: 2019180 xmax: 352260 ymax: 2067690
## epsg (SRID):  32619
## proj4string:   +proj=utm +zone=19 +datum=WGS84 +units=m +no_defs

## Reading layer 'r_stream_basins_3' from data source '/home/yoenn/unidad-0-asignacion-99-mi-proy
## Simple feature collection with 192 features and 4 fields
## geometry type: POLYGON
## dimension:     XY
## bbox:           xmin: 317400 ymin: 2019180 xmax: 351750 ymax: 2067690
## epsg (SRID):  32619
## proj4string:   +proj=utm +zone=19 +datum=WGS84 +units=m +no_defs

## Reading layer 'r_stream_basin_4' from data source '/home/yoenn/unidad-0-asignacion-99-mi-proy
## Simple feature collection with 47 features and 4 fields
## geometry type: POLYGON

```

```

## dimension: XY
## bbox: xmin: 317400 ymin: 2022210 xmax: 351750 ymax: 2067690
## epsg (SRID): 32619
## proj4string: +proj=utm +zone=19 +datum=WGS84 +units=m +no_defs

```

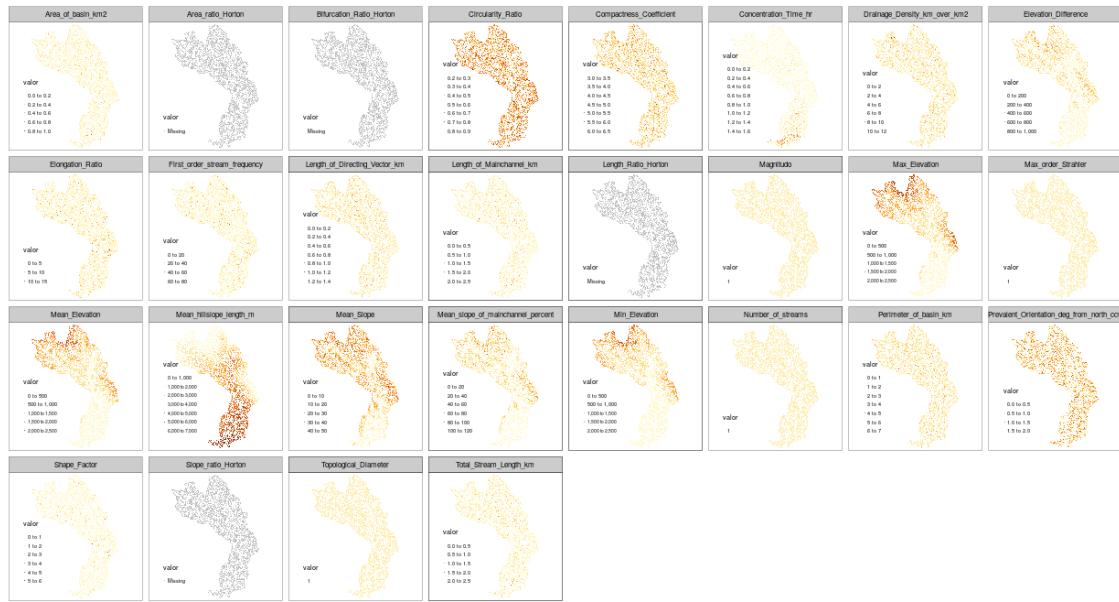


Figure 1: Selección Variable Sthraler

Unión espacial de los datos

```

## Simple feature collection with 3027 features and 12 fields
## geometry type: POLYGON
## dimension: XY
## bbox: xmin: 317400 ymin: 2019180 xmax: 352260 ymax: 2067690
## epsg (SRID): 32619
## proj4string: +proj=utm +zone=19 +datum=WGS84 +units=m +no_defs
## First 10 features:
##      fid cat value label      DD      SF      ER      TS      MS
## 1 3.0e+09  2    1      2.189137 0.4974215 1.1522986 0.5194 26.44
## 2 4.0e+09  3    3      1.317045 1.5193957 6.7526210 0.0849 31.26
## 3 5.0e+09  7    2      5.021898 0.2158705 0.8774590 0.3870 24.12
## 4 6.0e+09 11   18     3.348350 0.3116489 0.7588246 0.7191 27.12
## 5 7.0e+09  8    8      1.323741 0.9530676 3.2504695 0.1449 36.98
## 6 8.0e+09  9    4      5.407681 0.2022916 0.7547642 0.4946 23.41
## 7 9.0e+09 12   10     1.707515 0.6384885 1.5645024 0.3621 34.67
## 8 1.0e+10 14   9      1.776552 0.7101480 2.8058127 0.1449 37.30
## 9 1.1e+10 15   14     1.017378 1.2400654 3.7077166 0.1449 37.36
## 10 1.2e+10 10   13     1.376470 0.8268738 2.2012308 0.2473 30.57
##      logDD      x      y      geometry
## 1 0.7835072 334063.9 2067449 POLYGON ((334500 2067660, 3...

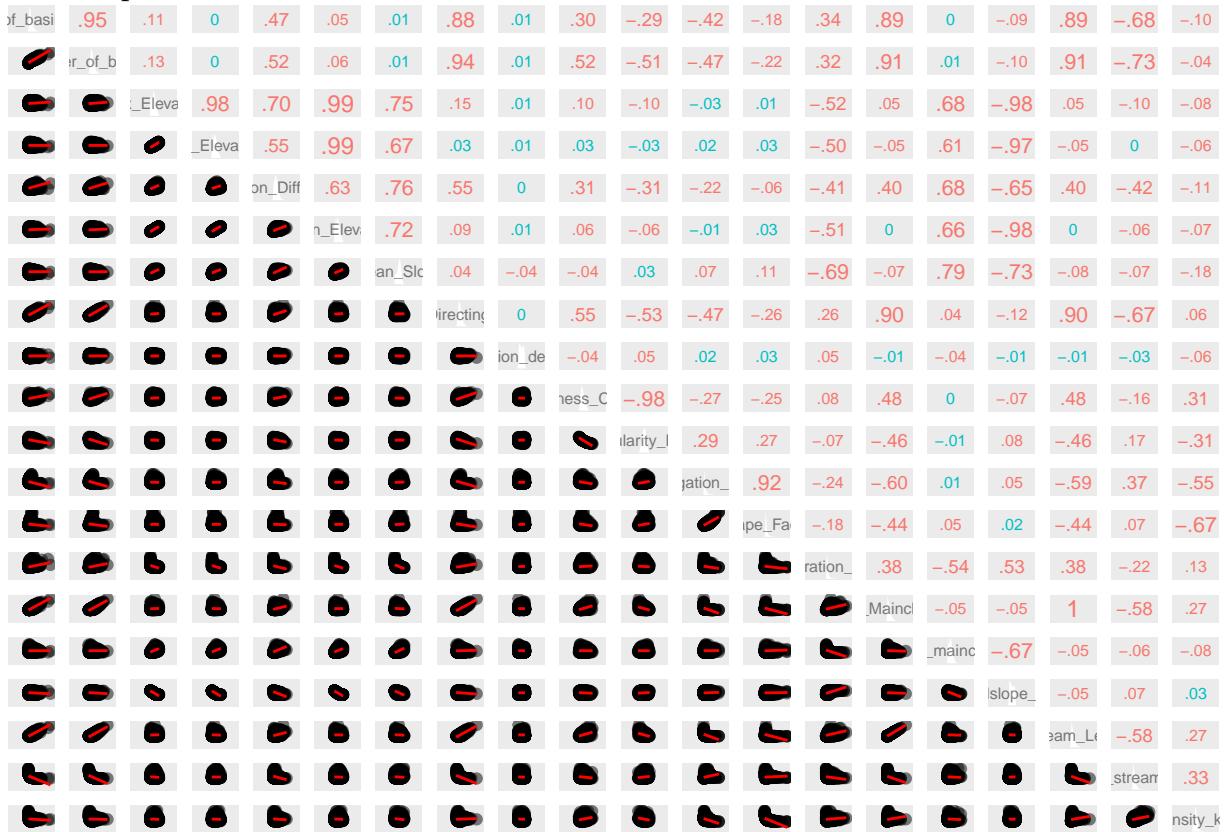
```

```

## 2 0.2753904 334582.9 2067514 POLYGON ((334500 2067390, 3...
## 3 1.6138079 334172.4 2067265 POLYGON ((334440 2067330, 3...
## 4 1.2084677 334366.4 2066754 POLYGON ((333840 2067180, 3...
## 5 0.2804618 333919.7 2066981 POLYGON ((333750 2067240, 3...
## 6 1.6878203 334365.9 2067039 POLYGON ((334380 2067240, 3...
## 7 0.5350394 333028.9 2066963 POLYGON ((332640 2067120, 3...
## 8 0.5746743 333771.9 2066901 POLYGON ((333540 2067090, 3...
## 9 0.0172283 333384.3 2066840 POLYGON ((333330 2067090, 3...
## 10 0.3195221 332580.6 2066931 POLYGON ((332280 2067000, 3...

```

Unión espacial de los datos



```

##                                     Area_of_basin_km2
## Area_of_basin_km2                  1.00000000000
## Perimeter_of_basin_km               0.9544758340
## Max_Elevation                      0.1085164535
## Min_Elevation                      -0.0037333059
## Elevation_Difference                0.4687069509
## Mean_Elevation                     0.0527159463
## Mean_Slope                          0.0116722827
## Length_of_Directing_Vector_km      0.8821719458
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw 0.0133206854
## Compactness_Coefficient            0.3026490133
## Circularity_Ratio                  -0.2885703636
## Elongation_Ratio                   -0.4201325677

```

## Shape_Factor	-0.1774118107
## Concentration_Time_hr	0.3376141894
## Length_of_Mainchannel_km	0.8868782573
## Mean_slope_of_mainchannel_percent	-0.0000623078
## Mean_hillslope_length_m	-0.0868302019
## Total_Stream_Length_km	0.8866554994
## First_order_stream_frequency	-0.6765432843
## Drainage_Density_km_over_km2	-0.0999198137
##	Perimeter_of_basin_km
## Area_of_basin_km2	0.954475834
## Perimeter_of_basin_km	1.000000000
## Max_Elevation	0.126072976
## Min_Elevation	0.003374361
## Elevation_Difference	0.517032317
## Mean_Elevation	0.064253895
## Mean_Slope	0.007432527
## Length_of_Directing_Vector_km	0.941048386
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	0.005013254
## Compactness_Coefficient	0.524072883
## Circularity_Ratio	-0.505511388
## Elongation_Ratio	-0.465434321
## Shape_Factor	-0.222059361
## Concentration_Time_hr	0.323183639
## Length_of_Mainchannel_km	0.912566038
## Mean_slope_of_mainchannel_percent	0.011612370
## Mean_hillslope_length_m	-0.097546277
## Total_Stream_Length_km	0.912065876
## First_order_stream_frequency	-0.729729329
## Drainage_Density_km_over_km2	-0.037858082
##	Max_Elevation Min_Elevation
## Area_of_basin_km2	0.108516454 -0.003733306
## Perimeter_of_basin_km	0.126072976 0.003374361
## Max_Elevation	1.000000000 0.979845711
## Min_Elevation	0.979845711 1.000000000
## Elevation_Difference	0.701703589 0.545241433
## Mean_Elevation	0.994679678 0.994064553
## Mean_Slope	0.750349000 0.669770309
## Length_of_Directing_Vector_km	0.152748940 0.026447839
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	0.008534377 0.011223559
## Compactness_Coefficient	0.097747484 0.026836115
## Circularity_Ratio	-0.100979358 -0.030532368
## Elongation_Ratio	-0.034917788 0.019213707
## Shape_Factor	0.014803339 0.034733040
## Concentration_Time_hr	-0.522952456 -0.499344963
## Length_of_Mainchannel_km	0.050522470 -0.053047221
## Mean_slope_of_mainchannel_percent	0.682330464 0.612424193
## Mean_hillslope_length_m	-0.976100493 -0.966412179
## Total_Stream_Length_km	0.050305343 -0.053392624

```

## First_order_stream_frequency      -0.104632503 -0.004045040
## Drainage_Density_km_over_km2     -0.080209378 -0.063762484
##
## Area_of_basin_km2                0.468706951
## Perimeter_of_basin_km            0.517032317
## Max_Elevation                    0.701703589
## Min_Elevation                    0.545241433
## Elevation_Difference              1.000000000
## Mean_Elevation                   0.628662419
## Mean_Slope                        0.759984277
## Length_of_Directing_Vector_km    0.546682345
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw -0.004216387
## Compactness_Coefficient           0.314482816
## Circularity_Ratio                 -0.314862013
## Elongation_Ratio                  -0.215062688
## Shape_Factor                      -0.061759832
## Concentration_Time_hr              -0.413566386
## Length_of_Mainchannel_km           0.401222022
## Mean_slope_of_mainchannel_percent  0.679079570
## Mean_hillslope_length_m            -0.649322231
## Total_Stream_Length_km             0.401542793
## First_order_stream_frequency       -0.424664856
## Drainage_Density_km_over_km2      -0.109178547
##
## Area_of_basin_km2                0.052715946 0.011672283
## Perimeter_of_basin_km             0.064253895 0.007432527
## Max_Elevation                     0.994679678 0.750349000
## Min_Elevation                     0.994064553 0.669770309
## Elevation_Difference               0.628662419 0.759984277
## Mean_Elevation                    1.000000000 0.717902080
## Mean_Slope                         0.717902080 1.000000000
## Length_of_Directing_Vector_km     0.091595925 0.043152236
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw 0.008888368 -0.036953776
## Compactness_Coefficient            0.058377050 -0.039121906
## Circularity_Ratio                  -0.061951571 0.031780506
## Elongation_Ratio                   -0.006958558 0.066886548
## Shape_Factor                       0.026491708 0.109470202
## Concentration_Time_hr              -0.513112068 -0.688395113
## Length_of_Mainchannel_km            -0.001812884 -0.074929355
## Mean_slope_of_mainchannel_percent  0.660296508 0.791702711
## Mean_hillslope_length_m            -0.976432501 -0.725848165
## Total_Stream_Length_km              -0.002122928 -0.075037094
## First_order_stream_frequency        -0.056487200 -0.070666731
## Drainage_Density_km_over_km2       -0.074394042 -0.178183177
##
## Area_of_basin_km2                0.88217195
## Perimeter_of_basin_km              0.94104839
## Max_Elevation                     0.15274894

```

## Min_Elevation	0.02644784
## Elevation_Difference	0.54668234
## Mean_Elevation	0.09159593
## Mean_Slope	0.04315224
## Length_of_Directing_Vector_km	1.00000000
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	0.00272695
## Compactness_Coefficient	0.54755642
## Circularity_Ratio	-0.53162055
## Elongation_Ratio	-0.47271463
## Shape_Factor	-0.26333595
## Concentration_Time_hr	0.26489121
## Length_of_Mainchannel_km	0.90154020
## Mean_slope_of_mainchannel_percent	0.04130672
## Mean_hillslope_length_m	-0.12424888
## Total_Stream_Length_km	0.90087307
## First_order_stream_frequency	-0.66625572
## Drainage_Density_km_over_km2	0.05523891
##	Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw
## Area_of_basin_km2	0.013320685
## Perimeter_of_basin_km	0.005013254
## Max_Elevation	0.008534377
## Min_Elevation	0.011223559
## Elevation_Difference	-0.004216387
## Mean_Elevation	0.008888368
## Mean_Slope	-0.036953776
## Length_of_Directing_Vector_km	0.002726950
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	1.000000000
## Compactness_Coefficient	-0.038263247
## Circularity_Ratio	0.047959520
## Elongation_Ratio	0.020435968
## Shape_Factor	0.028979551
## Concentration_Time_hr	0.045817442
## Length_of_Mainchannel_km	-0.014559540
## Mean_slope_of_mainchannel_percent	-0.041954144
## Mean_hillslope_length_m	-0.006101928
## Total_Stream_Length_km	-0.014834648
## First_order_stream_frequency	-0.025730089
## Drainage_Density_km_over_km2	-0.062373016
##	Compactness_Coefficient
## Area_of_basin_km2	0.302649013
## Perimeter_of_basin_km	0.524072883
## Max_Elevation	0.097747484
## Min_Elevation	0.026836115
## Elevation_Difference	0.314482816
## Mean_Elevation	0.058377050
## Mean_Slope	-0.039121906
## Length_of_Directing_Vector_km	0.547556416
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	-0.038263247

## Compactness_Coefficient	1.000000000
## Circularity_Ratio	-0.982893198
## Elongation_Ratio	-0.274815245
## Shape_Factor	-0.253076546
## Concentration_Time_hr	0.084829477
## Length_of_Mainchannel_km	0.477967483
## Mean_slope_of_mainchannel_percent	0.002602623
## Mean_hillslope_length_m	-0.074702534
## Total_Stream_Length_km	0.476467186
## First_order_stream_frequency	-0.161420996
## Drainage_Density_km_over_km2	0.310395399
##	
## Area_of_basin_km2	-0.288570364
## Perimeter_of_basin_km	-0.505511388
## Max_Elevation	-0.100979358
## Min_Elevation	-0.030532368
## Elevation_Difference	-0.314862013
## Mean_Elevation	-0.061951571
## Mean_Slope	0.031780506
## Length_of_Directing_Vector_km	-0.531620546
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	0.047959520
## Compactness_Coefficient	-0.982893198
## Circularity_Ratio	1.000000000
## Elongation_Ratio	0.289513381
## Shape_Factor	0.265974071
## Concentration_Time_hr	-0.074379454
## Length_of_Mainchannel_km	-0.459171337
## Mean_slope_of_mainchannel_percent	-0.006744063
## Mean_hillslope_length_m	0.078708721
## Total_Stream_Length_km	-0.457493385
## First_order_stream_frequency	0.168318540
## Drainage_Density_km_over_km2	-0.309107811
##	
## Area_of_basin_km2	-0.420132568 -0.17741181
## Perimeter_of_basin_km	-0.465434321 -0.22205936
## Max_Elevation	-0.034917788 0.01480334
## Min_Elevation	0.019213707 0.03473304
## Elevation_Difference	-0.215062688 -0.06175983
## Mean_Elevation	-0.006958558 0.02649171
## Mean_Slope	0.066886548 0.10947020
## Length_of_Directing_Vector_km	-0.472714634 -0.26333595
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	0.020435968 0.02897955
## Compactness_Coefficient	-0.274815245 -0.25307655
## Circularity_Ratio	0.289513381 0.26597407
## Elongation_Ratio	1.000000000 0.92166632
## Shape_Factor	0.921666316 1.000000000
## Concentration_Time_hr	-0.244967627 -0.18437450
## Length_of_Mainchannel_km	-0.595756838 -0.43862982

## Mean_slope_of_mainchannel_percent	0.013563039	0.05012741
## Mean_hillslope_length_m	0.054309895	0.02193559
## Total_Stream_Length_km	-0.594894045	-0.43777825
## First_order_stream_frequency	0.370979755	0.06989293
## Drainage_Density_km_over_km2	-0.546157778	-0.66918169
##		
## Area_of_basin_km2	0.33761419	
## Perimeter_of_basin_km	0.32318364	
## Max_Elevation	-0.52295246	
## Min_Elevation	-0.49934496	
## Elevation_Difference	-0.41356639	
## Mean_Elevation	-0.51311207	
## Mean_Slope	-0.68839511	
## Length_of_Directing_Vector_km	0.26489121	
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	0.04581744	
## Compactness_Coefficient	0.08482948	
## Circularity_Ratio	-0.07437945	
## Elongation_Ratio	-0.24496763	
## Shape_Factor	-0.18437450	
## Concentration_Time_hr	1.00000000	
## Length_of_Mainchannel_km	0.37973458	
## Mean_slope_of_mainchannel_percent	-0.54157779	
## Mean_hillslope_length_m	0.53319066	
## Total_Stream_Length_km	0.37928755	
## First_order_stream_frequency	-0.22050640	
## Drainage_Density_km_over_km2	0.12574975	
##		
## Area_of_basin_km2	0.886878257	Length_of_Mainchannel_km
## Perimeter_of_basin_km	0.912566038	
## Max_Elevation	0.050522470	
## Min_Elevation	-0.053047221	
## Elevation_Difference	0.401222022	
## Mean_Elevation	-0.001812884	
## Mean_Slope	-0.074929355	
## Length_of_Directing_Vector_km	0.901540197	
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	-0.014559540	
## Compactness_Coefficient	0.477967483	
## Circularity_Ratio	-0.459171337	
## Elongation_Ratio	-0.595756838	
## Shape_Factor	-0.438629821	
## Concentration_Time_hr	0.379734584	
## Length_of_Mainchannel_km	1.000000000	
## Mean_slope_of_mainchannel_percent	-0.048088478	
## Mean_hillslope_length_m	-0.053644883	
## Total_Stream_Length_km	0.999712141	
## First_order_stream_frequency	-0.577404672	
## Drainage_Density_km_over_km2	0.273665370	
##		Mean_slope_of_mainchannel_percent

## Area_of_basin_km2	-0.0000623078
## Perimeter_of_basin_km	0.0116123695
## Max_Elevation	0.6823304637
## Min_Elevation	0.6124241933
## Elevation_Difference	0.6790795702
## Mean_Elevation	0.6602965081
## Mean_Slope	0.7917027108
## Length_of_Directing_Vector_km	0.0413067240
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	-0.0419541444
## Compactness_Coefficient	0.0026026227
## Circularity_Ratio	-0.0067440632
## Elongation_Ratio	0.0135630387
## Shape_Factor	0.0501274147
## Concentration_Time_hr	-0.5415777885
## Length_of_Mainchannel_km	-0.0480884780
## Mean_slope_of_mainchannel_percent	1.0000000000
## Mean_hillslope_length_m	-0.6681192684
## Total_Stream_Length_km	-0.0474631511
## First_order_stream_frequency	-0.0557148988
## Drainage_Density_km_over_km2	-0.0801406065
##	Mean_hillslope_length_m
## Area_of_basin_km2	-0.086830202
## Perimeter_of_basin_km	-0.097546277
## Max_Elevation	-0.976100493
## Min_Elevation	-0.966412179
## Elevation_Difference	-0.649322231
## Mean_Elevation	-0.976432501
## Mean_Slope	-0.725848165
## Length_of_Directing_Vector_km	-0.124248878
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	-0.006101928
## Compactness_Coefficient	-0.074702534
## Circularity_Ratio	0.078708721
## Elongation_Ratio	0.054309895
## Shape_Factor	0.021935590
## Concentration_Time_hr	0.533190662
## Length_of_Mainchannel_km	-0.053644883
## Mean_slope_of_mainchannel_percent	-0.668119268
## Mean_hillslope_length_m	1.0000000000
## Total_Stream_Length_km	-0.053467451
## First_order_stream_frequency	0.068526699
## Drainage_Density_km_over_km2	0.027552614
##	Total_Stream_Length_km
## Area_of_basin_km2	0.886655499
## Perimeter_of_basin_km	0.912065876
## Max_Elevation	0.050305343
## Min_Elevation	-0.053392624
## Elevation_Difference	0.401542793
## Mean_Elevation	-0.002122928

## Mean_Slope	-0.075037094
## Length_of_Directing_Vector_km	0.900873075
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	-0.014834648
## Compactness_Coefficient	0.476467186
## Circularity_Ratio	-0.457493385
## Elongation_Ratio	-0.594894045
## Shape_Factor	-0.437778253
## Concentration_Time_hr	0.379287551
## Length_of_Mainchannel_km	0.999712141
## Mean_slope_of_mainchannel_percent	-0.047463151
## Mean_hillslope_length_m	-0.053467451
## Total_Stream_Length_km	1.000000000
## First_order_stream_frequency	-0.577169211
## Drainage_Density_km_over_km2	0.274631240
##	
## Area_of_basin_km2	-0.67654328
## Perimeter_of_basin_km	-0.72972933
## Max_Elevation	-0.10463250
## Min_Elevation	-0.00404504
## Elevation_Difference	-0.42466486
## Mean_Elevation	-0.05648720
## Mean_Slope	-0.07066673
## Length_of_Directing_Vector_km	-0.66625572
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	-0.02573009
## Compactness_Coefficient	-0.16142100
## Circularity_Ratio	0.16831854
## Elongation_Ratio	0.37097976
## Shape_Factor	0.06989293
## Concentration_Time_hr	-0.22050640
## Length_of_Mainchannel_km	-0.57740467
## Mean_slope_of_mainchannel_percent	-0.05571490
## Mean_hillslope_length_m	0.06852670
## Total_Stream_Length_km	-0.57716921
## First_order_stream_frequency	1.000000000
## Drainage_Density_km_over_km2	0.33133675
##	
## Area_of_basin_km2	-0.09991981
## Perimeter_of_basin_km	-0.03785808
## Max_Elevation	-0.08020938
## Min_Elevation	-0.06376248
## Elevation_Difference	-0.10917855
## Mean_Elevation	-0.07439404
## Mean_Slope	-0.17818318
## Length_of_Directing_Vector_km	0.05523891
## Prevalent_Orientation_deg_from_north_ccw	-0.06237302
## Compactness_Coefficient	0.31039540
## Circularity_Ratio	-0.30910781
## Elongation_Ratio	-0.54615778

## Shape_Factor	-0.66918169
## Concentration_Time_hr	0.12574975
## Length_of_Mainchannel_km	0.27366537
## Mean_slope_of_mainchannel_percent	-0.08014061
## Mean_hillslope_length_m	0.02755261
## Total_Stream_Length_km	0.27463124
## First_order_stream_frequency	0.33133675
## Drainage_Density_km_over_km2	1.00000000

El análisis de correlación entre la variable dependiente seleccionada (Densidad de Drenaje) y las demás sometidas a prueba, resultaron con índice mayor a 0.5 factor de forma (-0.669485228) y ratio de elongación (-0.545994239). Para dar mayor robustez al modelo que se diseñó, se incorporaron las variables: pendiente promedio (-0.176066777) y longitud total del curso principal medido en km (0.274832295).

Comprobación del supuesto de distribución normal de las observaciones de las variables analizadas

La comprobación del supuesto de normalidad se hizo mediante el gráfico cuantílar de las variables donde se incluyó el ajuste logarítmico de la variable dependiente a consecuencia del sesgo evidenciado ya que se puede tolerar la no distribución normal de las independientes, no así en la dependiente.

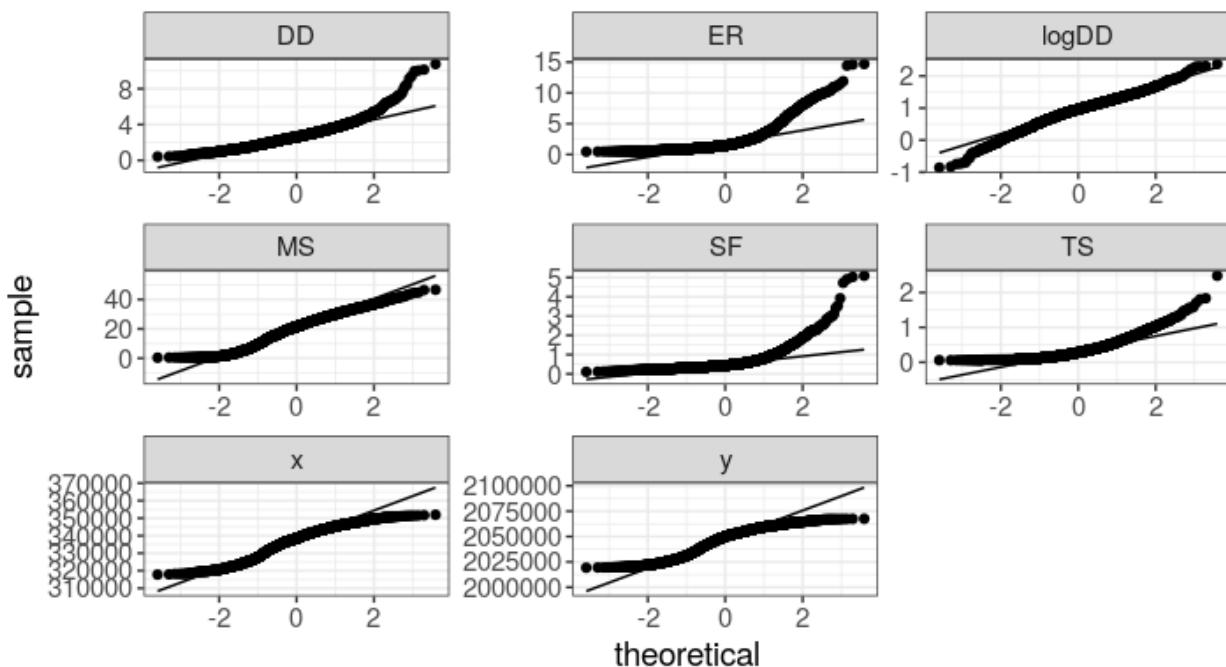


Figure 2: Estadística cuantílar variables utilizadas

Se asume como válido el supuesto de normalidad de los datos tanto en el diagrama cuantílar normal en el cual se muestra un relativo acercamiento de los puntos a una forma de la recta que representan las observaciones de cada una de las variables analizadas, como los indicadores numéricos de la prueba de Shapiro-Wilk con “p” menores a 0.05, indicando significancia y que se cumple el supuesto de distribución normal de los datos de las variables analizadas.

Comprobación de supuesto de autocorrelación de la variable dependiente transformada (I de Moran Global).

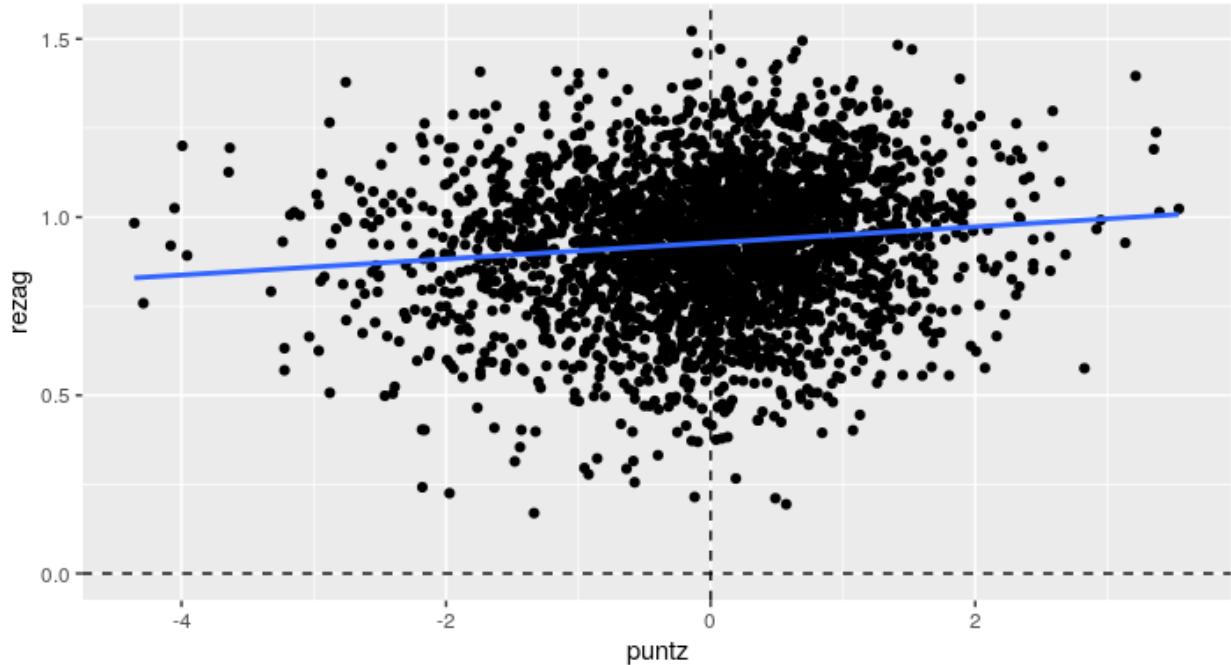


Figure 3: Diagrama Dispersion G.Moran

Visualización porcentual de la dispersión de la Variable seleccionada Densidad de Drenage ajustada logarítmicamente en cuatro cuadrantes

Se rechaza preliminarmente la hipótesis nula la cual sostiene que NO hay autocorrelación espacial dado un valor de " $p < 0.05$ (6.07e-05) y se acepta la hipótesis alternativa de que existe autocorrelación espacial global.

Evaluación de la autocorrelación espacial local de la variable dependiente transformada

La aparición de parches rojos y azules indican la existencia de autocorrelación local. Los parches rojos traducen hotspots o altos valores de correlación. Los parches azules traducen coldspots e indican autocorrelación con valores bajos. Finalmente, los valores grises indican ausencia de correlación local.

Análisis de vecindad por contigüidad (vecxcont)

Resultaron 3027 regiones ya que cada observación en este caso funge como una unidad espacial independiente. La prueba de peso homogéneo de vecindad arrojó 5760 conexiones distintas de cero con un promedio de conexiones de 1.901618 para un valor porcentual de 6.28%, dos regiones con 9 conexiones y 695 regiones sin conexión alguna.

Análisis de Vecindad por cantidad de los 5 vecinos más cercanos Los valores de la data completa y la de los 5 vecinos más cercanos ya que cada observación corresponde a una unidad espacial, es decir, absolutamente todas las observaciones son vecinos entre si (In knearneigh(coords, k = 5) : knearneigh: identical points found).

Análisis de Vecindad por peso de observaciones vecinas en Varselpol3 Por tratarse de un espacio geográfico limitado cuyas unidades espaciales (microcuenca) corresponden a las mismas observaciones puntuales, los valores de conexiones y vecindades no difieren mucho en las diferentes combinaciones de vecindad examinadas. En este caso el número de regiones sigue siendo

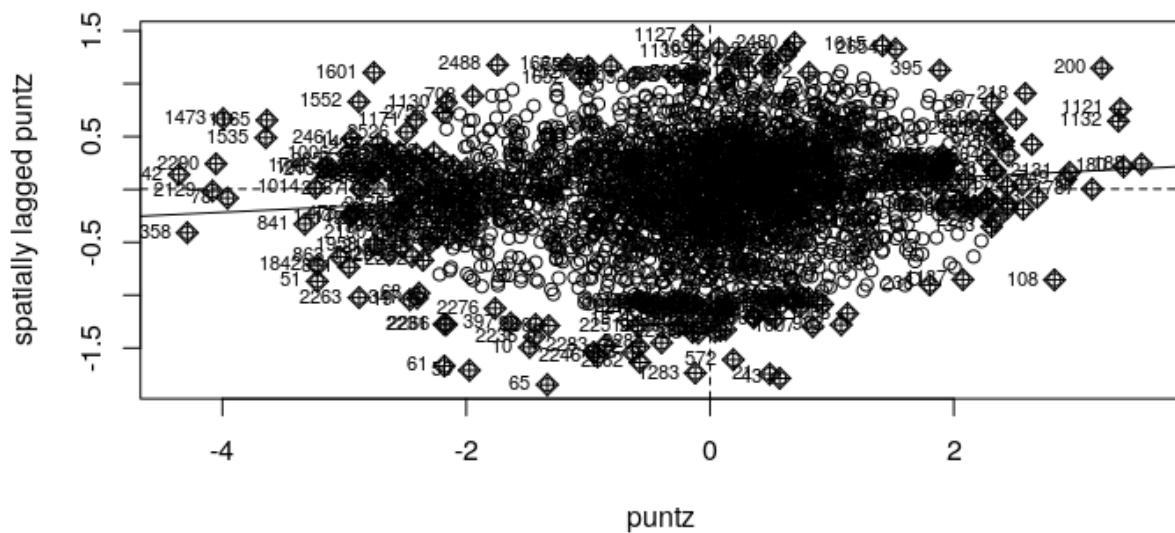


Figure 4: Diagrama dispersion Moran PesoW

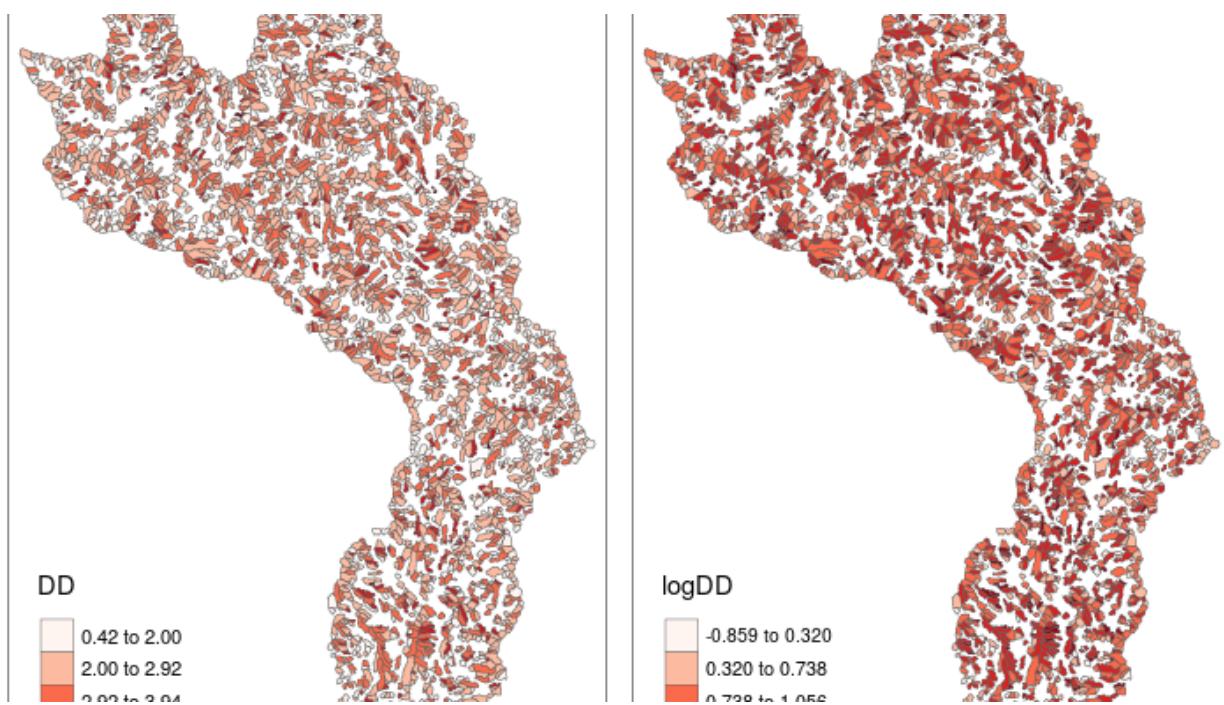


Figure 5: Variable dependiente original y ajustada log.

Clusters LISA de logDD

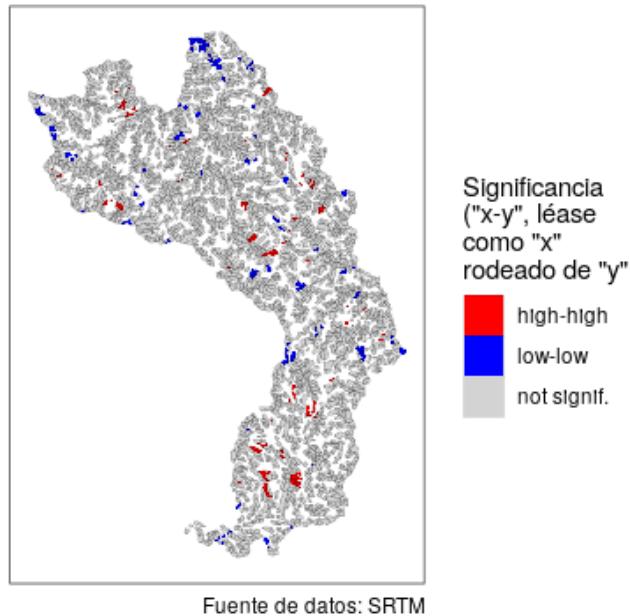


Figure 6: Lisa Cluster Variable Dependiente Transformada LogDD

3027. Las conexiones diferentes de cero son 15145, el porcentaje de conexiones no cero es 16.5% y el promedio de conexiones es de 5.

Modelización

Visualización porcentual de la dispersión de la Variable seleccionada Densidad de Drenaje ajustada logarítmicamente en cuatro cuadrantes

Comprobación del Supuesto de Autocorrelación mediante la Prueba de Moran Global:

El valor de “p” es mayor a 0.05 (valor comúnmente establecido), se acepta la hipótesis nula “No hay autocorrelación espacial global” con sus vecinos en la variable dependiente en su versión original. Aunque el sistema de cuenta de la aceptación de la misma (alternative hypothesis: greater).

En el caso de la prueba de los supuestos de autocorrelación de la variable tanto por contigüidad como por peso coinciden por la misma causa que en el análisis de vecindad en entidades poligonales, las unidades espaciales (microcuenca) son los mismos puntos de observación, es decir, tenemos tantos modelos como puntos de observación en el análisis.

El valor de “p” es mayor a 0.05 (valor comúnmente establecido), se acepta la hipótesis nula “No hay autocorrelación espacial global” con sus vecinos respecto a la variable porcentual ajustada por logaritmo. Aunque el sistema de cuenta de la aceptación de la misma (alternative hypothesis: greater).

Comprobación del supuesto de normalidad (shapiro-wilk)

data: Varselpctlog\$logDD_PCT W = 0.33291, p-value < 2.2e-16

El valor de “p” es menor a 0.05 (2.2e-16), se rechaza la hipótesis nula “No hay distribución normal”, en otras palabras se acepta la hipótesis alternativa “Existe distribución normal de las observaciones de la variable analizada(Varselpctlog\$logDD_PCT)”.

data: Varselpctlog\$logDD_PCTLOG W = 0.36622, p-value < 2.2e-16

El valor de “p” es menor a 0.05 (2.2e-16), se rechaza la hipótesis nula “No hay distribución

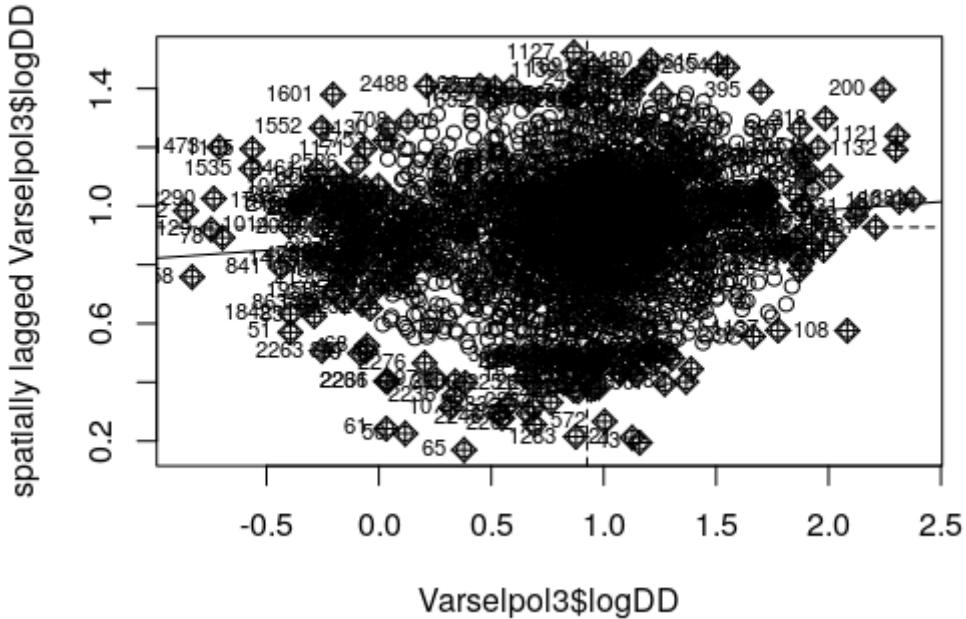


Figure 7: Variable seleccionada Densidad de drenaje log.

```

Moran I test under randomisation

data: log1p(datos$drainage_Density_km_over_km2)
weights: Pesow

Moran I statistic standard deviate = -0.29298, p-value = 0.6152
alternative hypothesis: greater
sample estimates:
Moran I statistic      Expectation      Variance
-0.0035567313     -0.0003302510     0.0001212804

```

Figure 8: Comprobacion supuesto autorrelacion

```

Moran I test under randomisation

data: log1p(datos$drainage_Density_km_over_km2)
weights: Pesow

Moran I statistic standard deviate = -0.29298, p-value = 0.6152
alternative hypothesis: greater
sample estimates:
Moran I statistic      Expectation      Variance
-0.0035567313     -0.0003302510     0.0001212804

```

Figure 9: Supuesto correlacion variable

```
Moran I test under randomisation

data: rnorm(3027)
weights: Pesow

Moran I statistic standard deviate = -0.98231, p-value = 0.837
alternative hypothesis: greater
sample estimates:
Moran I statistic      Expectation      Variance
-0.0111409462     -0.0003304693     0.0001211145
```

Figure 10: Hipotesis alternativa

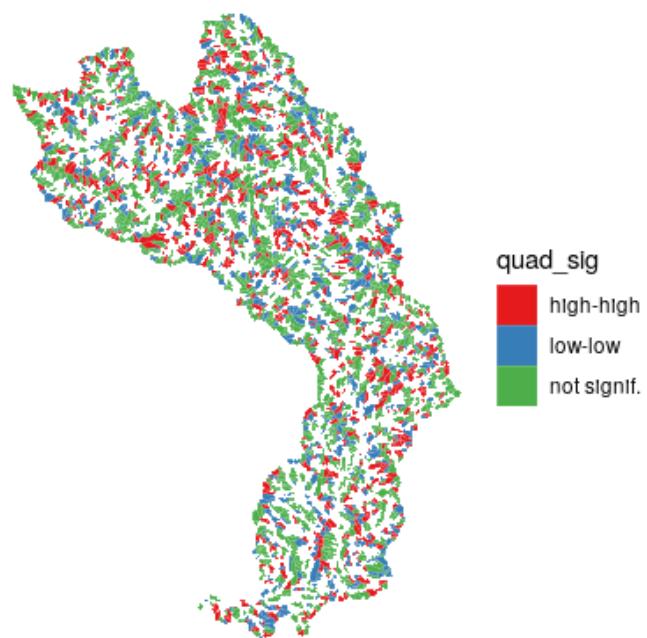


Figure 11: Correlación local Variable Log.

normal” , en otras palabras se acepta la hipótesis alternativa “Existe distribución normal de las observaciones de la variable analizada(Varselpctlog\$logDD_PCTLOG)”. En síntesis, se cumple el supuesto de normalidad en ambas versiones de la variable dependiente del modelo analizado.

Comprobación de supuesto de heterocedasticidad (prueba de Breusch-Pagan)

```
modlinc %>% bptest

## 
##   studentized Breusch-Pagan test
##
## data: .
## BP = 83.112, df = 7, p-value = 3.189e-15
```

Figure 12: Prueba de Breush-Pagan

El valor de “p” es menor a 0.05 (3.189e-15), se rechaza la hipótesis nula “No hay homocedasticidad” , en otras palabras se acepta la hipótesis alternativa “Existe heterocedasticidad las observaciones de las variables analizadas en el modelo lineal con la versión de ajuste logarítmico de la variable dependiente.

Análisis del modelo lineal

Todos los coeficientes de las variables del modelo han resultado significativas ($p < 0.05$) y el R cuadrado ajustado del modelo indica que las variables independientes analizadas explican en un 75.07% a la variable dependiente Densidad de drenaje. Por otro lado, si el valor de las independientes fuera cero, la variable dependiente tomaría el valor 1.3355070 (intercepto).

Las demás pruebas correspondientes al mismo modelo lineal utilizando versiones transformadas de las variables(% y Log e) resultaron no significativos, es decir, las variables independientes analizadas no logran explicar el comportamiento de la variable dependiente, en tanto, no resultan útiles para la predicción de escenarios de la Densidad de Drenaje de la cuenca del Río Ocoa.

Análisis del modelo espacial autoregresivo (Variate Simultaneous Autoregressive Model) No se profundizó este temario en el curso de la asignatura

...

4 Información de soporte

Material de Apoyo incluido en el repositorio de la maestría Teledetección y Ciencias de la Información Geográfica. Asesoría con el profesor José Ramón Martínez.

...

```

modlin <- Varselpol3 %>%
  select(logDD, TS, MS, SF, ER) %>%
  st_drop_geometry() %>%
  lm(logDD ~ ., .)
modlin %>% summary

##
## Call:
## lm(formula = logDD ~ ., data = .)
##
## Residuals:
##       Min     1Q Median     3Q    Max
## -0.48090 -0.13441 -0.03593  0.08960  2.48258
##
## Coefficients:
##             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) 1.3355070  0.0139626 95.649 < 2e-16 ***
## TS          0.2364021  0.0194249 12.170 < 2e-16 ***
## MS         -0.0027199  0.0003979 -6.835 9.85e-12 ***
## SF         -1.3103680  0.0240590 -54.465 < 2e-16 ***
## ER          0.1482183  0.0062693  23.642 < 2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.2045 on 3022 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.7511, Adjusted R-squared:  0.7507
## F-statistic: 2279 on 4 and 3022 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Figure 13: Análisis Modelo Lineal

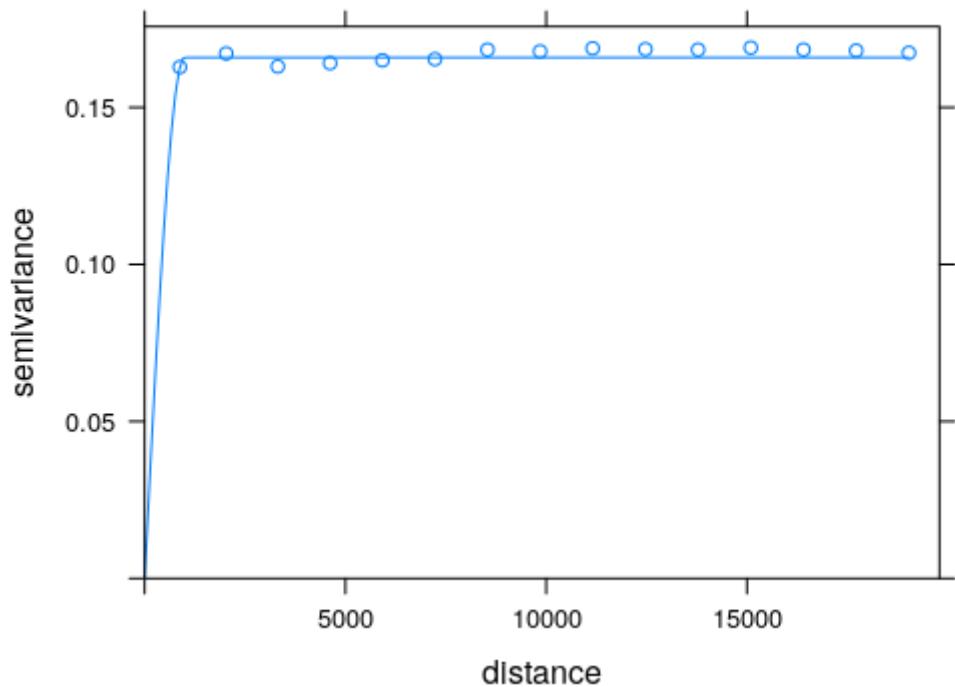


Figure 14: Variograma Modelo Sph

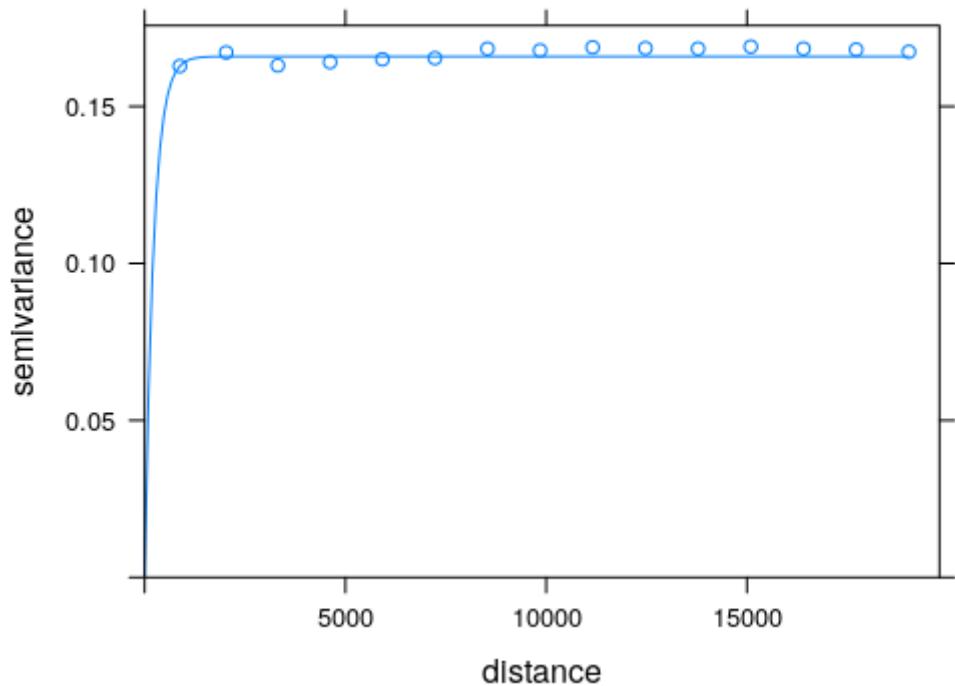


Figure 15: Variograma Modelo Gau

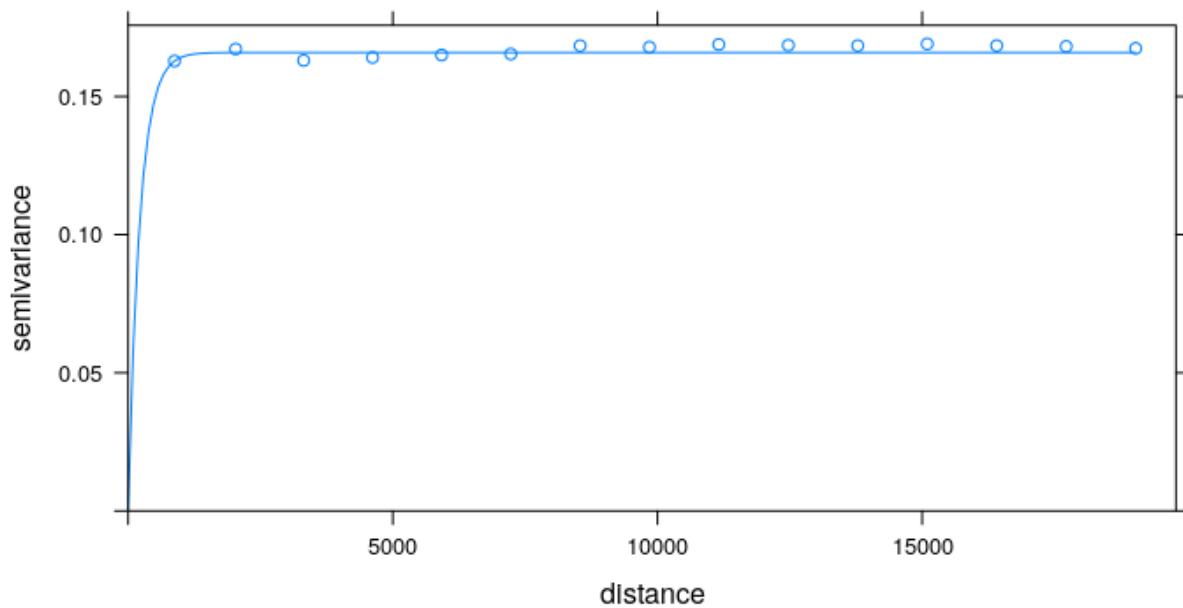


Figure 16: Variograma Moded Exp

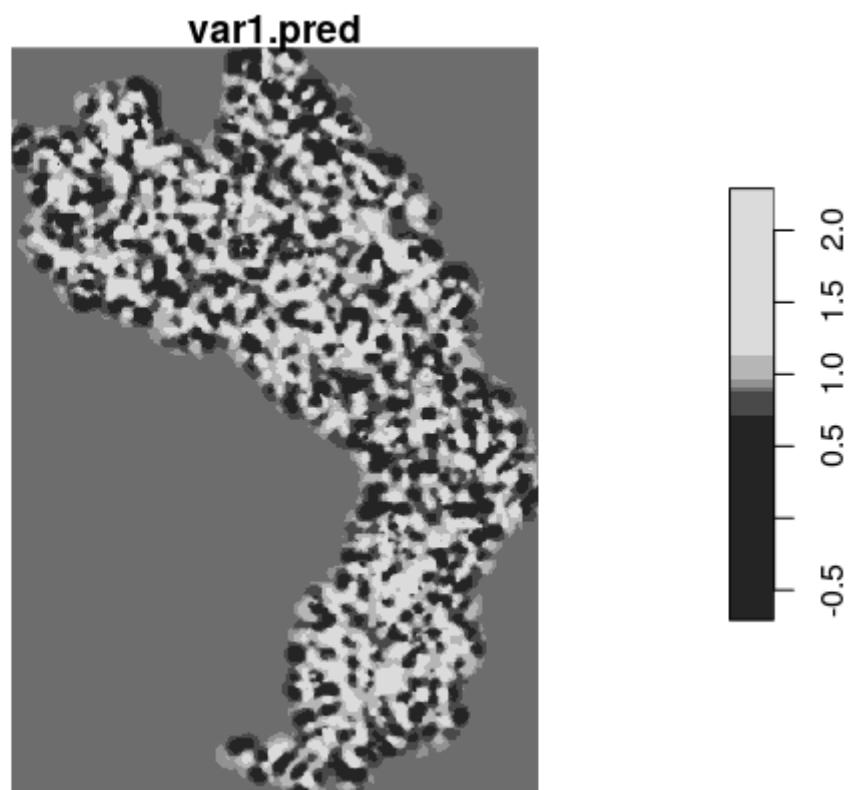


Figure 17: Kriging Ordinario

5 Script reproducible

6 LIBRERIAS A UTILIZAR

```
library(sf)
library(tidyverse)
library(gstat)
library(stars)
library(tmap)
library(ez)
library(RColorBrewer)
library(sp)
library(spdep)
library(lmtest)
library(spData)
source('lisaclusters.R')
```

IMPORTACION, ORGANIZACION DE DATOS E INTERPORABILIDAD

7 Cargar datos de variables

```
(datos <- st_read('paramsoutlet_orden1.gpkg', crs = 32619))
(datos <- datos %>% st_difference())
(pol1 <- st_read(dsn = 'r_stream_basins_1.geojson', crs = 32619))
pol2 <- st_read(dsn = 'r_stream_basins_2.geojson', crs = 32619)
pol3 <- st_read(dsn = 'r_stream_basins_3.geojson', crs = 32619)
pol4 <- st_read(dsn = 'r_stream_basins_4.geojson', crs = 32619)
```

Orden de Red Cuencas 1, clasificacion de Strahler

```
datos %>% dplyr::filter(Max_order_Strahler==1)

datos %>%
  select_if(is.numeric) %>%
  gather(variable, valor, -geom) %>%
  st_drop_geometry() %>%
  group_by(variable) %>%
  summarise(m=mean(valor, na.rm=T))

datos %>%
  select_if(is.numeric) %>%
  gather(variable, valor, -geom) %>%
  tm_shape() + tm_dots(col = 'valor') + tm_facets(by='variable',
  free.coords = F, free.scales = T)
```

Tabla cols numericas, con varianza

```

datosnum <- datos %>%
  st_drop_geometry() %>%
  select_if(is.numeric) %>%
  select_if(~ sum(!is.na(.))>0) %>%
  select_if(function(x) var(x, na.rm=T) !=0)

```

Evaluacion de correlacion entre las variables como criterio de seleccion

```

datosnum %>% ezCor(r_size_lims = 2:3, label_size = 2)
datosnum %>% cor

```

Union espacial de las variables seleccionadas

```

VARSEL <- datos %>%
  dplyr::select(
    DD = Drainage_Density_km_over_km2,
    SF = Shape_Factor,
    ER = Elongation_Ratio,
    TS = Total_Stream_Length_km,
    MS = Mean_Slope
  )

```

```

Varselpol1 <- pol1 %>% st_join(left = F, VARSEL)
Varselpol2 <- Varselpol1 %>%
  mutate(logDD = log(DD))

```

Creación de objeto XY con atributos del objeto Varselpol2 mediante el centroide de los polígonos

```

xy <- Varselpol2 %>%
  st_centroid() %>%
  mutate(x=unlist(map(geometry,1)),
        y=unlist(map(geometry,2))) %>%
  st_drop_geometry() %>%
  select(fid, x, y)

```

Creación del objeto Varselpol3 mediante unión de XY y Varselpol2

```

Varselpol3 <- Varselpol2 %>%
  inner_join(xy)
Varselpol3

```

VECINDAD. Analisis de vecindad por contiguidad

```

Varselpol3 <- Varselpol2 %>%
  inner_join(xy)
Varselpol3

```

Análisis de Vecindad por cantidad de los 5 vecinos más cercanos

```
Varselpol3.sp <- as_Spatial(Varselpol3)
coords <- coordinates(Varselpol3.sp)
VecxK <- knn2nb(knearneigh(coords, k=5))
```

Análisis de Vecindad por peso de observaciones vecinas en Varselpol3

```
PesoW <- nb2listw(VecxK)
PesoW

PesowB <- nb2listw(VecxK, style = 'B')
PesowB
```

Análisis de Vecindad por peso de observaciones vecinas en la data completa

```
datos <- datos %>% st_difference()
coords <- coordinates(as_Spatial(datos))
nb <- knn2nb(knearneigh(coords, k = 5))
summary(nb)
```

ANALISIS ESDA

```
p1 <- tm_shape(Varselpol3) +
  tm_fill(col = "DD", style = 'jenks', palette = brewer.pal(9, name = 'Reds')) +
  tm_borders(lwd = 0.5)
p1

p2 <- tm_shape(Varselpol3) +
  tm_fill(col = "logDD", style = 'jenks',
          palette = brewer.pal(9, name = 'Reds'), midpoint = NA) +
  tm_borders(lwd = 0.5)
tmap_arrange(p1, p2)

Varselpol3 %>% st_drop_geometry() %>%
  gather(variable, valor, -(fid:label)) %>%
  ggplot() + aes(sample=valor) +
  stat_qq() + stat_qq_line() + theme_bw() +
  theme(text = element_text(size = 14)) +
  facet_wrap(~variable, scales = 'free')

Varselpol3 %>% st_drop_geometry() %>%
  gather(variable, valor, -(fid:label)) %>% group_by(variable) %>%
  summarise(prueba_normalidad=shapiro.test(valor)$p.value)

lisamap(objesp = Varselpol3,
        var ='logDD',
        pesos = PesoW,
```

```

tituloleyenda = 'Significancia\n("x-y", léase\ncomo "x"\nnrodeado de "y"',
leyenda = T,
anchuratitulo = 1000,
tamanotitulo = 16,
fuentedatos = 'SRTM',
titulomap = paste0('Clusters LISA de logDD'))

```

MODELIZACION

Variable seleccionada Densidad de Drenaje

```

Varselpctlog <- Varselpol3 %>% mutate_each(
  funs(PCT=round(./DD,4)*100,
       PCTLLOG=log(round(./DD,4)*100)),
  -1, -2, -geometry, -label)

```

Varselpctlog

Comprobando autocorrelación mediante la prueba moran global

```

moran.plot(Varselpol3$logDD, Pesow)
(gmoranw <- moran.test(na.action = na.exclude, zero.policy = T,
                      x = log1p(datos$Drainage_Density_km_over_km2), listw = Pesow))

(gmoranb <- moran.test(na.action = na.exclude, zero.policy = T,
                      x = log1p(datos$Drainage_Density_km_over_km2), listw = PesowB))

gmoranb <- moran.test(na.action = na.exclude, zero.policy = T,
                      x = Varselpctlog$logDD_PCT, listw = PesowB)
gmoranb

gmoranwl <- moran.test(na.action = na.exclude, zero.policy = T,
                      x = Varselpctlog$logDD_PCTLLOG, listw = Pesow )
gmoranwl

gmoranbl <- moran.test(na.action = na.exclude, zero.policy = T,
                      x = Varselpctlog$logDD_PCTLLOG, listw = PesowB)
gmoranbl

(gmoranwale<-moran.test(na.action = na.exclude, zero.policy = T,
                         x=rnorm(3027),listw = Pesow))

```

Evaluacion del supuesto de normalidad

```

shapiro.test(Varselpctlog$logDD_PCT)
shapiro.test(Varselpctlog$logDD_PCTLLOG)

```

Modelo lineal

```

modlin <- Varselpol3 %>%
  select(logDD, TS, MS, SF, ER) %>%
  st_drop_geometry() %>%
  lm(logDD ~ ., .)
modlin %>% summary

modlinc <- Varselpctlog %>%
  select(contains('_PCTLOG')) %>%
  st_drop_geometry() %>%
  lm(logDD_PCTLOG ~ ., .)
modlinc %>% summary

modlinc %>% bptest

sar <- Varselpctlog %>% select(contains('_PCTLOG')) %>%
  st_drop_geometry() %>%
  spautolm(
    formula = logDD_PCTLOG ~ .,
    data = .,
    listw = Pesow)
summary(sar)

sar2 <- Varselpctlog %>% select(contains('_PCTLOG')) %>%
  st_drop_geometry() %>%
  spautolm(
    formula = logDD_PCTLOG ~ TS_PCTLOG + MS_PCTLOG + SF_PCTLOG + ER_PCTLOG,
    data = .,
    listw = Pesow)
summary(sar2)

Sar3 <- Varselpctlog %>% select(contains('_PCTLOG')) %>%
  st_drop_geometry() %>%
  spautolm(
    formula = logDD_PCTLOG ~ TS_PCTLOG + MS_PCTLOG + SF_PCTLOG,
    data = .,
    listw = Pesow)
summary(Sar3)

```

AUTOCORRELACION ESPACIAL LOCAL

```

Varselpol_lomo <- localmoran(Varselpctlog$logDD, listw = Pesow)
summary(Varselpol_lomo)

Varselpctlog$laglogDD <- scale (Varselpctlog$logDD) %>% as.vector()

Varselpctlog$laglogDD <- lag.listw(Pesow, Varselpctlog$logDD)

```

```

summary(Varselpctlog$sVarselpctlogDD)

summary(Varselpctlog$laglogDD)

puntz <- Varselpctlog$sVarselpctlogDD
rezag <- Varselpctlog$laglogDD
df <- data.frame(puntz, rezag)

moran.plot(puntz, PesoW)

```

Diagrama de dispersión de Moran en ggplot

```

ggplot(df, aes(puntz, rezag)) +
  geom_point() + geom_smooth(method = 'lm', se = F) +
  geom_hline(yintercept = 0, linetype = 'dashed') +
  geom_vline(xintercept = 0, linetype = 'dashed')

```

Variable nueva sobre significancia de la correlación local, rellena con NAs

```

Varselpctlog$quad_sig <- NA

```

Cuadrante high-high quadrant

```

Varselpctlog[(Varselpctlog$sVarselpctlog >= 0 &
              Varselpctlog$laglogDD >= 0) &
              (Varselpol_lomo[, 4] <= 0.05), "quad_sig"] <- "high-high"

```

Cuadrante low-low

```

Varselpctlog[(Varselpctlog$sVarselpctlog <= 0 &
              Varselpctlog$laglogDD >= 0) &
              (Varselpol_lomo[, 4] <= 0.05), "quad_sig"] <- "low-low"

```

Cuadrante high-low

```

Varselpctlog[(Varselpctlog$sVarselpctlog >= 0 &
              Varselpctlog$laglogDD <= 0) &
              (Varselpol_lomo[, 4] <= 0.05), "quad_sig"] <- "high-low"

```

Cuadrante low-high

```

Varselpctlog[(Varselpctlog$sVarselpctlog <= 0 &
              Varselpctlog$laglogDD >= 0) &
              (Varselpol_lomo[, 4] <= 0.05), "quad_sig"] <- "low-high"

```

No significativas

```
Varselpctlog[(Varselpol_lomo[, 4] > 0.05), "quad_sig"] <- "not signif."
```

Convertir a factorial

```
Varselpctlog$quad_sig <- as.factor(Varselpctlog$quad_sig)
```

Mapa Significancia

```
Varselpctlog %>%
  ggplot() +
  aes(fill = quad_sig) +
  geom_sf(color = "white", size = .05) +
  theme_void() + scale_fill_brewer(palette = "Set1")
```

KRIGING ORDINARIO

Asignacion del sistema de referencia destino

```
crsdestino <- 32619
```

Creacion de objeto para la interpolacion

```
orden1logdd <- datos %>% mutate(logDD=log(Drainage_Density_km_over_km2)) %>% select(logDD)
```

VARIOGRAMA MODELO Creamos el objeto v para representar el variograma v

```
v <- variogram(logDD~1, orden1logdd)
plot(v)
```

Variograma modelo Esferico

```
v_m <- fit.variogram(v, vgm(model = "Sph", range = 1000))
v_m
plot(v, v_m)
```

Variograma modelo Exponencial

```
v_m2 <- fit.variogram(v, vgm(model = "Exp", range = 1000))
v_m2
plot(v, v_m2)
```

Variograma modelo Gauseano

```
v_m3 <- fit.variogram(v, vgm(model = "Gau", range = 1000))
v_m3
plot(v, v_m3, plot.numbers = T)
plot(v, v_m3)
```

Atributos de Error

```

attr(v_m, 'SSErr')

attr(v_m2, 'SSErr') # Este fue el elegido

attr(v_m3, 'SSErr')

grd <- st_bbox(orden1logdd) %>%
  st_as_stars(dx = 100) %>% #1000 metros=1km de resolución espacial
  st_set_crs(crsdestino)
grd

plot(grd)

```

Mapa Kriging ordinario

```

k <- krige(formula = logDD~1, locations = orden1logdd, newdata = grd, model = v_m)

plot(k)

```

Representacion ggplot objeto stars

```

ggplot() +
  geom_stars(data = k, aes(fill = var1.pred, x = x, y = y)) +
  scale_fill_gradient(low="#deebf7", high="#3182bd") +
  geom_sf(data = st_cast(Varselpol3, "MULTILINESTRING")) +
  geom_sf(data = orden1logdd) +
  geom_sf_text(data = Varselpol3, aes(label='')), check_overlap = T, size = 1) +
  theme_bw()

ggplot() +
  geom_stars(data = exp(k), aes(fill = var1.pred, x = x, y = y)) +
  scale_fill_gradient(low="#deebf7", high="#3182bd", trans = 'log10') +
  geom_sf(data = st_cast(Varselpol3, "MULTILINESTRING")) +
  geom_sf(data = orden1logdd) +
  geom_sf_text(data = Varselpol3, aes(label='')), check_overlap = T, size = 1) +
  theme_bw()

```

...

8 Conclusiones

Las conclusiones de este ejercicio académico se limita a los análisis de los resultados de cada una de las pruebas de supuestos aplicadas. No es posible hacer inferencias conclusivas dado el limitado número de variables utilizadas en el análisis en relación con la gran cantidad de variables interviniéntes en la dinámica de una cuenca hidrográfica que deberían tomarse en cuenta para diseñar un modelo de predicción de esta índole.

...

Referencias

- ALDSTADT, J. (2010). *Handbook of applied spatial analysis. software tools, methods and applications* (p. 828). Editorial Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- BIVAND, E. y G.-R., R; Pebesma. (2013). *Applied spatial data analysis with r* (second). Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
- CELEMÍN, J. P. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociacion espacial. importancia, estructura y aplicacion. *Revista Universitaria de Geografia*, 18, 11–31.
- DI LEO Margherita, D. S. M. (2013). *An open-source approach for catchment's physiographic characterization*. San Francisco, CA, USA 9-13 Dec. abstract NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS Earth Resources Observation; Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota: <https://grass.osgeo.org/grass76/manuals/addons/r.basin.html#cite-as/>.
- GONZÁLEZ de M., A. I. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. 38, 311–329.
- STRAHLER, A. N. (1957). *Quantitative analysis of watershed geomorphology*. *eos, transactions american geophysical union*. Quantitative analysis of watershed geomorphology: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/TR038i006p00913/>.