

PostGIS

Análisis Espacial Avanzado

Segunda edición

José Carlos Martínez Llario

PostGIS Análisis Espacial Avanzado

© 2012-2018 José Carlos Martínez Llario.

Todos los nombres propios de programas, sistemas operativos, empresas, etc. que aparecen en este libro son marcas registradas de sus respectivas compañías u organizaciones.

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

Edición 2. Revisión 3. <https://cartosig.webs.upv.es>

ISBN-13: 978-1727059359

ISBN-10: 1727059352

Prólogo

A quién va dirigido este libro

Este libro está pensado para cubrir diferentes perfiles, desde un usuario que desea introducirse en el mundo de las bases de datos espaciales y PostGIS, hasta un perfil más experto que aunque posee ya conocimientos de PostGIS necesita realizar análisis espaciales avanzados e incluso extender PostGIS con nuevas funcionalidades.

Está enfocado como un **manual de aprendizaje**, guiado con una gran cantidad de ejemplos prácticos con cartografía real, con el objetivo de que un usuario tradicional de SIG de escritorio pueda migrar a PostGIS de una forma no traumática.

Desde el ámbito de la producción cartográfica se describen los problemas de la precisión cartográfica de los datos y el análisis espacial, las validaciones topológicas, reglas de topología, etc. que posibilitan la utilización de PostGIS no únicamente como un gestor de bases de datos espacial sino como una herramienta de producción cartográfica.

Se ha tratado de realizar una publicación que sea útil tanto para un usuario experto en ciencias de la computación y bases de datos pero que desconoce cómo gestionar de forma apropiada la cartografía, como para un usuario experto en ciencias cartográficas pero que al ser reticente a dejar los SIG de escritorio está sacrificando el conocimiento de unas funcionalidades espaciales increíbles.

Conocimientos previos

Es aconsejable disponer de unos conocimientos previos a nivel de usuario de Sistemas de Información Geográfica, aunque no son necesarios para la comprensión del texto sí que son aconsejables para la lectura fluida del mismo.

Si el lector no posee conocimientos sobre el lenguaje SQL o éstos son muy superficiales es necesario que tras leer el capítulo A introductorio y antes de pasar al capítulo B estudie con detalle el apartado H.2 sobre SQL.

Estructura

PostGIS: Análisis espacial avanzado consta de ocho capítulos. Tras un primer capítulo A introductorio se recomienda al lector estudiar de forma completa los capítulos B y C para pasar a ser más selectivo con el capítulo D según el problema a resolver.

El estudio del capítulo E de programación no es necesario para comprender el resto de la publicación y se puede dejar para más adelante (saltando directamente al capítulo F), aunque es recomendable estudiarlo ya que abre un mundo de posibilidades.

El capítulo F aporta interesantes propuestas para la mejora y aprendizaje de nuevos conceptos en PostGIS, aunque los apartados referentes a datos *OSM* y *pgrouting* se pueden obviar si el usuario no está interesado en dichas temáticas.

El capítulo G, sobre análisis *raster* y topología persistente puede ser consultado por el usuario únicamente si desea aprender dichas funcionalidades.

Por último, el capítulo H de anexos incorpora una guía de SQL (imprescindible para usuarios nóveles en bases de datos), algunas notas de administración y las soluciones a los problemas propuestos.

A Introducción

Se inicia la publicación con este breve capítulo donde se estudia la normativa relacionada con PostGIS y el modelo de geometrías seguido. Se aborda la instalación y se introducen los clientes SQL *pgadmin* y *psql*.

B Núcleo

En este capítulo se describe la parte fundamental de la funcionalidad PostGIS y del modelo de geometría utilizado siguiendo los estándares del OGC y normas ISO. Se estudian las relaciones espaciales con detalle, diferentes programas de utilidad para importar exportar datos PostGIS, indexación espacial, tablas y vistas espaciales, etc.

C Análisis espacial

Esta parte del libro tiene como objetivo capacitar al lector para la realización de análisis espaciales con PostGIS. Tras estudiar los operadores espaciales, éstos se combinan de forma adecuada para conseguir efectuar las típicas operaciones de análisis espacial vectorial de los SIG de escritorio, como superposición de capas, extracción, proximidad, disolución, concatenaciones espaciales, transformación, conversión, referencia lineal, etc.

El aprendizaje de este capítulo es fundamental para que el lector vislumbre la potencia de PostGIS y la libertad que añade en el análisis espacial respecto a cualquier SIG de escritorio. Aunque complicado, especialmente para un usuario no experto en ciencias de la computación y bases de datos, mediante la detallada explicación cualquier lector será capaz a su finalización de realizar complejas consultas espaciales.

D Validación cartográfica

Este capítulo introduce ya conceptos más avanzados relacionados con la gestión cartográfica de los datos. Cuestiones como la precisión cartográfica y el uso de tolerancias o la validación y corrección de geometrías son muy importantes para tratar de forma adecuada la información cartográfica y que a menudo se pasan por alto especialmente por usuarios no expertos en producción cartográfica.

El diseño y la aplicación de reglas de topología entre geometrías de una o varias capas se utilizará para detectar y corregir errores cartográficos.

También se analizan otros aspectos como la optimización del análisis espacial mediante la realización de un buen diseño previo y la aplicación de técnicas rejilla, el análisis espacial sobre el esferoide (problema directo e inverso de la geodesia) y los cambios de sistema de referencia con diferente *datum*.

E Programación

Aunque no es necesario conocer como programar en PostGIS, muchos usuarios pueden tener dicha inquietud. En este apartado se describe como crear nuevas funciones por el usuario para extender la funcionalidad espacial de PostGIS.

El usuario se sorprenderá por lo sencillo que es aprender y crear nuevos procedimientos almacenados utilizando *PL/pgsql*. Él mismo se dará cuenta del mundo de posibilidades que ofrece este apartado, especialmente aplicado a la gestión de los modelos de datos.

Mediante la creación de disparadores (*triggers*) junto con las funciones *PL/pgsql* personalizadas se puede dotar al modelo de datos cartográfico de un comportamiento dinámico e introducir cierta lógica de negocio dentro de la propia base de datos.

F Miscelánea espacial

Este apartado aglutina parte del resto de la funcionalidad de PostGIS no vista en los capítulos anteriores y que generalmente se referencia desde otros capítulos previos como el análisis espacial 3D y las geometrías curvas.

Especialmente interesante son quizás las funciones ventanas, que aún son desconocidas por algunos usuarios de PostGIS y que facilitan enormemente cierto tipo de consultas espaciales. La dependencia funcional, importación de datos OSM y análisis de rutas con *pgrouting* son otros temas tratados aquí.

El capítulo se completa con las particiones declarativas y las consultas paralelas que se pueden utilizar para incrementar el rendimiento de la base de datos espacial.

G Extensiones

En PostGIS 2.0 se introdujeron dos grandes bloques de funcionalidades en la distribución oficial: el análisis *raster* y un modelo de topología persistente vectorial.

Se estudia con detalle la gestión *raster* y las operaciones de análisis típicas *raster* (reclasificaciones, mapas derivados de modelos digitales de elevación, álgebra de mapas, etc.) y mixtas vectorial-*raster*.

Por otra parte, la topología persistente aporta un nuevo modelo de estructuración de la información vectorial especialmente interesante para el diseño e implementación de modelos cartográficos complejos.

H Anexos

Los anexos están divididos en tres bloques: Un primer bloque sobre administración de PostgreSQL donde se introducen temas como la utilización de variables del sistema, métodos de autenticación, localización, gestión de usuarios, etc.

Un segundo bloque sobre el lenguaje SQL, donde en apenas 30 páginas se hace un recorrido imprescindible para los usuarios que no conozcan este lenguaje y que es necesario estudiar con detalle antes de adentrarse en el mundo PostGIS. Un tercer bloque con las soluciones de todos los problemas propuestos a lo largo de la publicación cierra el capítulo.

Datos publicación

Desde el blog oficial del autor¹, se pueden **descargar los datos necesarios** (cartografía, código SQL, etc.) para la realización de todos los ejercicios del libro.

Convenciones tipográficas

Se utiliza tipografía cursiva en los siguientes casos:

- Nombres de tablas, columnas y métodos PostGIS.
- Palabras en inglés generalmente provenientes del mundo informático como *prompt*, *bugs*, *raster*, *online*, etc.
- Palabras no aceptadas por la Real Academia de la Lengua pero usadas comúnmente en el ámbito de la geometría computacional o informático: *renderizado*, *modificación*, *cardinalidad*, etc. Aunque son palabras no admitidas se ha decidido mantenerlas por su carácter aclaratorio.

A lo largo de la publicación se insta al lector a ejecutar comandos o sentencias SQL:

- Los ejemplos de sentencias SQL se encabezan por el nombre de la base de datos seguido del símbolo '#' como aparece en el *prompt* del cliente *psql* de PostgreSQL:

```
s1=# create table viarial (gid serial primary key, tipo integer,
                           geom geometry (multipolygon, 23030) );
```

- Los ejemplos de comandos PostgreSQL, PostGIS o cualquier otra utilidad lanzados desde una terminal o símbolo del sistema, se encabezan con el texto: '*consola*>':

```
consola> psql -U postgres -f ruta_a_postgis.sql -d s0
```

¹ <https://cartosig.webs.upv.es>

Acerca del autor

José Carlos Martínez Llario es profesor en la Universidad Politécnica de Valencia desde hace veinte años donde imparte asignaturas en sistemas de información geográfica, producción cartográfica y bases de datos espaciales. Obtuvo el Doctorado en Geodesia y Cartografía por dicha Universidad en el año 2003, y sus líneas de investigación de los últimos años están relacionadas con las bases de datos espaciales, los modelos de datos cartográficos y las infraestructuras de datos espaciales.

Uno de sus últimos trabajos ha consistido en el diseño y desarrollo del proyecto *Jaspa*, software de código abierto que es una extensión espacial para bases de datos relacionales con una funcionalidad similar a PostGIS y un sistema de reglas de topología. Dentro del mundo académico presenta una actividad investigadora continuada donde ha sido investigador principal de proyectos de investigación fundamental del Ministerio de Economía y Competitividad de España y realizado convenios de I+D con empresas y otras instituciones públicas.

Ficha pública del autor en <http://www.upv.es/ficha-personal/jomarlla>

Quiero mostrar mi agradecimiento a las comunidades de usuarios y a las instituciones que apuestan por el software libre, ya que esta publicación no podría haberse llevado a cabo sin su esfuerzo. En especial, a todos los miembros y colaboradores del equipo de PostGIS que de forma desinteresada han contestado a todas mis dudas siempre de forma amable y eficaz.

Cursos online de PostGIS certificados por la UPV

El autor de esta publicación junto con otros miembros del grupo CartoSiG UPV imparte unos cursos online de PostGIS, IDEs y SIG certificados por el Centro de Formación Permanente de la Universitat Politècnica de València.

Se trata de unos cursos completos, de calidad ampliamente contrastada y más de cien horas reales de aprendizaje que se pueden realizar completamente a distancia y su elaboración está basada en la experiencia de docencia presencial oficial de universidad e investigación del autor de esta publicación.

Son cursos que han realizado miembros de las principales empresas u organizaciones públicas relacionados con la cartografía a nivel nacional y gozan de una muy buena reputación.

Esta publicación forma un material de apoyo o consulta de PostGIS pero para un aprendizaje desde el inicio, práctico, con casos reales, asentando conocimientos y siguiendo una metodología docente ya probada se aconseja al lector a realizar el curso online de PostGIS.

Más información en: <https://cartosig.webs.upv.es/cursos>

Contenido

A	INTRODUCCIÓN	25
1.	PRIMEROS PASOS.....	27
1.1.	<i>Normativa relacionada</i>	28
1.2.	<i>Instalación</i>	29
	PostgreSQL	29
	Comprobación del servicio	31
	Path del sistema.....	31
	Instalación de PostGIS	32
1.3.	<i>Clientes SQL</i>	33
	Clientes de texto: <i>psql</i>	33
	Codificación terminal (MS Windows)	34
	Conexión al servidor	34
	Clientes gráficos: <i>pgadmin</i>	36
1.4.	<i>Tipos básicos de datos</i>	37
1.5.	<i>Notas antes de empezar</i>	39
	Creación de una nueva base de datos	39
	Cambio de contraseña	39
	Conocimientos previos	39
2.	CARTOGRAFÍA Y CÓDIGO FUENTE DE LOS EJEMPLOS	40
B	NÚCLEO.....	41
1.	LA BASE DE DATOS ESPACIAL	43
1.1.	<i>Creación base de datos espacial sin utilizar extensions</i>	43
	Módulo principal y vectorial	43
	Módulo de <i>raster</i>	45
	Módulo de topología persistente	45
	Nota sobre los ficheros SQL de PostGIS.....	45
1.2.	<i>Creación base de datos espacial utilizando extensions</i>	46
1.3.	<i>Comprobación de la base de datos espacial</i>	46
1.4.	<i>Funciones extra y plantillas</i>	47
	Creación de una plantilla espacial	47
1.5.	<i>Metadatos sobre los CRS</i>	48
1.6.	<i>Creación y borrado de una tabla espacial</i>	50
	Utilizando <i>typmod</i>	50
	Método 1: Forma rápida.....	50
	Método 2: Forma lenta	51
	Utilizando restricciones de tipo <i>check</i>	52
1.7.	<i>Metadatos de las columnas de geometría</i>	54
2.	TIPOS DE GEOMETRÍA	55
	Vértices con Z, M o ZM.....	56
2.1.	<i>Creación e inserción de geometrías</i>	56
	Conversiones a otros formatos	59

Recordatorio de funciones PostGIS	60
Conversiones automáticas al tipo <i>geometry</i>	60
Relajación de las restricciones de una columna de geometría	60
2.2. <i>Importación y exportación de cartografía.</i>	61
Importación de un fichero <i>shape</i> con las utilidades de PostGIS	61
Trabajo con esquemas: <i>search_path</i>	63
Problemas de codificación de los ficheros <i>shape</i>	64
Versión gráfica del importador <i>shp2pgsql</i>	65
Exportación a un fichero <i>shape</i> con las utilidades de PostGIS	65
Importadores / exportadores: GDAL/OGR	66
Comando <i>ogrinfo</i>	67
Comando <i>ogr2ogr</i>	67
Problemas de conversión entre juegos de caracteres	69
Otros importadores / exportadores	70
Conversión de datos OSM a PostGIS	70
Utilización de SIG de escritorio	70
3. EJEMPLOS DEL CAPÍTULO	71
3.1. <i>Datos cartográficos utilizados en los ejemplos.</i>	71
3.2. <i>Visualización y edición gráfica de capas PostGIS.</i>	71
Conclusiones	73
4. MODELO <i>SIMPLE FEATURES</i> O FENÓMENOS SIMPLES	77
4.1. <i>Esquema de herencia de las geometrías</i>	77
<i>JTS Builder</i>	78
4.2. <i>Dimensión de una geometría</i>	80
4.3. <i>Interior, contorno y exterior de las geometrías.</i>	80
Contorno de una <i>MultiCurve</i>	82
4.4. <i>Definición de las geometrías básicas.</i>	82
Subconsultas en PostGIS	83
Subselect	83
Common Table Expressions (CTE)	84
<i>ST_Point</i> y <i>ST_Multipoint</i>	85
<i>ST_Curve</i> <- <i>ST_Linestring</i>	85
<i>ST_MultiCurve</i> <- <i>ST_MultiLinestring</i>	86
<i>ST_Surface</i> <- <i>ST_CurvePolygon</i> <- <i>ST_Polygon</i>	87
<i>ST_MultiSurface</i> : <i>ST_MultiPolygon</i>	89
5. RELACIONES ESPACIALES	92
5.1. <i>Matriz DE-9IM.</i>	92
Uso de patrones DE-9IM personalizados	93
5.2. <i>Predicados espaciales.</i>	93
<i>ST_Disjoint</i> , <i>ST_Intersects</i>	94
Resumen de los predicados	95
<i>ST_Touches</i>	96
<i>ST_Crosses</i>	97
<i>ST_Overlaps</i>	97
<i>ST_Equals</i>	98
Igualdad no topológica	98
Operador de igualdad de cajas	99
<i>ST_Covers</i> , <i>ST_CoveredBy</i>	101
5.3. <i>Ejemplos de predicados espaciales.</i>	102
6. INDEXACIÓN ESPACIAL	106
6.1. <i>Creación y utilización de índices espaciales.</i>	106

6.2. Otros operadores GiST sobre cajas y KNN	108
Otros operadores de comparación de cajas.....	108
Operadores que utilizan KNN	108
6.3. Planificador	109
Modificación del plan de ejecución	110
Visualización gráfica del plan de ejecución	110
6.4. Predicados espaciales con el operador && embebido	111
6.5. Indexación espacial 3D.....	112
6.6. Índices BRIN	113
7. CREACIÓN DE TABLAS Y VISTAS PARA ALMACENAR CONSULTAS ESPACIALES.....	114
7.1. Almacenar resultados en tablas espaciales.....	114
Procedimiento riguroso	114
Procedimiento práctico.....	115
Uso de CAST para definir el tipo de los campos de la tabla	115
Ejemplos.....	115
Copia de la estructura de una tabla.....	116
7.2. Utilización de vistas espaciales.....	117
Creación de reglas para actualizar vistas	118
Capa de eventos.....	120
Vistas como control dinámico de la calidad cartográfica	120

C ANÁLISIS ESPACIAL..... 123

1. INTRODUCCIÓN	125
Utilización de tablas en los ejemplos	125
2. OPERADORES ESPACIALES.....	126
2.1. Ejemplos gráficos.....	128
2.2. Tipos de geometrías devueltas	130
2.3. Homogeneización de las geometrías devueltas.....	131
Utilización de STX_Extract	133
3. OPERACIONES DE SUPERPOSICIÓN (OVERLAY).....	135
3.1. Intersección (Intersect)	135
Entrada: polígonos, salida: líneas	136
Entrada: polígonos y líneas, salida: líneas.....	136
Otros casos	136
3.2. Borrado (Erase).....	137
Polígonos A que son borrados parcial o totalmente por polígonos B	138
Polígonos de A que no presentan ningún solape con B y se conservan íntegros	138
Borrado en un solo paso	139
3.3. Superposición (Overlay)	139
3.4. Identidad (Identity)	141
3.5. Actualización (Update)	142
4. OPERACIONES DE EXTRACCIÓN	143
4.1. Recorte (Clip).....	143
4.2. Selección (Select).....	144
5. PROXIMIDAD.....	145
5.1. Área de influencia (Buffer).....	145
5.2. Selecciones según distancias.....	147
ST_DWithin	148
5.3. Tabla de proximidad (Near table).....	149

5.4.	<i>Vecinos más próximos a una única geometría</i>	149
5.5.	<i>Vecinos más próximos a una capa (subconsulta anidada)</i>	150
	Mediante <i>subselects</i> anidados	151
	Mediante <i>subselect</i> y agregado de mínima distancia con identificador	152
5.6.	<i>Vecinos más próximos a una capa (subconsultas correladas)</i>	153
	Obtener los n vecinos más próximos	155
5.7.	<i>Vecinos más próximos a una capa (consultas laterales)</i>	156
5.8.	<i>Vecinos más próximos a una capa (funciones ventana)</i>	157
5.9.	<i>Vecinos más próximos a una capa (operadores KNN)</i>	158
6.	GENERALES	161
6.1.	<i>Concatenación espacial (Spatial join)</i>	161
	Cardinalidad ríos (1) corrientes (1)	161
	Utilización de Update.....	162
	Cardinalidad ríos (1) corrientes (0..n)	162
	Update con subconsultas correladas.....	164
	Cardinalidad ríos (1) corrientes (0)	164
	Cardinalidad ríos (0) corrientes (1)	165
6.2.	<i>Adición (Append/Merge)</i>	166
7.	GENERALIZACIÓN	167
7.1.	<i>Disolución (Dissolve)</i>	167
	ST_Collect y ST_Union	169
	ST_UnaryUnion	170
7.2.	<i>Simplificación de geometrías</i>	170
8.	TRANSFORMACIÓN Y EDICIÓN DE COORDENADAS.....	174
8.1.	<i>Edición</i>	174
8.2.	<i>Transformaciones</i>	175
8.3.	<i>Proyecciones</i>	176
	Cambio de CRS de una capa	177
	Reproyección de una capa	179
9.	CONVERSIONES	180
9.1.	<i>Multigeometrias a geometrías simples</i>	180
	Funciones ‘set returning’	180
	ST_Dump.....	181
9.2.	<i>Conversión a segmentos lineales</i>	182
9.3.	<i>Conversión a entidades puntuales</i>	183
	Desde entidades lineales.....	183
	Desde entidades poligonales	184
9.4.	<i>Conversión a entidades lineales</i>	185
	Desde entidades poligonales	185
	Desde entidades puntuales.....	185
9.5.	<i>Conversión a entidades superficiales</i>	186
	Modificación de geometrías lineales	187
9.6.	<i>Cambio de dimensión de las coordenadas</i>	189
10.	REFERENCIA LINEAL (LRS).....	190
	Referencia lineal: fracción de distancia como medida	190
	Referencia lineal: coordenadas M o Z como medida	191
	Pegando líneas.....	192
	Inserción de vértices en los puntos más cercanos.....	193

D	VALIDACIÓN CARTOGRÁFICA	195
1.	OPTIMIZACIÓN DEL ANÁLISIS ESPACIAL	197
1.1.	<i>Diseño del análisis espacial</i>	197
1.2.	<i>Segmentación de capas mediante rejilla</i>	198
	Disoluciones.....	200
	Borrado.....	203
	Recorte	205
	Intersección	205
	Efectos no deseados del análisis con rejilla.....	206
1.3.	<i>TopologyException</i>	207
	SFCGAL: Ventajas e inconvenientes en el análisis 2D.....	207
2.	PROYECCIONES Y TRANSFORMACIONES ENTRE DATUM	208
2.1.	<i>Caso práctico: de ED50 a ETRS89</i>	209
	Modelo de 7 parámetros.....	210
	Modelo de rejilla NTv2.....	211
	Reiniciación de los parámetros.....	212
	Configuración localización biblioteca.....	212
3.	TOLERANCIA EN EL ANÁLISIS ESPACIAL	213
3.1.	<i>Precisión Cartográfica y la tolerancia</i>	214
3.2.	<i>Destrucción de la topología de una cartografía</i>	216
	Geometrías sin <i>modificar</i> en los puntos compartidos.....	218
3.3.	<i>Ajuste de vértices y segmentos entre geometrías</i>	218
4.	VALIDACIÓN DE LAS GEOMETRÍAS	220
4.1.	<i>Modelo ESRI contra modelo OGC/PostGIS</i>	221
4.2.	<i>Comandos que generan polígonos no válidos</i>	222
4.3.	<i>Corrección de geometrías no válidas</i>	222
5.	ANÁLISIS ESPACIAL SOBRE EL ESFEROIDE.....	225
5.1.	<i>Medida de distancias sobre el esferoide</i>	226
5.2.	<i>Tipo geography</i>	227
5.3.	<i>Problema directo e inverso de la Geodesia con PostGIS</i>	230
5.4.	<i>Creación de tablas espaciales</i>	231
5.5.	<i>Comparación de rendimiento geography-geometry</i>	232
5.6.	<i>Ventajas e inconvenientes de usar el tipo geography</i>	233
5.7.	<i>Análisis espacial directo sobre el esferoide</i>	234
6.	VALIDACIÓN CARTOGRÁFICA CON REGLAS DE TOPOLOGÍA	235
6.1.	<i>Validación independiente</i>	235
	Geometrías no válidas según el OGC.....	236
	Geometrías vacías o nulas	236
	Auto-intersecciones.....	236
	Sentido de los anillos.....	238
	Vértices repetidos	238
	Geometrías duplicadas	238
	Otros.....	239
6.2.	<i>Validación conjunta (una capa)</i>	240
	<i>Must not overlap</i>	241
	<i>Must not have gaps</i>	242
	<i>Must not have dangles</i>	244
	Distancia a la geometría más cercana.....	245
	Solución en un único paso con consultas laterales	246
	Falta de continuidad de las geometrías.....	246

<i>Must not have seudos</i>	247
6.3. Validación conjunta (dos capas).....	248
<i>Must contain one point</i>	248
<i>Must be covered by layer</i>	249
<i>Must be cross connected</i>	251
6.4. JAspa (JAva SPAtial)	253
6.5. Definición algebraica de las reglas de topología	255
6.6. Control de reglas de topología mediante disparadores	258

E PROGRAMACIÓN 259

1. INTRODUCCIÓN	261
1.1. Modelos cartográficos	263
2. SCRIPTS PL/PgSQL EN POSTGIS	264
2.1. Introducción al lenguaje	264
Instalación del lenguaje	264
Estructura de un método PL/PgSQL.....	264
Declaración de variables y asignación de variables.....	265
Condicionales	266
Llamadas a otras funciones	266
Opción <i>Strict</i>	266
Reutilización de los resultados de una función.....	267
Borrado de una función	267
Formas alternativas de la firma de un método.....	268
Devolviendo tipos compuestos.....	269
Arrays.....	269
Bucles.....	270
Notificación de mensajes y Excepciones.....	271
Devolviendo tablas con una columna	271
Devolviendo tablas con varias columnas.....	272
Número de argumentos variable: <i>VariaDic</i>	273
Ejercicios espaciales complementarios	273
2.2. Trabajando con sentencias SQL	275
Sentencias directas	275
Almacenar el resultado de una consulta simple	275
Estado de la consulta.....	276
Sentencias SQL con parámetros.....	276
Iterando sobre los resultados.....	277
Ejercicios espaciales complementarios	278
Sentencias creadas de forma dinámica	279
Ejecución dinámica de comandos	279
Utilización de comillas simples y dobles	280
Parámetros con la cláusula <i>Using</i>	281
Iterando sobre los resultados (<i>Execute</i>).....	282
Planificación de la ejecución del comando	282
2.3. Funciones disparador	283
Función disparadora en PL/PgSQL	283
Creación del disparador SQL	284
Resumen y principales características de los disparadores.....	286
Ejercicios espaciales complementarios	287

2.4. Estructura Arco/Nodo mediante disparadores.....	294
Inserción.....	295
Borrado	296
Actualización	297
Comprobación.....	299
Creación de nodos en las intersecciones.....	300
2.5. Funciones agregadas.....	304
2.6. Otras funciones.....	306

F MISCELÁNEA ESPACIAL..... 307

1. ARRAYS, AGREGADOS Y SET RETURNING DE GEOMETRÍAS.....	309
1.1. Funciones returning set de geometrías	310
2. TIPOS COMPUESTOS.....	311
2.1. Tipos compuestos en PostGIS.....	312
3. COMPORTAMIENTO MULTI-GEOMETRÍAS	313
4. DEPENDENCIA FUNCIONAL (GROUP BY)	315
5. FUNCIONES DE VENTANA ESPACIALES	317
5.1. Funciones ventana de PostGIS	321
6. COPIA DE SEGURIDAD DE LA BASE DE DATOS ESPACIAL.....	322
Otros métodos	324
6.1. Backup y migración de una base de datos espacial.....	324
6.2. Instalación de PostGIS en un esquema personalizado.....	325
Mediante extensiones.....	325
Sin el uso de extensiones.....	326
7. OPERACIONES 3D	327
7.1. Tipos de funciones espaciales 3D	327
7.2. Cálculos con SFCGAL.....	329
7.3. Nuevas geometrías superficiales	331
Ejemplos de superficies.....	332
Visualización de geometrías superficiales.....	334
8. GEOMETRÍAS CURVAS	335
8.1. Geometrías curvas de tipo multi	337
8.2. Conversión entre geometrías lineales y curvas.....	337
9. TIPOS DE DATOS DE CAJAS.....	339
10. IMPORTACIÓN DE DATOS OSM.....	340
Osm2Pgsql	341
Instalación del tipo hstore	342
Importación	342
Sistema de referencia usado en OSM.....	343
Consultas utilizando etiquetas	344
10.1. Osmosis.....	345
11. RUTAS MEDIANTE PGROUTING.....	347
Instalación	347
Caminos más cortos	348
Topología de red	349
Carga cartografía y topología	349
Grafos directos, indirectos y costes	351
Problema del camino más corto	351

Dijkstra.....	351
A Star.....	355
Turn Restricted Shortest Path.....	356
Utilización de datos OSM.....	357
Osm2pgrouting.....	358
Utilización de cartografía sin estructura de red.....	362
12. CONTROL DE VERSIONES EN POSTGIS.....	366
12.1. Ejercicio práctico de control de revisiones.....	367
Preparación de los datos y configuración del versionado.....	367
Ejercicio de edición concurrente con versionado.....	368
13. PARTICIONES DE DATOS.....	372
13.1. Herencia de tablas.....	372
Limitaciones de la herencia de tablas.....	377
13.2. Particiones declarativas.....	378
Limitaciones de las particiones declarativas (PostgreSQL 10).....	379
Mejoras de las particiones declarativas en PostgreSQL 11.....	380
13.3. Tablespace y particiones de datos.....	380
14. CONSULTAS ESPACIALES PARALELAS.....	381
14.1. Otros parámetros de configuración.....	386

G EXTENSIONES 387

1. RASTER.....	389
1.1. Introducción.....	389
1.2. Tipo raster.....	389
Creación de un objeto <i>raster</i> vacío.....	390
Propiedades de un raster.....	391
Adición de bandas al <i>raster</i>	393
Propiedades de una banda.....	394
Raster con varias bandas.....	395
Asignación de valores a las celdas.....	396
Estadísticas de las bandas.....	397
Coordenadas píxel y coordenadas terreno.....	398
Lectura de los valores de las celdas.....	399
Vectorización.....	399
Rasterización de geometrías.....	400
Exportación a otros formatos <i>raster</i>	403
1.3. Capas raster.....	405
Importación de ficheros <i>raster</i>	406
Visualización.....	408
Alineamiento y teselado regular.....	409
Alignment.....	409
Regular blocking.....	410
Restricciones de la capa <i>raster</i>	410
Eliminación y creación de restricciones.....	412
Restricciones de las overviews.....	413
Vistas de metadatos.....	414
Indexación espacial.....	414
Exportación de capas <i>raster</i> con <i>GDAL</i>	415

1.4. <i>Análisis de capas teseladas</i>	416
Estadísticas	416
Histogramas	417
Reclasificación.....	418
Reclasificación de múltiples bandas	420
Apoyo de geometrías sobre un MDE	420
Vectorización	421
Reescalado.....	422
Álgebra de mapas (una capa)	424
Funciones personalizadas.....	425
Álgebra de mapas (dos capas).....	427
Igual alineamiento y teselado	428
Diferente teselado	431
Unión de dos objetos raster	433
Diferente alineamiento: remuestreo	433
Funciones de vecindad	435
Agrupación de teselas previa	436
Comandos con funciones de vecindad predefinidas.....	439
Rasterización	440
Análisis estadístico zonal	442
Intersección	443
Intersección vectorial-raster	443
Intersección raster-raster	444
2. TOPOLOGÍA PERSISTENTE.....	447
2.1. <i>Introducción</i>	447
Modelo espaguetti	447
Modelo topología SQL/MM.....	448
2.2. <i>Creación de topología</i>	449
Ejemplo: topo-geometrías y primitivas	450
Instalación	451
Capa de topología.....	452
Creación de primitivas topológicas	452
Tabla de nodos	454
Tabla de ejes	455
Tabla de caras	457
Modificación de primitivas topológicas	457
Resumen de la topología	459
Acceso a primitivas topológicas	460
2.3. <i>Capas de topo-geometrías</i>	460
Creación de la capa	460
Tabla de metadatos layer.....	461
Inserción de topo-geometrías	462
Constructores de topo-geometrías	462
Tipo topogeometry.....	463
Tabla relation	463
Borrado de una capa de topo-geometrías	464
Conversión a geometrías	464
Visualización de capas de topo-geometrías	465
2.4. <i>Creación automática de topo-geometrías</i>	466
2.5. <i>Capas derivadas o hijas</i>	467

2.6. <i>Análisis espacial</i>	469
Simplificación de geometrías adyacentes	470
Utilización de índices espaciales con topo-geometrías.....	470

H ANEXOS 473

1. NOTAS SOBRE ADMINISTRACIÓN	475
1.1. <i>Variables de sistema</i>	475
Modificación a nivel de sesión	475
Vista <code>pg_settings</code>	476
Modificación a nivel de base de datos.....	477
Modificación de los valores por defecto.....	478
1.2. <i>Autenticación del cliente</i>	478
Recuperación de la contraseña de administración	481
1.3. <i>Cluster de la base de datos</i>	481
Arrancar y parar el servidor de PostgreSQL	482
Inicializar y utilizar un <i>cluster</i> alternativo.....	483
Creación de un nuevo cluster	484
Inicio y parada del servidor PostgreSQL	484
1.4. <i>Localización</i>	485
Codificaciones soportadas.....	487
Conversión entre el cliente y el servidor	488
1.5. <i>Vacuum</i>	488
Comando <i>Vacuum</i>	488
Comando <i>Analyze</i>	489
<i>Autovacuum</i>	490
1.6. <i>Roles de la base de datos y privilegios</i>	490
Atributos de los roles.....	491
Grupos de roles	492
<i>Grant</i> y <i>Revoke</i>	493
1.7. <i>Ficheros log</i>	496
Dónde se envían los mensajes de log	497
Cuándo se envían los mensajes log	497
Qué se puede enviar al log	500
1.8. <i>Consumo de recursos</i>	500
1.9. <i>Otros</i>	502
2. SQL.....	503
2.1. <i>Lenguaje SQL</i>	503
2.2. <i>Instrucciones SQL</i>	504
2.3. <i>Definición de datos</i>	505
Listado de los ejemplos	505
Tablas	505
Creación	505
Modificación	506
Borrado	506
Uso de mayúsculas	507
Dominios.....	507
Definición	507
Modificación.....	508
Borrado	508

Esquemas	508
Definición	509
Borrado	509
Restricciones	509
Restricción de valor no nulo	510
Restricción de unicidad	510
Restricción de clave primaria	511
Restricción general	512
Restricción de clave ajena o integridad referencial	513
Programas de diseño conceptual	516
2.4. Manipulación de datos	517
Inserción, borrado y actualización	518
Insert	518
Update	519
Delete	519
Consultas elementales sobre una tabla	520
Listado de los ejemplos	521
Uso de CAST o conversiones explícitas de tipos	521
Uso de Predicados	521
Funciones	523
Funciones de valor	523
Funciones agregadas	524
2.5. Consultas avanzadas	525
Subconsultas	525
Mediante el predicado In	525
Mediante los predicados All, Any, Some	526
Mediante el predicado Exists	527
Mediante los predicados Distinct y Unique	527
Mediante los predicados de comparación	528
2.6. Trabajo con varias tablas	528
Los operadores conjuntistas: Union, Except e Intersect	528
Concatenaciones (Joins): Cross Join, Inner Join y Outer Join	529
Producto cartesiano o concatenación cruzada (CROSS JOIN)	529
Concatenación interna (INNER JOIN)	530
Concatenación externa (OUTER JOIN)	531
2.7. Inserción de filas provenientes de una consulta	532
Creación de una tabla nueva	532
Inserción de registros en una tabla existente	533
2.8. Vistas	533
2.9. Índices	534
Creación y borrado	535
3. SOLUCIONES	537
3.1. Capítulo B	537
3.2. Capítulo C	545
3.3. Capítulo D	552
3.4. Capítulo E	556
3.5. Capítulo G	561
3.6. Capítulo H	564
4. RECURSOS	566

Figuras

Figura 1 Servicio de PostgreSQL en MS Windows.....	31
Figura 2 Path del sistema en MS Windows.....	32
Figura 3 Instalación de PostGIS con Stack Builder.....	32
Figura 4 Listado bases de datos.....	34
Figura 5 Herramienta <i>pgAdmin4</i> para PostgreSQL.....	36
Figura 6 Cliente SQL en <i>pgAdmin4</i>	37
Figura 7 Tipos básicos de geometrías en PostGIS.....	56
Figura 8 Versión gráfica del comando <i>shp2pgsql: shp2pgsql-gui</i>	65
Figura 9 Funcionalidades de importación a PostGIS (QGIS).....	70
Figura 10 Consultas SQL y salida gráfica directa en <i>OpenJUMP</i>	74
Figura 11 Gestor de PostGIS <i>DB Manager</i> de <i>QGIS</i>	74
Figura 12 Visualización de capas PostGIS (<i>gvSIG</i>).....	75
Figura 13 Conexión con PostGIS (<i>gvSIG</i>).....	75
Figura 14 Visualización de capas PostGIS (<i>QGIS</i>).....	76
Figura 15 Conexión con PostGIS (<i>QGIS</i>).....	76
Figura 16 Herencia de las geometrías según norma SQL/MM (ISO 13249.3:2011).....	77
Figura 17 <i>JTS Test Builder</i>	79
Figura 18 Contorno, interior y exterior de una línea, un polígono y un punto.....	81
Figura 19 <i>ST_Linestring</i> simple(a), no simple(b) simple y cerrada: anillo(c), no simple y cerrada (d).....	86
Figura 20 <i>ST_MultiLinestring</i> simple y abierta (a), no simple y abierta (b), no simple y cerrada (c).....	87
Figura 21 Ejemplos de geometrías <i>ST_Polygon</i> válidas.....	88
Figura 22 Ejemplos de geometrías <i>ST_Polygon</i> no válidas.....	88
Figura 23 <i>ST_MultiPolygon</i> válidos: dos <i>ST_Polygon</i> (a, b, d, e) y tres <i>ST_Polygon</i> (c).....	89
Figura 24 Ejemplos de geometrías <i>ST_MultiPolygon</i> no válidas.....	90
Figura 25 Matriz DE-9IM entre dos geometrías (<i>JTS Builder</i>).....	92
Figura 26 Ejemplos de la relación espacial <i>ST_Touches</i>	96
Figura 27 Ejemplos de la relación espacial <i>ST_Crosses</i>	97
Figura 28 Ejemplos de la relación espacial <i>ST_Overlaps</i>	98
Figura 29 Ejemplos de la relación espacial <i>ST_Covers</i>	101
Figura 30 Plan de ejecución del planificador (<i>pgadmin</i>).....	111
Figura 31 Operadores espaciales.....	127
Figura 32 Ejemplos del operador <i>ST_Intersection</i>	128
Figura 33 Ejemplos del operador <i>ST_Union</i>	128
Figura 34 Ejemplos del operador <i>ST_Difference</i>	129
Figura 35 Ejemplos del operador <i>ST_Buffer</i>	129
Figura 36 Geometrías devueltas por un operador espacial. Ejemplo 1.....	130

Figura 37 Geometrías devueltas por un operador espacial. Ejemplo 2	131
Figura 38 Superposición de capas $(A - B) + (A \cap B) + (B - A)$	140
Figura 39 $Identity = (A - B) + (A \cap B)$	141
Figura 40 $Update = (A - B) + B$	142
Figura 41 Error radial	146
Figura 42 Simplificación de geometrías	173
Figura 43 Traducción, rotación y escalado de geometrías	176
Figura 44 Modificación de una <i>MultiLineString</i>	188
Figura 45 <i>ST_BuildArea</i> y <i>ST_Polygonize</i>	188
Figura 46 Diferentes metodologías para un mismo de análisis espacial	197
Figura 47 Capa <i>provche</i> segmentada según una rejilla	200
Figura 48 Área de influencia y su disolución utilizando una rejilla	202
Figura 49 Polígono no deseado en un análisis con rejilla	207
Figura 50 Destrucción de la adyacencia en una capa	216
Figura 51 Destrucción de la adyacencia con <i>ST_Transform</i>	218
Figura 52 Proceso de ajuste de vértices con <i>ST_Snap</i>	219
Figura 53 Polígono ‘lazo’ no válido según el OGC	221
Figura 54 Reconstrucción de un polígono no válido	223
Figura 55 Validación geométrica en <i>OpenJUMP</i>	235
Figura 56 Reglas de topología en <i>gvSIG</i>	240
Figura 57 Reglas de topología en <i>QGIS</i>	240
Figura 58 <i>Must not overlap</i>	241
Figura 59 <i>Must not have gaps</i>	243
Figura 60 <i>Must not have dangles</i>	244
Figura 61 <i>Must not have seudos</i>	248
Figura 62 <i>Must be covered by layer</i>	250
Figura 63 <i>Must be cross connected</i>	252
Figura 64 Creación de nodos en la capa <i>rios</i>	299
Figura 65 Estructura <i>arco-nodo</i> mediante disparadores	300
Figura 66 Ejemplo de funciones de ventana	317
Figura 67 Resultado de la agrupación (<i>cluster</i>) con <i>ST_ClusterKmeans</i>	321
Figura 68 Superficie poliédrica (<i>polyhedral Surface</i>). Fuente: estándar SFA 1.2.1	332
Figura 69 Tipos de geometrías curvas	335
Figura 70 Descarga de cartografía OSM	340
Figura 71 Topología de red	350
Figura 72 Ruta más corta en grafo directo	354
Figura 73 Modificación de cartografía OSM	357
Figura 74 Rutas con OSM	361
Figura 75 Rutas con <i>pgrouting</i> (cartografía sin estructura de red)	365
Figura 76 Edición concurrente con <i>QGIS</i>	369
Figura 77 Tablas particionadas utilizando herencia según el tipo de geometría	377
Figura 78 Estructura de un <i>raster</i>	390

Figura 79 Origen, tamaño de celda e inclinación (<i>skew</i>) de un <i>raster</i>	392
Figura 80 Banda de un <i>raster</i>	394
Figura 81 Carga de una capa <i>raster</i> en QGIS	408
Figura 82 Visualización de la capa <i>dem</i> en QGIS	409
Figura 83 Dos <i>raster</i> con igual alineamiento (<i>alignment</i>).....	410
Figura 84 Conversión <i>raster</i> a vectorial (<i>corine land cover</i>).....	422
Figura 85 Ejemplos de álgebra de mapas entre dos <i>raster</i>	429
Figura 86 Efecto de las funciones de vecindad en los bordes de las teselas	437
Figura 87 Corrección del efecto de vecindad en los bordes de las teselas	438
Figura 88 Vectorización de la capa <i>demmedial</i> tras su reclasificación	438
Figura 89 Vectorización de la capa de pendientes (<i>st_slope</i>) reclasificada	440
Figura 90 Conversión a una capa <i>raster</i> teselada de una capa vectorial	442
Figura 91 Intersección <i>raster</i> -vectorial.....	444
Figura 92 Capas de topo-geometrías	449
Figura 93 Primitivas topológicas	450
Figura 94 Sentido de los ejes conectados	456
Figura 95 Modificación de primitivas topológicas	458
Figura 96 Modificación la geometría de los ejes	459
Figura 97 Editores gráficos de los niveles de ejecución en <i>Linux</i>	483
Figura 98 Ejemplo de restricción de clave ajena (I)	514
Figura 99 Ejemplo de restricción de clave ajena (II)	515
Figura 100 Ejemplo de restricción de clave ajena (III).....	517
Figura 101 <i>MultiLinestring</i> simple con contorno vacío y abierta	539
Figura 102 <i>Erase</i> de la capa <i>tmm</i> y un <i>buffer</i> de ríos	546
Figura 103 Falta de conectividad de las vías de comunicación	555
Figura 104 Archivo de configuración <i>postgresql.conf</i>	565

Tablas

Tabla 1 Comandos de PostgreSQL	35
Tabla 2 Comandos del cliente <i>psql</i>	35
Tabla 3 Tipos básicos de PostgreSQL	38
Tabla 4 Representación WKT de objetos espaciales	55
Tabla 5 Representación WKT de una geometría puntual considerando las coordenadas Z, M o ZM	56
Tabla 6 Constructores y lectores de geometrías	57
Tabla 7 Juegos de caracteres soportados por PostgreSQL	64
Tabla 8 Características PostGIS de los principales SIG de escritorio libres	72
Tabla 9 Definición del interior, exterior y contorno de una geometría	80
Tabla 10 Dimensiones del interior, exterior y contorno de una geometría	81
Tabla 11 Contorno de una <i>MultiLineString</i>	82
Tabla 12 Descripción de los predicados espaciales	94
Tabla 13 Definición algebraica de los predicados espaciales	95
Tabla 14 Predicados espaciales y métodos que utilizan el operador &&	112
Tabla 15 Descripción de los operadores espaciales	126
Tabla 16 Definición de los operadores espaciales	126
Tabla 17 Superposición de capas: <i>Intersect</i>	135
Tabla 18 Superposición de capas: <i>Erase</i>	137
Tabla 19 Superposición de capas: <i>Overlay</i>	139
Tabla 20 Superposición de capas: <i>Identity</i>	141
Tabla 21 Superposición de capas: <i>Update</i>	142
Tabla 22 Extracción de capas: <i>Clip</i>	143
Tabla 23 Proximidad: <i>Buffer</i>	145
Tabla 24 Adición de capas: <i>Append</i>	166
Tabla 25 Generalización de capas: <i>Dissolve</i>	167
Tabla 26 Comandos para la simplificación de geometrías	170
Tabla 27 Índice de eficacia de la indexación espacial I	199
Tabla 28 Índice de eficacia de la indexación espacial II	200
Tabla 29 Parámetros de transformación entre los <i>datum</i> ETRS89 -> ED50 (IGN)	210
Tabla 30 Precisión cartográfica	215
Tabla 31 Propiedades de algunas proyecciones cartográficas	226
Tabla 32 Métodos espaciales que soportan el tipo <i>geography</i>	228
Tabla 33 Constructores, lectores y conversores que soportan el tipo <i>geography</i>	229
Tabla 34 Comparación de tiempos de ejecución de cálculos con <i>geometry</i> y <i>geography</i>	233
Tabla 35 Reglas de topología (<i>Jaspa</i>) entre geometrías de una capa	253
Tabla 36 Reglas de topología (<i>Jaspa</i>) entre geometrías de dos capas	254
Tabla 37 Notación utilizada en la definición de las reglas de topología	255
Tabla 38 Definición de reglas de topología (una sola capa A)	256

Tabla 39 Definición de reglas de topología (entre dos capas).....	257
Tabla 40 Variables <i>PL/PgSQL</i> utilizadas en las funciones disparador.....	284
Tabla 41 Funciones ventana específicas de PostGIS	321
Tabla 42 Funciones PostGIS 3D.....	329
Tabla 43 Funciones PostGIS 3D (vía SFCGAL)	331
Tabla 44 Configuración de las consultas paralelas (planificador).....	386
Tabla 45 Métodos de acceso a las propiedades de un <i>raster</i>	391
Tabla 46 Métodos para modificar las propiedades de un <i>raster</i>	391
Tabla 47 Tipos de píxel soportados en PostGIS <i>raster</i>	393
Tabla 48 Métodos de acceso a las propiedades de un <i>raster</i>	395
Tabla 49 Métodos para modificar las propiedades de una banda de un <i>raster</i>	395
Tabla 50 Métodos de cálculo de estadísticas de una banda de un <i>raster</i>	397
Tabla 51 Métodos de vectorización de un <i>raster</i>	399
Tabla 52 Restricciones <i>Check</i> de una capa <i>raster</i>	411
Tabla 53 Funciones de vecindad predefinidas en PostGIS <i>raster</i>	436
Tabla 54 Funciones para la edición de primitivas topológicas según SQL/MM.....	453
Tabla 55 Fichero <i>pg_hba.conf</i> de autenticación del cliente PostgreSQL	479
Tabla 56 Parámetros <i>locale</i> de PostgreSQL	486
Tabla 57 Variables del sistema (localización de los ficheros <i>log</i>)	497
Tabla 58 Tablas de ejemplo de integridad referencial	514