

---

# Herramientas geoespaciales y técnicas de optimización para mejorar el acceso geográfico a servicios de salud en el departamento de Cusco - Perú

---

Por: **Elisa Solano**

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física  
y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich  
como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

MAGISTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y  
RESPUESTA TEMPRANA A EMERGENCIAS

Junio, 2016

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

©IG - CONAE/UNC año 2016

©FAMAF - UNC año 2016

Dirigida por Dr. Cesare Furlanello y Dr. Marcelo Scavuzzo

Asesoría técnica: Dr. Andrea Gobbi y Lic. Eduardo Romero



Este trabajo se distribuye bajo la licencia Creative Commons.  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/>

*A mi madre, a mi esposo y a mis pequeñas  
Leticia y Florencia que son el centro de mi vida,  
mi fortaleza y mi alegría.*

---

# Resumen

La presente investigación, busca aportar evidencias y generar propuestas para mejorar el acceso a las redes de servicios de salud, enfocado en la atención de emergencias obstétricas, neonatales y la atención integral de la salud de la mujer (gestante, parturienta y madre en periodo de lactancia) en la región de Cusco - Perú, integrando herramientas geoespaciales, algoritmos matemáticos y conocimientos del evento/enfermedad. A pesar de que las técnicas planteadas no son nuevas, el estudio es innovador en el Perú porque permite un acercamiento real al tema de accesibilidad de servicios de salud a partir de elementos de paisaje y de instrumentos matemáticos para dar respuesta clara a una pregunta compleja.

La Tesis consta de dos partes bastante marcadas tanto en sus técnicas como en sus procesos. La primera parte está referida a la obtención de la **superficie de costo** a partir de cinco capas temáticas de información, previamente rasterizadas, proveniente de instituciones nacionales e internacionales, combinadas entre si, asumiendo criterios que modifiquen la velocidad de movimiento de los individuos que buscan atención de la salud, y parten de una localidad hacia los servicios más cercanos, empleando en su desplazamiento la ruta más corta (shortest path). La segunda parte integra el uso de **algoritmos matemáticos**, denominados algoritmos de localización - asignación, que busca seleccionar un número de establecimientos de los existentes en la región que puedan atender a la mayor cantidad de pobladores. El algoritmo empleado es el Maximum Covering Location Problem (MCLP), porque ser el que nos brindó un equilibrio entre el número de establecimientos y la cantidad de la población, con eficiencia y equidad.

Si bien, la investigación está dedicada a resolver problemas de acceso a servicios de salud de las poblaciones, la metodología puede ser aplicada a otros campos en los que la planificación del territorio sea una prioridad.

Palabras clave: Acceso geográfico, herramientas geoespaciales, superficie de costo, algoritmos matemáticos, mortalidad materna y neonatal. . .

---

# Abstract

This research seeks to provide evidence and generate proposals for improving access to health services networks, focused on obstetric care, neonatal emergencies and comprehensive health care for women (pregnant, giving birth and mother in period lactation) in the region of Cusco - Peru, integrating geospatial tools, mathematical algorithms and knowledge of the event / disease. Although the techniques proposed in this document are not new, the study is innovative in Peru because it allows a real approach to the issue of accessibility of health services from landscape elements and mathematical instruments to give a clear answer to a complex question.

It has two parts quite marked on their techniques and their processes, the first part referring to obtaining the **cost surface** using five thematic layers, previously rasterized, from national and international institutions, combined between them and assuming criteria that modify people speed movement seeking health care, from a village to the nearest health services, using in their travel the shortest route (shortest path). The second part integrates the use of **mathematical algorithms**, called location - allocation, the problem is formulated as Maximum Covering Location Problem (MCLP), in order to obtain an adequate number of facilities of health to serve as many people, with efficiency and equity.

Although this research is dedicated to solving problems of the populations health accessibility, the methodology could be applied to other fields in which spatial planning is a priority.

Keywords: Geographic access, geospatial tools, location-allocation algorithms, maternal and neonatal mortality...

---

# Agradecimientos

A las instituciones como la CONAE, la ASI y la Universidad Nacional de Córdoba, que hacen posible que estudiantes de diversas latitudes puedan profundizar en el uso de técnicas de aplicaciones espaciales. Al equipo de Modelos Predictivos para la Biomedicina y el Ambiente - (MPBA) de la Fondazione Bruno Kessler (Trento - Italia) por todo lo que significa en mi vida profesional y al Instituto Mario Gulich, por el apoyo brindado para iniciar y culminar con esta investigación.

A mis tutores en Italia Dr. Cesare Furlanello, director de la tesis y Dr. Riccardo de Filippi. A mis tutores en Argentina, Dr. Marcelo Scavuzzo director de la maestría y codirector de la tesis y Lic. Mario Lanfri. A mis asesores técnicos Dr. Andrea Gobbi y Lic. Eduardo Romero, y las personas que colaboraron con el desarrollo de la investigación, Lic. Matteo Poletti, Lic. Sofía Lanfri, Lic. Camilo Rotela y muy en especial al Dr. Walter Valdivia quien abrió el camino para este tipo de desarrollos en el país.

Al equipo de investigadores del Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, representado por el director Agrim. Gabriel Platzeck, a mis profesores nacionales e internacionales a todos los becarios de MAEARTE, me llevo muchos de sus conocimientos y aportes a través de sus trabajos de investigación .

A mis compañeros de la maestría 2011, porque ha sido un placer estudiar al lado de este increíble grupo humano dignos representantes de nuestra américa Latina, Nazarena Rojas, Juan Piedra, Manuel Miller, Fernanda García, Ana Cuellar, Elvira Casagrande, Laura Zalazar, Ariel Torazza, Andrés Lighezzolo, Gonzalo Quiroga, Stefania Monella, Erith Muñoz y Carlos Estrella, por permitir que me lleve los más gratos recuerdos de esta etapa, a José Pasapera y Claudia Facchinetti por su prestancia y finalmente a este maravilloso país llamado Argentina.

ES

Córdoba, Argentina

# Lista de contenidos

<b>Resumen</b>	<b>II</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>IV</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>XII</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Motivación</b> .....	4
<b>1.2 Objetivo general</b> .....	5
1.2.1 Objetivos específicos .....	5
<b>1.3 Problema y abordaje</b> .....	5
<b>1.4 Estructura de la Tesis</b> .....	6
<b>2 Marco Teórico</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Herramientas Geoespaciales</b> .....	8
2.1.1 La Teledetección .....	10
2.1.1.1 Espectro electromagnético . . . . .	10
2.1.1.2 Tipos de sensores remotos . . . . .	11
2.1.2 Los Sistemas de Información Geográfica.....	13
2.1.2.1 Componentes de los SIG . . . . .	15
2.1.2.2 Algunas operaciones de manipulación de datos SIG . . . . .	15
2.1.2.3 Análisis espacial y análisis exploratorio de datos - AEDE . . . . .	16
2.1.2.4 Aplicaciones de SIG en la Salud Pública . . . . .	17
2.1.3 Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SDSS/SADE).....	19
<b>2.2 Las métricas y sus usos</b> .....	20
2.2.1 Distancia Linear .....	21
2.2.2 Distancia de Manhattan .....	21
2.2.3 Distancia Lp.....	22
2.2.4 Network distance / distancia de rutas o caminos.....	22
<b>2.3 Modelos para el cálculo de distancias</b> .....	23
2.3.1 Cálculo de distancias en base vectorial .....	23

2.3.2	Cálculo de distancias en base celular o ráster .....	23
2.3.3	Superficie de Costo .....	27
2.3.4	Superficie de Costo Acumulado .....	27
<b>2.4</b>	<b>Acceso geográfico .....</b>	<b>29</b>
2.4.1	Acceso geográfico a los Servicios de Salud .....	30
<b>2.5</b>	<b>La optimización y la Programación Linear (PL) .....</b>	<b>32</b>
2.5.1	La localización .....	34
2.5.2	Localización en el sector privado y público .....	35
2.5.3	Modelos de localización - asignación .....	35
2.5.4	Taxonomía de los modelos de localización .....	37
2.5.4.1	Modelos basados en la cobertura (covering algorithms) . . .	38
2.5.4.2	Modelos basados en la mediana . . . . .	38
2.5.4.3	Modelos dispersos . . . . .	38
2.5.5	Modelos de cobertura .....	38
2.5.6	El problema de los caminos mínimos .....	39
<b>2.6</b>	<b>Planteamientos de salud pública .....</b>	<b>42</b>
2.6.1	Los sistemas de salud .....	42
2.6.2	Mortalidad materna e infantil .....	44
2.6.3	Las causas directas de la Mortalidad Materna .....	46
2.6.4	Datos de la Mortalidad Materna según el Sistema de salud de Cusco .....	46
2.6.5	Número de establecimientos de salud y cobertura .....	47
<b>2.7</b>	<b>Redes de servicios de salud en Cusco .....</b>	<b>47</b>
<b>3</b>	<b>Procesos metodológicos .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1</b>	<b>Area de estudio .....</b>	<b>49</b>
<b>3.2</b>	<b>Descripción de la Metodología .....</b>	<b>52</b>
<b>3.3</b>	<b>Decisiones para la elaboración de la Superficie de Costo .....</b>	<b>54</b>
3.3.1	Modelo rásterizado .....	54
3.3.2	Modelo de poblaciones agregadas .....	54
3.3.3	Resolución espacial del modelo .....	55
3.3.4	Modelo basado en tiempos .....	55
3.3.5	Modelo isotrópico .....	55
<b>3.4</b>	<b>Metodología para la superficie de costo .....</b>	<b>55</b>
3.4.1	Bases de datos empleadas .....	57
3.4.2	Calidad de los datos .....	65
<b>3.5</b>	<b>Los supuestos .....</b>	<b>68</b>
3.5.1	Red vial .....	68
3.5.2	Red hidrográfica .....	68

3.5.3	Landcover .....	69
3.5.4	Cuadrícula Pluviosidad .....	69
3.5.5	Modelo Digital de Terreno, MDE, MDT, DEM .....	69
<b>3.6</b>	<b>Procesamiento para la obtención de la superficie de costo .....</b>	<b>71</b>
3.6.1	Cálculo de los caminos mínimos (shortest path) .....	72
3.6.2	Insumos del (shortest path) .....	73
3.6.3	Procesamiento del (shortest path) .....	73
3.6.4	Insumos para la matriz de distancias .....	74
3.6.5	Cálculo de la matriz de tiempos .....	74
<b>3.7</b>	<b>Metodología para la optimización de ubicaciones .....</b>	<b>76</b>
<b>3.8</b>	<b>Selección de ubicaciones candidatas .....</b>	<b>76</b>
3.8.1	Elementos del modelo .....	77
3.8.2	Formulación del Maximum Covering Location Problem .....	78
3.8.3	Implementación del algoritmo en R y ejecución .....	79
<b>4</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>82</b>
<b>4.1</b>	<b>Principales resultados .....</b>	<b>82</b>
4.1.1	Superficie de costo y matriz de tiempos .....	82
4.1.2	Optimización de ubicaciones .....	85
4.1.3	Gráfico de la optimización .....	89
4.1.4	Diagramas de araña .....	89
<b>5</b>	<b>Discusión, Conclusiones y Perspectivas .....</b>	<b>112</b>
<b>5.1</b>	<b>Discusión .....</b>	<b>112</b>
<b>5.2</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>114</b>
<b>5.3</b>	<b>Limitaciones .....</b>	<b>115</b>
<b>5.4</b>	<b>Futuras investigaciones .....</b>	<b>116</b>
<b>A</b>	<b>Apendice .....</b>	<b>118</b>
<b>A.1</b>	<b>Algunos códigos empleados .....</b>	<b>118</b>
A.1.1	Confecionar el mapa de araña en GRASS .....	118
A.1.2	Crear la matriz de tiempos .....	119
A.1.3	Confeción de la matriz de tiempos .....	119
	<b>Glosario .....</b>	<b>124</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>142</b>



# Lista de figuras

1	Gráfica que incluye todos los procesos de la Percepción Remota, desde el sensor hasta su implementación en el terreno y monitoreo. . . . .	10
2	Imágen que muestra el espectro electromagnético tomado de (Chuvieco, 2008). Para mayor detalle del uso de las longitudes de ondas, revisar el Espectro electromagnético en el glosario de términos . . . . .	11
3	Gráfico de los Sistemas de Información Geográfica, del manual de usuario del ERDAS . . . . .	14
4	Mapa del Dr. John Snow del distrito de Soho en Londres 1854, el que proporcionaría uno de los ejemplos más tempranos del análisis espacial y permitió al Dr. Snow localizar con precisión un pozo de agua contaminado como la fuente causante del brote de la enfermedad del cólera. . . . .	18
5	Modos de representación en formatos vectoriales: (a) Representación de puntos $(x_1, y_1)$ (b) Representación de líneas $(x_1, y_1)(x_2, y_2)(x_3, y_3) \dots (x_n, y_n)$ y (c) Representación de polígonos $(x_1, y_1)(x_2, y_2)(x_3, y_3) \dots (x_1, y_1)$ . . . . .	23
6	Representación del mundo real, en modo vectorial versus modo ráster. La primera está definida por líneas o vectores y la segunda se trata de retículas, celdas o grillas. . . . .	24
7	Representación de los cálculos de distancias, según la métrica elegida (Aparicio Philippe and Abdelmajid Mohamed and Riva Mylène and Shearmur Richard, 2008) . . . . .	25
8	La imágen muestra una superficie de costo de 6 filas x 7 columnas, los valores enteros almacenados en las celdas corresponde a la combinación de las capas temáticas empleadas, las mismas que van a dar la complejidad al modelo. La celda señalada es un punto de partida para el inicio del cálculo de la superficie de costo acumulado . . . . .	27
9	Para obtener el costo acumulado se parte de la celda con valor cero (inicial) hacia las otras celdas de la matriz. . . . .	29
10	El cálculo del costo acumulado se basa en la suma de las celdas, desde el centro inicial hacia el centro de la celda objetivo. . . . .	29

11	Función de impedancia, <i>Distance decay function</i> , es un término geográfico que describe el efecto de la distancia en las interacciones culturales o espaciales. El efecto de decaimiento distancia indica que la interacción entre dos lugares disminuye a medida que la distancia entre ellos aumenta. . . . .	32
12	Gráfico adaptado del artículo elaborado por Mark S. Daskin y publicado en Wiley InterScience, (2008) . . . . .	37
13	Gráfico adaptado del artículo elaborado por Mark S. Daskin y publicado en Wiley InterScience, (2008) . . . . .	37
14	En la teoría de grafos, el problema del camino más corto es el problema de encontrar un camino entre dos vértices (o nodos) en un gráfico tal que la suma de los pesos de sus bordes constituyentes se reduce al mínimo. Figura tomada de la web. . . . .	41
15	La figura ilustra como se vincula la red de caminos con la red de servicios de salud, figura tomada de la web. . . . .	41
16	El gráfico de la Dirección General de Epidemiología (DGE) muestra el comportamiento de la mortalidad materna en el país según ámbitos geográficos, nivel educativo y por urbanidad-ruralidad sobre la percepción como problema en el acceso a los servicios de salud el no saber donde ir. . . . .	45
17	Mapa del Perú estratificado por regiones de Razón de Muerte Materna para el año 2010. Fuente: DGE - Perú . . . . .	45
18	Mapa de ubicación del departamento de Cusco y sus departamentos fronterizos	50
19	Imagen topográfica del sistema ASTER (Radiómetro Espacial Avanzado de Emisión y Reflexión Termal) del satélite Terra de la NASA, capturada el 18 de julio de 2006 . . . . .	51
20	Cuadrículas de Landsat de 30m. que recubren una área más extensa que el departamento de Cusco, los valores indican el Path y el Row, para recubrir el área de estudio se necesitan 13 escenas, que se han descargado en reiteradas oportunidades hasta conseguir un resultado óptimo . . . . .	56
21	La red vial de la región Cusco, no se dibuja la categoría en proyecto porque todavía es inexistente . . . . .	58
22	La red hidrográfica de la región Cusco . . . . .	59
23	Landcover de la región Cusco . . . . .	61
24	Ráster de la precipitación de la región Cusco, de alta resolución de la distribución espacio-temporal de la estacionalidad de precipitaciones y los fenómenos extremos sobre la base de una serie de tiempo TRMM de 12 años, Bookhagen, B. . . . .	62
25	Ráster de la precipitación de la región Cusco . . . . .	63

26	DEM de la región Cusco, procesado a partir del uso del GDEM, SRTM y las curvas de nivel. . . . .	66
27	Slope de la región Cusco, de 30 metros de resolución espacial . . . . .	67
28	Superficie de impedancias generada a partir de las capas temáticas y la metodología propuesta. . . . .	70
29	La imagen muestra los caminos con un corte de 2 horas, la gráfica varía de acuerdo con los puntos de corte establecidos. . . . .	74
30	La matriz de tiempos es el insumo principal para el desarrollo del algoritmo	75
31	Superficie de costo/impedancias generada a partir de las capas temáticas y la metodología (en minutos) de traslado sobre cada celda correspondiente a 30x30 metros del territorio. . . . .	84
32	Solucion con 4 establecimientos de salud . . . . .	91
33	Solucion con 5 establecimientos de salud, con Espinar en la lista . . . . .	92
34	Solucion con 5 establecimientos de salud, con San Miguel en la lista . . . . .	93
35	Solucion con 6 establecimientos de salud . . . . .	94
36	Solucion con 6 establecimientos de salud, con Ccatca en la lista . . . . .	95
37	Solucion con 7 establecimientos de salud . . . . .	96
38	Solucion con 8 establecimientos de salud . . . . .	97
39	Solucion con 8 establecimientos de salud, con San Francisco en la lista . . . . .	98
40	Solucion con 9 establecimientos de salud, con San Francisco en la lista . . . . .	99
41	Solucion con 10 establecimientos de salud . . . . .	100
42	Solucion con 10 establecimientos de salud, con Ocongate en la lista . . . . .	101
43	Solucion con 9 establecimientos de salud . . . . .	102
44	Solucion con 10 establecimientos de salud . . . . .	103
45	Solucion con 11 establecimientos de salud . . . . .	104
46	Solucion con 12 establecimientos de salud . . . . .	105
47	Solucion con 13 establecimientos de salud . . . . .	106
48	Solucion con 14 establecimientos de salud . . . . .	107
49	Solucion con 15 establecimientos de salud . . . . .	108
50	Solucion con 16 establecimientos de salud . . . . .	109
51	Solucion con 17 establecimientos de salud . . . . .	110
52	Solucion con 18 establecimientos de salud . . . . .	111

# Lista de tablas

1	Indicador y herramienta de Sistemas de Información Geográfica pa su cálculo	26
2	Indicadores y los niveles mínimos aceptables . . . . .	43
3	Bases de datos espaciales para la construcción de la Superficie de Costo . . . .	57
4	Tabla de velocidades según tipo de carretera . . . . .	68
5	Velocidades de transporte de acuerdo con el tipo cobertura de suelos . . . . .	69
6	Estratos y sus valores de impedancia . . . . .	71
7	Tabla: Parámetros del código Linear.R . . . . .	80
8	Lista de los establecimientos . . . . .	85
9	Resumen de las iteraciones, la tabla es un resumen de las iteraciones, la población el porcentaje y el código del servicio, que es parte del resultado de la optimización. . . . .	86
10	Tabla de códigos y establecimientos de salud . . . . .	87

# Acrónimos

CAD	.....	<i>Computer aided Design</i> , Diseño asistido por computador
CETT	.....	Centro Espacial Teófilo Tabanera
DEM	.....	<i>Digital Elevation Model</i> , Modelo de Elevación Digital
IGN	.....	Instituto Geográfico Nacional
INEI	.....	Instituto Nacional de Estadística e Informática
LDCM	.....	<i>Landsat Data Continuity Mission</i> , Misión de continuidad de datos
LIDAR	.....	Light Detection and Ranging
MCLP	.....	Maximum Covering Location Problem
MIS	.....	<i>Management Information System</i> , Sistema de Información para la Gestión
MTC	.....	Ministerio de Transporte y Comunicaciones
NGCIA	.....	National Center for Geographic Information and Analysis
SDSS	.....	<i>Spatial Decision Support Systems</i> , (SADE) Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial
SIG	.....	<i>Geographic Information System</i> , Sistema de Información Geográfica
SMBD	.....	Sistema Manejador de Base de Datos
SRTM	.....	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i> , Misión Topográfica de Satélite Radar
TRMM	.....	Tropical rainfall Measuring Mission

# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

*“Para encontrar  
hay que ser paciente y silencioso”.  
repetida por Leticia, mi hija.*

**Resumen:** El primer capítulo, introduce a la Tesis, expone la motivación para el inicio de la investigación, los objetivos que persigue y describe su estructura.

El desempeño de los sistemas de salud es ciertamente relevante para la mejora de la salud de la población, teniendo impacto además en el desarrollo y productividad de las naciones. Un elemento necesario, no el único, para que los sistemas de salud consigan los resultados sanitarios, es que los servicios de salud que conforman el sistema estén disponibles y que sean usados por las personas. Esto significa que la planificación de los sistemas de salud y la toma de decisiones relacionada debe buscar la mejora del acceso de las personas a los servicios, ya sea creando puntos de oferta de los servicios y reduciendo las barreras que limitan el uso de éstos. El gobierno peruano a través de las instituciones de salud, vienen proponiendo una serie de estrategias para mejorar la calidad de la atención de la salud a las poblaciones, desde la década pasada, generando así, un cambio de lo vivido en los años 60, 70 y 80, en que la política sanitaria fué reactiva, y no se consideraba al acceso o la calidad en la atención de salud como un elemento importante. Es en la síntesis diagnóstica de la situación del sector, elaborada por el Ministerio de Salud en el año 1990 que se hace explícito, por primera vez la existencia de “diferencias de calidad, cobertura y acceso”. En el periodo 1995-2000 se define como visión-objetivo “un sector salud con equidad, eficiencia y calidad”. En el año 2002 los Lineamientos de Política Nacional de salud, orientaron la elaboración del Plan Nacional Concertado aprobado en el 2007, donde se plantea el “incremento progresivo de la equidad en la provisión de servicios de salud”, la eficacia de las intervenciones, la eficiencia en el uso de recursos y la calidad de los servicios proporcionados, con una mayor cobertura de la población, en especial para aquellos grupos más pobres y vulnerables ([Dirección General de Salud de las Personas, 2009](#)).

En este grupo poblacional, se presenta la mortalidad materna<sup>1</sup> y neonatal, como uno de factores considerados de mayor importancia en el deterioro de la salud de las poblaciones porque detrás de cada muerte materna se esconde una tragedia personal que puede ser entendida de diversas maneras, además de terminar con la vida de una mujer en plena capacidad biológica, social y reproductiva, afecta directamente a su pareja, la estabilidad familiar y la de los miembros de la comunidad que tienen relación con ella. Las altas tasas de mortalidad materna - neonatal, es también indicador del bajo acceso a los servicios de salud.

En América Latina, aproximadamente el 15 % de los embarazos tienen alguna complicación obstétrica (Hartfield V.J., 1980; Hibbard L.T., 1978), un tercio de las complicaciones obstétricas va a requerir cesárea (Nordberg E.M., 1984). Las complicaciones en general deben ser tratadas oportuna y adecuadamente, de lo contrario podrían causar la muerte de la madre o del recién nacido. Para ello, debe existir una distribución espacial adecuada de los servicios a fin de que permita el acceso de los establecimientos de salud a las poblaciones.

El acceso a los servicios de salud según Penchansky R and Thomas JW. (1981), se desagrega en cinco dimensiones: (1) La "Disponibilidad", que hace referencia al volumen existente de servicios en relación con las necesidades de los usuarios. (2) La "Accesibilidad", que hace referencia a la barrera física, asociada a la separación entre los usuarios de los servicios, y los medios disponibles a los usuarios para superarla. (3) La "Asequibilidad", que hace referencia a los recursos disponibles a los usuarios, respecto del costo que se requiere para ingresar y hacer uso de los servicios de salud. (4) La "Adecuación", que está relacionada con la manera cómo se organizan los servicios, y si éstos son facilitadores del ingreso de usuarios al sistema, y finalmente (5) La "aceptabilidad", que hace referencia al grado de satisfacción del usuario del servicio de salud recibido.

Para lograr una distribución espacialmente adecuada se requiere hechar mano a las diversas técnicas provenientes de distintos campos a la salud a fin de conocer a profundidad cada una de estas dimensiones, probablemente cada una de ellas sea una investigación per se. El trabajo de investigación que planteamos profundiza el conocimiento en las dos primeras dimensiones del acceso a los servicios de salud, las que han sido tratadas desde diversas disciplinas como: la economía, sociología, etnografía, salud pública y geografía, entre otras. Sin embargo, dada la multitud de factores envueltos en el análisis, las perspectivas interdisciplinarias son las que tienen mejores probabilidades de obtener los resultados de la investigación más relevantes. Combinando información de la salud pública con herramientas geoespaciales y técnicas de optimización.

En el mundo se han desarrollano investigaciones similares y partiendo del mismo problema, han sido abordados desde varios enfoques, algunos netamente sociales, otras con un componente científico, otras para fines normativos, muchas de ellas han servido de insumo para el desarrollo de esta investigación en latinoamérica (México, Brasil, Chile, Argentina) cuentan con investigaciones en las que se aborda la accesibilidad a servicios, el libro el doctor Carlos Garrocho (Mexico) en el que se realiza un análisis socioespacial de los servicios de salud ingresa profundamente a los temas sociales del acceso, el libro técnico del profesor

---

<sup>1</sup>Mortalidad materna: Es la muerte de la mujer mientras este en el periodo de embarazo o durante los 42 días después, independientemente de la duración, por cualquier causa relacionada o gravada pero no por causas accidentales [CIE X - Organización Mundial de la Salud (OMS), 1993].

Gustavo Buzai (Argentina) que aborda las técnicas para el acceso y las publicaciones de Galvao (Brasil) en la que integra algoritmos matemáticos. En el Perú se ha avanzado en el desarrollo de propuestas desde el sector salud con respecto al acceso geográfico en algunas instituciones, pero no se ha medido si los resultados de los procesos o investigaciones han servido para la toma de decisiones.

Sin embargo si se ha planteado que un enfoque de redes para la oferta de servicios de salud, en contraste con un sistema no integrado y no articulado de servicios de salud, ofrece las siguientes ventajas: (Ministerio de Salud del Perú - MINSa, 2001; Organización Panamericana de la Salud - OPS 2010)

1. Mejoran la utilización de los recursos disponibles en función de las necesidades de salud de la población, beneficiando a los grupos más desfavorecidos.
2. Elevan la eficiencia global del sistema al evitar la duplicación de infraestructura y servicios, y al disminuir los costos de producción.
3. Mejoran la equidad en el acceso a los servicios, considerando la distribución geográfica de la población.
4. Reorientan la atención ambulatoria y de internamiento de baja y mediana complejidad, optimizando y complementando los servicios básicos y especializados.
5. Optimizan la inversión en infraestructura y equipos, elevando la calidad el nivel de resolución de los establecimientos de la red para atender las necesidades de salud de la población, de acuerdo a las prioridades sanitarias.

Consideramos que el estudio de la accesibilidad, utilización y calidad de los servicios públicos de salud tiene no sólo implicancias técnicas en cuanto a la planeación física, sino también sociales, en cuanto a la distribución más justa de los recursos y oportunidades de salud entre los grupos y regiones más pobre de nuestra sociedad, siendo los servicios públicos de salud uno de los elementos más importantes para el bienestar de la población y muestra la forma como se atiende la necesidad colectiva, que depende de la organización social y de la concepción de justicia distributiva.



## **1.1. Motivación**

La investigación se lleva a cabo en el marco de la Maestría en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias, dictada en el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich (IG: <http://www.conae.gov.ar/instgulich/institutogulich.html>), Centro Espacial Teófilo Tabanera (Córdoba - Argentina) cuya constitución es una actividad conjunta entre la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE: <http://www.conae.gov.ar>) y la Universidad Nacional de Córdoba (<http://www.unc.edu.ar>). El Instituto Gulich, funciona en las instalaciones del CETT (Centro Espacial Teófilo Tabanera) de la CONAE, es un centro de investigación, desarrollo y formación de recursos humanos destinado al mejor aprovechamiento de la información espacial para el conocimiento y apoyo a las necesidades de la sociedad, que puede ser plasmado a través del desarrollo de investigación de impacto social.

La tesis de acceso geográfico a servicios de salud, es una investigación que busca crear mejores sociedades, colaborando en el mejoramiento de la planificación socioespacial, a través del acceso físico a servicios de salud que no depende únicamente de la cercanía ni lejanía a los servicios, sino de las posibilidades reales de conexión, este acceso se correlaciona con la reducción de la mortalidad y la morbilidad de las personas porque un gran porcentaje de las complicaciones obstétricas son imprevisibles y cuando ocurren, el tiempo que demora hasta que éstas se resuelvan son críticos para prevenir la muerte de la madre o del recién nacido.

Desde mi óptica, es muy gratificante buscar soluciones a problemas en la que se combinan las aplicaciones espaciales y la salud pública con técnicas de optimización además de profundizar en el conocimiento del acceso geográfico de la región Cusco para proponer alternativas que mejoren la cobertura de salud a las poblaciones, es sin duda, una fuerte motivación para optar por escribir esta tesis. Adicionalmente puedo indicar que el estado peruano al igual que otras naciones está interesado en implementar estrategias de salud para la focalización del gasto en zonas rurales, la optimización de la oferta de salud y la priorización de la atención primaria a partir de evidencias que deriven en la mejora de la salud poblacional.

## 1.2. *Objetivo general*

Identificar el subconjunto de servicios de salud que, distribuidos espacialmente en toda la región Cusco, permitan atender a la mayor cantidad de población, en un tiempo menor o igual a 2 horas, en el marco de la reducción de la mortalidad materna y neonatal.

### 1.2.1. *Objetivos específicos*

- (a) Generar un modelo raster de superficie de costo, con celdas que representan la impedancia/resistencia al desplazamiento en el ámbito de estudio, construida a partir de mapas temáticos que representan atributos que afectan la velocidad de desplazamiento sobre el territorio.
- (b) Generar una matriz con estimaciones de tiempos de viaje entre los centros poblados y establecimientos de salud de la región de Cusco y sus fronteras, a partir del raster de costo y de las ubicaciones espaciales de centros poblados y establecimientos de salud.
- (c) Determinar las mejores ubicaciones espaciales de los establecimientos de salud, mediante el uso de algoritmos de localización-asignación, teniendo como insumo la matriz de tiempos de desplazamiento.
- (d) Describir los procesos metodológicos seguidos para obtener la solución al problema planteado y presentar sus resultados.

## 1.3. *Problema y abordaje*

La salud no sólo es la ausencia de enfermedad sino también, es la capacidad de las personas para desarrollar todo su potencial a lo largo de la vida. Desde una perspectiva más general se reconoce la salud como un activo que los individuos poseen y que a la vez es un factor importante para el desarrollo económico; si las poblaciones pueden acceder a los recursos que les permita aprovechar todo su potencial en salud las posibilidades de generar bienestar y rendimientos futuros será mucho mayor. El poco o nulo acceso a la salud, puede limitar las oportunidades de muchas personas al ver restringidas sus capacidades de participar en la vida pública y de obtener los mismos retornos por esfuerzos similares. Una de las dimensiones en las cuales se observan mayores desigualdades es en el acceso físico a servicios, ya que el proceso de búsqueda de atención en salud muchas veces no se completa o incluso no inicia debido a barreras desde el lado de la oferta o de la demanda.

El problema que aborda la tesis, busca mejorar el acceso geográfico a los servicios de salud en la región Cusco a partir de la selección un subconjunto de ubicaciones de establecimientos que brindan atención en salud. Para esta selección se combina información geoespacial y técnicas de optimización.

Pregunta de investigación: ¿Cuál es el subconjunto de servicios de salud, que distribuidos espacialmente en toda la región, permitan atender a los puntos de demanda con pesos poblacionales, en un tiempo menor o igual a 2 horas, tal que se maximice la cobertura poblacional?.

El proceso, se inicia con el relevamiento de información cartográfica, imágenes de satélite, preprocesos a las capas temáticas con las que se inicia la construcción de una

superficie de costo, que es una cuadrícula georreferenciada (raster) resultante de combinar varias capas temáticas, que representan atributos ó fenómenos que se conoce que modifican la velocidad de desplazamiento sobre el territorio, se formalizan supuestos sobre, en qué magnitud los atributos de las variables, evaluadas en las capas temáticas empleadas, se relacionan con la velocidad de desplazamiento sobre el territorio. Las cuadrículas ráster se trabajarán en un tamaño de celdas común, para nuestro caso hemos optado por una resolución de (30 metros), por ser bastante detallada y permite los cálculos computacionales.

La superficie de costo obtenida consta de celdas que representan pequeños segmentos de territorio cuadrangulares de idéntico tamaño que almacenan valores que representan el costo (nivel de fricción ó impedancia), expresado en unidades de tiempo, de atravesar cada uno de dichos segmentos. Las capas temáticas (datos espaciales) que se empleen para la construcción de la superficie de costo y las fuentes de datos de donde se obtiene son:

1. Cuadrícula de cobertura de suelos. A partir de imágenes LANDSAT.
2. Cuadrícula de carreteras. Obtenida de la base de datos geográficos vectoriales de carreteras del Ministerio de Transportes del Perú. (posteriormente rasterizadas)
3. Cuadrícula de Ríos. Obtenida, de los datos vectoriales de ríos, IGN (Instituto Geográfico Nacional) del Perú. (posteriormente rasterizadas)
4. Cuadrícula de las pendientes ó grado de inclinación del suelo, generada a partir del DEM (*Digital Elevation Model*, Modelo de Elevación Digital).
5. Cuadrícula de pluviosidad. A partir de datos del TRMM (Tropical rainfall Measuring Mission)

Sobre la superficie de costo generada, se hace una estimación de distancias y tiempos desde cada centro poblado a cada establecimiento de salud, de este proceso se obtiene las distancias de cada segmento, estas distancias son transformadas a tiempos y con los resultados se elabora la matriz con registros de estimaciones de tiempos de desplazamiento entre los establecimientos de salud y los centros poblados (puntos de oferta y demanda de la región).

La matriz de distancias es el insumo que se emplea para el uso del algoritmo de ubicación - asignación, que para nuestro propósito busca atender a la población no desde una óptica meramente eficiente ni meramente equitativa sino en la combinación de ambas, es decir, en el cumplimiento de que esa distribución sea eficiente y equitativa, en este sentido consideramos que el MCLP (Maximum Covering Location Problem) es el que mejor se ajusta a nuestras necesidades.

## **1.4. Estructura de la Tesis**

La tesis se desarrolla en cinco partes:

En el primer capítulo se desarrolla la introducción, motivación, objetivos, el problema y su abordaje.

El segundo capítulo de la tesis aborda el marco teórico que está agrupado por temas que describen sobre, herramientas geoespaciales, algoritmos matemáticos y conceptos básicos

de la salud pública, que brindan el marco teórico de lo que busca ser la base del conocimiento para entender las otras tres partes de la tesis.

En el tercer capítulo se encuentra el desarrollo metodológico de la superficie de costo que describe de manera lógica los pasos a seguir para el desarrollo metodológico del algoritmo "Ubicación - Asignación" que permite la selección de los mejores "candidatos", o ubicaciones de establecimientos de salud que permitan la mejor cobertura poblacional en la región y la última etapa que corresponde a los resultados y discusión que se desprenden de la investigación. Es en este capítulo que se desarrolla la parte metodológica y los procesos seguidos hasta obtener los resultados que se plasman en posteriormente.

En el cuarto capítulo se describe los resultados obtenidos, se lista las locaciones que conforman la solución del problema, se destacan los mapas obtenidos para las posibles soluciones cambiando el número total de instalaciones de salud y finalmente,

En el quinto capítulo se presenta la discusión, conclusiones de la Tesis y futuras investigaciones.

# CAPÍTULO 2

---

## Marco Teórico

---

*"Todos somos muy ignorantes.  
Lo que ocurre es que  
no todos ignoramos  
las mismas cosas".  
Albert Einstein.*

**Resumen:** Este capítulo se dedica a describir conceptos teóricos sobre los Sistemas de Información Geográfica (SIG), Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE), Teledetección, Superficie de Costo, Salud Pública y algoritmos matemáticos.

### 2.1. Herramientas Geoespaciales

Se denomina herramientas geoespaciales al conjunto de elementos y técnicas que permiten el análisis de la realidad a partir del conocimiento del espacio geográfico proporcionado por los [Datos Geoespaciales](#). Los sistemas geoespaciales expresan los resultados en diversos tipos de mapas, en los que se muestra la forma, la dimensión, la distribución y otros aspectos de los fenómenos analizados.

La Percepción Remota o Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica, son herramientas geoespaciales que han tenido mucho desarrollo en los últimos años, por ser técnicas aplicadas, dependen del estado de desarrollo tecnológico existente en cada momento. La historia de la teledetección se remonta a las primeras plataformas de observación aérea: los globos aerostáticos y a la invención de la fotografía en el siglo XIX ([Chuvieco Emilio, 2004](#)). Se puede decir que 1957 simboliza la entrada de la teledetección en la era moderna con el lanzamiento del satélite Sputnik, primer satélite artificial puesto en órbita alrededor de la Tierra por la Unión Soviética, mientras que, el primer satélite óptico dedicado específicamente a la teledetección fué el norteamericano LANDSAT 1, que fue puesto en órbita el 23 de julio de 1972 y estuvo operativo hasta principios de 1978, teniendo su diseño una vida de cinco años y el último de la serie, es el LANDSAT 8 LDCM que se lanzó al espacio el 11 de febrero de 2013. En el campo de los radares uno de los principales hitos para aplicaciones civiles fue el lanzamiento de la European Remote Sensing Satélite 1 (ERS 1) en 1991. La plataforma llevaba una variedad de sensores; entre ellos el Radar de Apertura Sintética (SAR) que hoy considerado como el más importante en su tipo. En la actualidad hay una gran cantidad de sensores en el espacio, de diversas resoluciones

y tiempos de revisita (ópticos y radares), que permite el mejor acceso a la información espacial y amplían el abanico de posibilidades en sus aplicaciones.

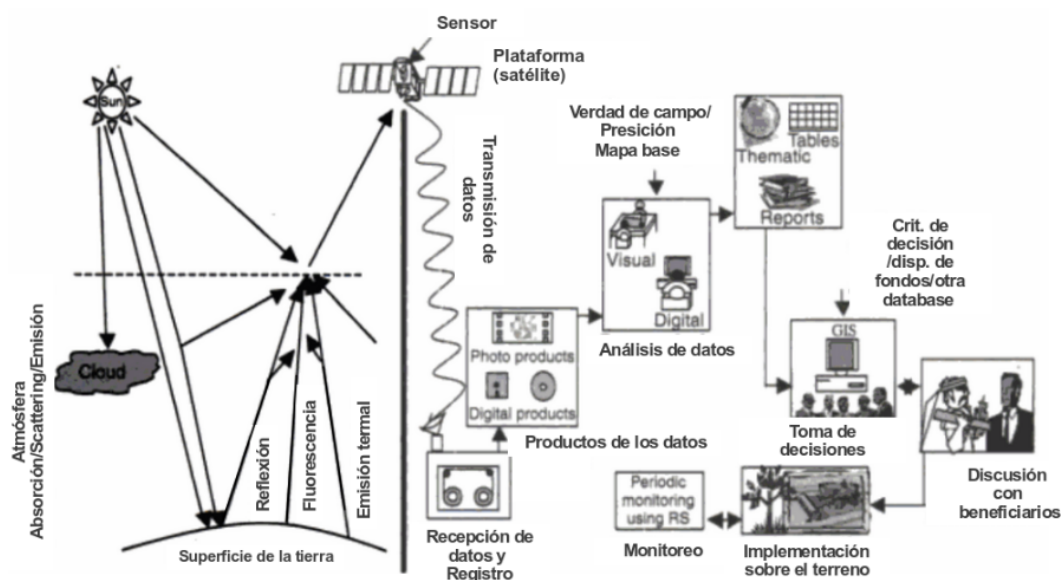
Otra tecnología es el LIDAR (Light Detection and Ranging) aerotransportado se puede utilizar para medir la altura de los objetos y características en la planta con más precisión que con la tecnología de radar.

En lo que respecta a los SIG (*Geographic Information System*, Sistema de Información Geográfica), haciendo un recuento breve podemos decir que nace a principios de los años 60 para el inventario de Recursos Naturales de Canadá de la mano de R. Tomlinson, su uso se fue masificando con el paso de los años y sobre todo por su utilidad en la comprensión del espacio, al inicio de la década de los 1980 aparece una primera reflexión sobre la revolución tecnológica que indudablemente generaría un notable impacto en la geografía, porque permitía la automatización de procedimientos, en la actualidad se han convertido en un de los núcleos de la Geoinformática y han ganado definitivo prestigio como aplicación computacional de convergencia para el manejo de datos del espacio geográfico, provenientes de numerosas fuentes (Buzai G. and Baxendale C., 2011). A pesar de que los SIG en la actualidad siguen siendo técnicas modernas, siguen a la vanguardia y caminando hacia campos más promisorios como son los SDSS (*Spatial Decision Support Systems*, (SADE) Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial)/SADE.

### 2.1.1. La Teledetección

La teledetección es la adquisición de información de un objeto o fenómeno sin tener contacto físico con el (Chuvieco Emilio, 2004; Rashed T and Jürgens C, 2010). En el uso moderno, este término se refiere generalmente a la utilización de tecnologías de sensores aéreos para detectar y clasificar objetos en la Tierra (tanto en la superficie, como la atmósfera y en los océanos) por medio de señales propagadas, posee tres elementos fundamentales: (a) El sensor, (b) El objeto observado y (c) Un flujo energético que relaciona a ambos.

La teledetección también sustituye a la recopilación de datos costosa y lenta en el suelo, también es importante en el proceso de asegurar que las zonas u objetos no se vean perturbadas. En la actualidad se ha convertido en una herramienta indispensable para el estudio de la tierra y la gestión de sus recursos. (Santiago Linares, 2009).

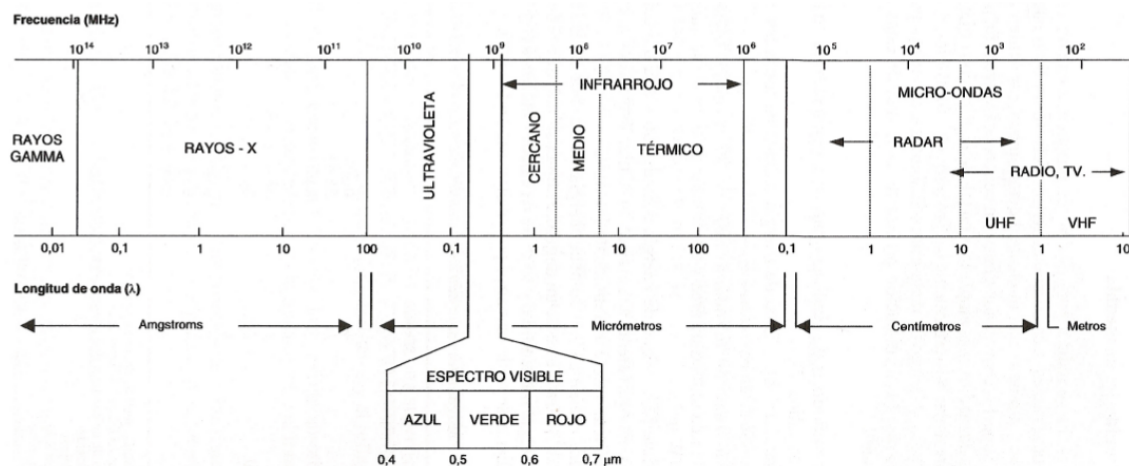


**Figura 1:** Gráfica que incluye todos los procesos de la Percepción Remota, desde el sensor hasta su implementación en el terreno y monitoreo.

#### 2.1.1.1. Espectro electromagnético

La radiación electromagnética comprende una amplia variedad de frecuencias o longitudes de onda que abarcan desde los rayos gamma hasta las ondas de radio (Gary Jedlovec, 2009). Las radiaciones más usadas en teledetección son:

- Las microondas usadas en los sistemas de radar.
- La radiación infrarroja, para detectar los cuerpos calientes que emiten radiación infrarroja.
- El espectro visible.
- La radiación ultravioleta.



**Figura 2:** Imágen que muestra el espectro electromagnético tomado de (Chuvieco, 2008). Para mayor detalle del uso de las longitudes de ondas, revisar el [Espectro electromagnético](#) en el glosario de términos

### 2.1.1.2. Tipos de sensores remotos

Existen dos tipos principales de sensores remotos, los pasivos y los activos, cuya diferencia principal es la fuente de energía.

**Los sistemas Pasivos:** También conocido como sensores ópticos, no tienen su propia fuente de energía y por lo general registra la radiación del sol que es reflejada desde la superficie de la Tierra. Cámaras fotográficas y escáneres multispectrales son sensores pasivos de uso frecuente en la teledetección por satélite (Eguchi R., Huyck C. Adams B. Mansouri B. Houshmand B. and Shinozuka, M., 2003; Stramondo S. et al., 2006). La parte visible del espectro electromagnético es muy pequeña, y la mayoría de los sistemas por satélite han sido diseñadas para ser sensibles a otras porciones del espectro, esta característica permite a los analistas de teledetección ver porciones del espectro que el ojo humano no puede detectar, mejorando de este modo su capacidad para identificar diferentes materiales de superficie (Adams B.J. and Huyck C.K., 2006; Sherbinin A. et al., 2002). Las propiedades espectrales de un sensor se definen por el número, la colocación y la anchura de las bandas dentro del espectro electromagnético que es capaz de grabar. Los sensores pancromáticos miden la radiación reflejada en una sola porción, generalmente localizada en la parte visible o infrarroja del espectro electromagnético, mientras que los sensores multispectrales recogen la radiación en partes discretas del espectro, que se registran como imágenes separadas llamadas bandas o canales. Hoy en día, la mayoría de los sistemas de teleobservación por satélite se componen de un sensor pancromático y un sensor multispectral (Gary Jedlovec, 2009; Joyce Karen E., 2009).

Algunas de las características de los sistemas pasivos:

- Los sistemas pasivos detectan la radiación naturalmente emitida (todos los objetos por encima de 0 grados Kelvin /-273 grados Celsius emiten energía), operan de manera similar a los térmicos, miden la energía electromagnética que emana de la superficie terrestre.
- La fuente generadora de energía de los sistemas pasivos es una fuente incoherente



y no polarizada (Sol). Se dice incoherente porque las diferencias de fases entre dos ondas sucesivas no es constante. En teledetección, las fuentes incoherentes utilizadas son el sol y las emisiones de la superficie terrestre.

- Los sensores ópticos-pasivos trabajan con cantidades muy pequeñas de radiación, por lo que el campo de visión debe ser lo suficientemente grande para poder detectarla de lo contrario el resultado es una baja resolución espacial (del orden de decenas de km).
- Los sensores ópticos-pasivos trabajan con frecuencias entre el visible y el infrarrojo (pocas veces ultravioleta).
- El sensor óptico sólo puede usarse durante el día (en presencia de sol) y mucho mejor en condiciones climáticas favorables.
- El sensor óptico en general se usa mirando hacia abajo (nadir).

**Los sistemas activos (RADAR):** La tecnología Radar fue desarrollado en secreto por varios países antes y durante la Segunda Guerra Mundial (Donnay J.-P., 2001; Soergel Uwe, 2010). El término RADAR fue acuñado en 1940 por la Marina de los Estados Unidos como un acrónimo de Radio Detection And Ranging (Soergel Uwe, 2010). Se trata de un sistema de detección de objetos que utiliza ondas de radio para determinar el rango, la altitud, la dirección o velocidad de los objetos, se caracterizan por tener su propia fuente de energía y emiten una señal que viaja a través de la atmósfera, refleja en la superficie de la Tierra y vuelve al sensor, mide el tiempo de viaje de la señal y la fuerza. Radar de Apertura Sintética (SAR) es un ejemplo de un sensor activo que utiliza señales de ondas de gran longitud y por lo tanto puede penetrar las nubes o las malas condiciones meteorológicas (Guillaso S. and Ferro-Famil L. and Reigber A. and Pottier E., 2005; Patino Jorge E. and Duque Juan C. , 2013; Rashed T and Jürgens C, 2010). La antena transmite pulsos de ondas de radio o microondas que rebotan contra un objeto en su camino, el objeto devuelve una pequeña parte de la energía de la onda de un plato o de la antena que normalmente se encuentra en el mismo sitio que el transmisor.

Como se ha mencionado, uno de los principales hitos de la teledetección radar para aplicaciones civiles fue el lanzamiento de la European Remote Sensing Satélite 1 (ERS 1) en 1991, la plataforma llevaba una variedad de sensores. El ERS 1 y su sistema hermana ERS 2 (lanzado en 1995), fueron diseñados principalmente para aplicaciones del océano, pero pronto el foco de atención se volvió a la cartografía terrestre, algunos ejemplos de aplicaciones típicas son de clasificación de coberturas también en las zonas tropicales y el monitoreo de los glaciares o el crecimiento urbano.

El Radar de Apertura Sintética (SAR) es ampliamente considerado como el más importante, esta técnica de detección activa ofrece durante todo el día y todo el tiempo-capacidad de mapeo de considerablemente buena resolución espacial. Uno de los más destacados de este sistema fue la misión SIR-C/X-SAR centrado en la investigación de multi-frecuencia y los datos SAR de varias polarizaciones y el famoso SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*, Misión Topográfica de Satélite Radar), los datos adquiridos durante su gestión derivaron en el DEM de la cobertura casi mundial por medio de interferometría SAR (Guillaso S. and Ferro-Famil L. and Reigber A. and Pottier E., 2005).

Otro sensor activo es el LIDAR, se utiliza para detectar y medir la concentración de diversos productos químicos en la atmósfera, mientras LIDAR aerotransportado se puede utilizar para medir la altura de los objetos y características en la planta con más precisión

que con la tecnología de radar. Su uso en la vegetación es su principal aplicación (Cunningham D. and V., 2006; Grund Christian L. and Sandberg Scott P., 1996). Por su altísima resolución vertical y horizontal es ideal para la observación de defectos de la tierra y otras superficies no detectados previamente.

Algunas de las características de los sistemas activos:

- Los sistemas activos proveen su propia fuente de iluminación y miden la diferencia en potencia entre la señal transmitida y recibida.
- La fuente generadora de energía es una fuente coherente y polarizada (Radar, Lidar). Se dice que una fuente de ondas es coherente cuando las ondas sucesivas emitidas tiene diferencias de fase constantes. Entre las fuentes de ondas coherentes utilizadas en teledetección, está el Radar. Por lo tanto, es necesario medir no solo la amplitud de la onda recibida, sino también su polarización y fase, ya que cualquier fase cambio en las mismas incluye información sobre el blanco retrodispersor.
- Pueden generar imagen (radares) (resolución espacial del orden de los metros).
- Los sensores activos trabajan con microondas lo que le permite penetrar inicialmente nubes (banda X), incluso el suelo (banda L).
- La imagen del sensor activo es compleja y su análisis requiere de técnicas avanzadas.
- El sensor activo trabaja de día o noche y en diversas condiciones climáticas.
- El sensor activo mira de lado (offnadir).

El uso de los radares son muy diversos, incluyendo el control del tráfico aéreo, radar astronomía, sistemas de defensa aérea, sistemas antimisiles, radares marinos para localizar puntos de referencia y otros buques, sistemas anti-colisión de aviones, sistemas de vigilancia oceánica, la vigilancia del espacio exterior y los sistemas de encuentro, la vigilancia precipitaciones meteorológicas, sistemas de control de vuelo y altimetría, objetivo misiles guiados, y los sistemas de localización de radares de penetración terrestre para las observaciones geológicas. Los sistemas de alta tecnología de radar están asociados con el procesamiento de señal digital y son capaces de extraer información útil a partir de los niveles de ruido muy altos (Chuvieco Emilio, 2004; Richards John A., 2005).

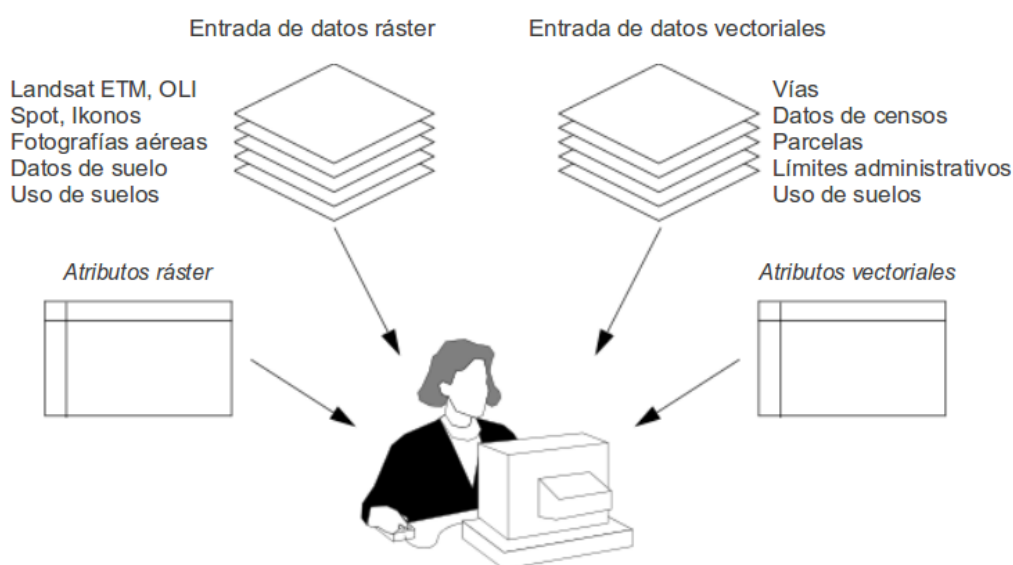
### **2.1.2. Los Sistemas de Información Geográfica**

La cantidad de datos a ser manejada en una base de datos, que contiene fuentes espaciales tales como imágenes de satélite, fotografías aéreas, junto con mapas, es enorme, especialmente si los datos abarcan una extensa región geográfica. Es evidente la necesidad de medios eficientes por los que los tipos de datos pueden ser almacenados y recuperados, manipulados, analizados y mostrados. Este es el papel fundamental de la información geográfica del SIG. Al igual que su homólogo comercial, el sistema de información gerencial MIS (*Management Information System*, Sistema de Información para la Gestión), el SIG está diseñado para llevar a cabo operaciones con los datos almacenados en su base de datos, de acuerdo con un conjunto de especificaciones del usuario (Berry Brian j. L., 1976; Church R.L. and Murray A.T., 2009; Richards John A., 2005).

Existen muchas definiciones para los SIG, las que se han efectuado desde distintos puntos de vista, funcional y estructural (Berry JK., 1987; Marble DF, 1984; Rhind D.

W., 1981) o basadas en sus aplicaciones y objetivos (Goodchild MF, 1985; Muller JC., 1985; Peuquet DJ, 1990). Una de las definiciones es la propuesta por el NCGIA (National Center for Geographic Information and Analysis) de los Estados Unidos: "Un SIG es un sistema de información compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar, modelar y representar datos georreferenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación".

Los SIG permiten producir distintos tipos de mapas analíticos, como los mapas temáticos o de coropletas, o mapas estratificados, son aquellos en los que las áreas de un mapa se colorean o se resaltan de acuerdo a alguna información, de manera que la naturaleza del color refleje la intensidad de alguna variable geográfica. Entre este tipo de mapas se incluyen, entre otros: Mapas de área (coropletas), que muestran un fenómeno de acuerdo a un territorio; mapas de símbolos, que muestran objetos dispersos que están relacionados a puntos en el mapa; mapas de isolíneas, que muestran un fenómeno que tiene cambios muy uniformes en una difusión ininterrumpida; mapas de densidad de puntos, los que muestran la ocurrencia de un fenómeno que se distribuye de manera no uniforme; de cartodiagrama, que muestran unidades territoriales con diagramas de magnitud de un fenómeno (Castillo-Salgado C., Loyola E., Vidaurre M., Martínez Piedra R. , Nájera Aguilar P., 2002; Cromley E.K. and McLafferty S., 2002).



**Figura 3:** Gráfico de los Sistemas de Información Geográfica, del manual de usuario del ERDAS

Los SIG ejecutan otras operaciones que son de gran valor para el análisis y la toma de decisiones (Muller JC., 1985; Tomlin, 1990.) como las que se detalla en la subsección de operaciones de manipulación de datos SIG del presente capítulo de la tesis y también tienen la capacidad de procesar imágenes, como en el caso de las fotografías aéreas o las imágenes de satélite, lo que implica que se pueden cubrir de manera continua y sistemática grandes extensiones geográficas con diferentes tipos de información, tales como precipitación, nubosidad, cobertura vegetal, áreas urbanas, redes viales, redes hidrográficas, etc.

### 2.1.2.1. Componentes de los SIG

Los componentes de un SIG son los mismos que para cualquier sistema de información: hardware, software, datos, métodos, recursos humanos y tecnologías relacionadas:

**Hardware:** Se refiere al equipo de cómputo requerido para cumplir las necesidades de la aplicación. Es importante considerar la velocidad, costo, soporte, administración, escalabilidad y seguridad.

**Software:** Provee las funciones y herramientas necesarias para almacenar, analizar y mostrar información geográfica. Los componentes clave del software son: (a) Un sistema de manejo de base de datos SMBD (Sistema Manejador de Base de Datos), (b) Herramientas para el ingreso y manipulación de información geográfica (c) Herramientas de soporte para consultas, análisis y visualización geográficos (d) Una interfase gráfica del usuario (IGU) para fácil acceso a herramientas.

**Datos:** Es uno de los componentes importantes de un SIG. Lograr buenos datos frecuentemente absorberá el 60-80% del presupuesto de implementación de un SIG. Los datos geográficos y los datos tabulares relacionados pueden obtenerse por relevamiento propio o adquirirse de un proveedor comercial de datos. La mayoría de los SIG emplean un SMBD para crear y mantener una base de datos para ayudar a organizar y manejar los datos.

**Métodos:** Son las reglas de la actividad, los modelos y prácticas operativas únicas a para cada necesidad.

**Personal:** La tecnología de SIG es de valor limitado sin la gente que maneja el sistema. Por esta razón este componente se convierte en el más importante de un SIG.

**Tecnologías relacionadas:** Los SIG se relacionan de forma cercana a varios otros tipos de sistemas de información, tales como el CAD (*Computer aided Design*, Diseño asistido por computador), sensores remotos, GPS y SMBD, entre otros.

### 2.1.2.2. Algunas operaciones de manipulación de datos SIG

Las primeras manipulaciones/aplicaciones de los SIG, estuvieron confinadas a grandes organizaciones públicas que desarrollaban sus programas de acuerdo con sus necesidades y su operación requería de especialistas en sistemas computacionales (Fisher Peter, 2006). Más tarde, la tecnología fue distribuida a las computadoras personales y una nueva generación de usuarios no expertos en SIG provenientes de diferentes áreas del conocimiento comenzó a utilizarlos. Esto aumentó la conciencia de cómo los SIG eran utilizados y como podían adaptarse a diferentes necesidades, por lo que los intereses en el diseño de la interfase gráfica y la incorporación de herramientas llegó a incrementarse como necesidad de dar soporte a un amplio rango de requerimientos (Carstensen L.W., 1986; Tobon C. and Haklay M., 2003; Tomlinson R. F., 1998).

Para sacar el mayor provecho al uso de los Sistemas de Información Geográfica, es necesario profundizar en ciertos aspectos teóricos y prácticos, como los usos que se citan a continuación:

- Intersección y superposición de datos (Máscara)
- Intersección y superposición de polígonos con datos espaciales

- Identificación de formas
- Identificación de puntos en polígonos
- Determinación de áreas y distancias
- Elaboración de mapas temáticos
- Cálculos de proximidad (e.g. rutas mínimas o shortest path)
- Búsqueda basada en datos
- Búsqueda basada en ubicaciones
- Búsqueda definida por el usuario basada en atributos
- Búsqueda por similitud
- Algebra de mapas

### 2.1.2.3. *Análisis espacial y análisis exploratorio de datos - AEDE*

La Geografía definida como ciencia de la organización del territorio proporciona elementos de gran importancia al momento de actuar concretamente en la resolución de problemáticas socio-espaciales que se presentan en la realidad. Toma una posición que le permite, mediante el trabajo empírico, combinar y sintetizar diferentes perspectivas teóricas de la Geografía en la construcción de conocimientos amplios que permitan diagnosticar y realizar propuestas de solución ([Buzai G. and Baxendale C., 2011](#)).

El análisis espacial o estadística espacial comprende las técnicas formales que estudian las entidades que utilizan sus propiedades topológicas, geométricas o geográficas. La frase se refiere adecuadamente a una variedad de técnicas, muchas todavía en su desarrollo temprano, usando diferentes enfoques analíticos y aplicados en campos tan diversos como la astronomía, geología, transporte, sociología, economía entre otros.

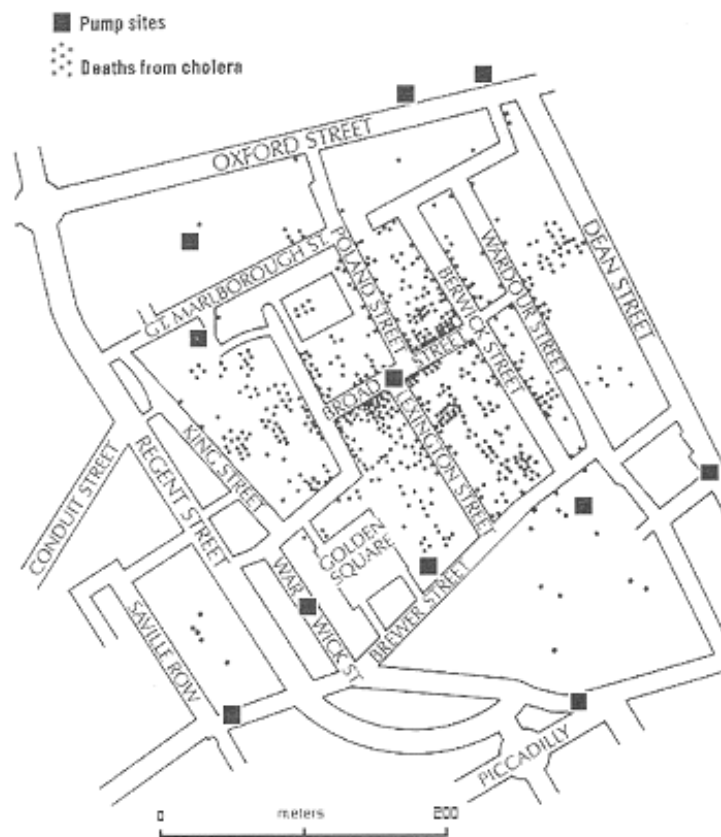
Las metodologías más potentes del análisis espacial desarrollados en el ámbito de la geografía se encuentran disponibles para ser usadas por usuarios que desde las diversas ciencias consideran necesaria la incorporación de la dimensión espacial en sus estudios. Por ejemplo, un estudio sobre la salud humana, en la que se puede describir la posición espacial de los seres humanos con un punto colocado en el que viven, o con un punto situado en el que trabajan, o mediante el uso de una línea para describir sus viajes semanales o el mapa de coropletas representando tasas o índices. La limitación del análisis espacial incluye las limitaciones del conocimiento matemático, los supuestos requeridos por las técnicas estadísticas existentes y los problemas en los cálculos basados en tiempo de cómputo.

Mientras que al Análisis Exploratorio de Datos Espaciales - AEDE, podríamos definirlo como el grupo de herramientas estadístico-gráficas que describen y visualizan las distribuciones espaciales, identificando localizaciones atípicas, descubriendo formas de asociación (autocorrelación espacial) que, a su vez, pueden ser de carácter global o local, sugiriendo estructuras en el espacio geográfico denominado heterogeneidad espacial.

#### 2.1.2.4. Aplicaciones de SIG en la Salud Pública

El análisis espacial es muy antiguo, incluso más antiguo que el propio desarrollo de los SIG, el padre de la epidemiología moderna John Snow, demostró que el cólera era causado por el consumo de aguas contaminadas con materias fecales, comprobando que los casos de esta enfermedad se agrupaban en las zonas donde el agua consumida estaba contaminada con heces.

En la ciudad de Londres en el año de 1854. El Dr. John Snow, sabía que para contener la epidemia del cólera, tenía que buscar su origen. Se valió de mapas para mostrar la ubicación de las bombas de agua y las casas de personas que murieron por cólera, cartografió en un plano del distrito de Soho los pozos de agua, localizando al pozo existente en Broad Street con la mayor cantidad de eventos cercanos. El Dr. Snow recomendó a la comunidad clausurar la bomba de agua, con lo que fueron disminuyendo los casos de la enfermedad (Cerdeja L. Jaime, Valdivia C. Gonzalo, 2007). Este episodio está considerado como uno de los ejemplos más tempranos en el uso del método geográfico para la descripción de casos de una epidemia, fue pionero en el uso de metodologías de investigación epidemiológica moderna, por la implementación de encuestas y la epidemiología espacial, que en la actualidad se realizan con el apoyo de un computador (Gatrell Anthony C. and Senior M. L., 1999; McLafferty Sara L., 2003).



**Figura 4:** Mapa del Dr. John Snow del distrito de Soho en Londres 1854, el que proporcionaría uno de los ejemplos más tempranos del análisis espacial y permitió al Dr. Snow localizar con precisión un pozo de agua contaminado como la fuente causante del brote de la enfermedad del cólera.

En Salud Pública, los SIG son herramientas valiosas que ayudan a combinar datos demográficos (edad, sexo, grupos étnicos, distribución, etc.), con datos de salud (tipos de enfermedades, incidencias, prevalencia, etc.), características del medio natural (clima, altitud, precipitación, etc.) y otra información que se considere necesaria. Se puede obtener resultados para precisar las áreas de influencia de determinadas enfermedades, la ocurrencia por edades, por sexo, grupo étnico o por determinadas condiciones del medio ambiente natural, la posibilidad que se presente en otras áreas por tener las mismas condiciones naturales o demográficas, etc. El empleo de esta herramienta ayuda a lograr una visión integral de lo que ocurre en la salud pública para promover el análisis de la información y la toma de decisiones para prevenir, controlar enfermedades y promover la salud.

Entre las aplicaciones más conocidas en el campo de la epidemiología y la salud pública están:

- Localización, identificación de eventos
- Mapa de patrones
- Modelos relacionales
- Mapas predictivos
- Test de predicciones

- Evaluación de proyectos
- Acceso a servicios de salud
- Impacto de planes y programas de salud
- Análisis exploratorio de datos espaciales
- Determinación de nicho ecológico
- Entre otros

En los últimos años los Sistemas de Información Geográfica, se están utilizando cada vez más para examinar el impacto de la distancia, en conjunción con factores no espaciales en el acceso y la utilización de los servicios de salud (Higgs Gary, 2009).

### **2.1.3. Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SDSS/SADE)**

La preocupación por la distribución espacial equitativa y justa de los recursos en las políticas sociales, es uno de los temas conflictivos centrales a definir en cualquier gestión de gobierno y por ello están apareciendo crecientemente en el ámbito académico, investigaciones teóricas y metodológicas que contribuyen a resolver este problema (Buzai G. and Baxendale C., 2011; Karst T. Geurs and Bert van Wee, 2004; Kelly M. and Flowerdew R. and Francis B.J. and Harman, J.C., 2003). La complejidad de lo social en la actualidad obliga a pensar en métodos de asignación de recursos que superen el uso de parámetros rígidos (racionalistas) y basados en criterios únicos (monocriterio); resultando indispensable por ello tener en cuenta muchas variables y sus interacciones en forma conjunta, y someterlos a juicios de valor emitidos por los agentes sociales responsables de la toma de decisiones. De esta manera es posible interpretar y actuar sobre los procesos más o menos complejos que favorecen u obstaculizan el desarrollo social.

Una de las vías posibles para resolver este problema consiste en el desarrollo y aplicación de un Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE), orientado a la asignación de recursos en políticas sociales que en base a métodos de evaluación y decisión multicriterio ECM permiten, analizar por partes el problema de la asignación, implementar criterios cuantitativos y cualitativos en los procedimientos de distribución y, complementar los resultados con métodos matemáticos de optimización (Bosque Sendra J., 2001; Bosque Sendra J. and F., 2000; Buzai G. and Baxendale C., 2011; Koenig J. G., 1980; Mennis and Tomlin, 2005).

El SADE, es una aplicación que funciona como un sistema de información el cual puede ayudar a los usuarios a tomar decisiones de manera flexible sobre cuestiones territoriales, seleccionar la mejor solución a partir de modelos de simulación, modelos matemáticos y de optimización, propios de los análisis de toma de decisiones, e integrarlos en una interfase que permite la interacción con el usuario para dar soluciones. La diferencia fundamental entre los sistemas de ayuda a la toma de decisiones tradicionales y los SADE está dada por el carácter espacial de la información y su despliegue cartográfico (Sharifi A. and Retsios V., 2003).



## 2.2. Las métricas y sus usos

La medición de distancias de pares de puntos, constituye una operación universal, básica en la ciencia y cotidiana del ser humano. El método y los instrumentos seleccionados en la medición de distancias dependerá de la importancia y precisión requerida. Entre los varios métodos de medición de distancias se ubican:

- Los métodos directos (cuando toda la longitud del segmento es medida mediante de modo contínuo), se pueden usar diversos instrumentos y/o técnicas tales como la cinta métrica, odómetros, conteo de pasos etc. y
- Los indirectos (cuando no es posible realizar una medición de forma directa), como por ejemplo, las triangulaciones, o a partir de instrumentos como los telémetros (Foote Kelly Davis, 1975).

La desventaja de la medición de distancias y/o tiempos de desplazamiento por métodos directos es que suelen ser costosas y su utilidad práctica está limitada al estudio de áreas pequeñas, donde es posible obtener información para un número reducido de distancias o recorridos. Los métodos generales indirectos, para calcular distancias suelen ser menos costosos, en este sentido, podemos mencionar el uso de los SIG como una herramienta de uso sencillo y cada vez más popular, sobre las diversas plataformas se puede hacer cálculos de distancias sobre mapas debidamente georreferenciados y proyectados. Pero además de tomar medidas de modo individual, se puede realizar un gran número de medidas en un sólo proceso, con el empleo de rutinas bajo un entorno de programación. Pero además, se puede obtener medidas personalizadas con el uso de algoritmos, como por ejemplo, calcular los caminos mínimos, o caminos más cortos de un grupo de localidades hacia los servicios de salud más cercanos, haciendo uso del (Shortest path (ruta más corta)/Least cost path (ruta de menos costo) /routing algorithms (algoritmos de rutas o caminos)), que se puede calcular sobre una red de transporte conocida como análisis de redes o (network analyst) o sobre una superficie de costo (cost surface) (Ray Nicolas and Ebener Steeve, 2008), dependiendo de la capacidad de almacenamiento y operaciones o de las facilidades de una respecto a la otras es que vamos a inclinarnos por uno u otro método. Además al trabajar con los Sistemas de Información Geográfica se que pueden manejar grandes volúmenes de información (miles a millones de distancias/tiempos de desplazamiento) resultando por ello ideal para estudiar ámbitos con un gran número de unidades espaciales.

Otra elección es el uso de tiempos en lugar de distancias, cuando se estudia el acceso geográfico a mercados, estaciones de servicio, establecimientos de salud o cualquier otro servicio. Para optar por el uso de tiempos versus al uso de distancias, las razones se deben a múltiples factores, entre ellos: (a) En la práctica, las personas usualmente toman en cuenta el tiempo de viaje y no la distancia cuando consideran la acudir a un servicio, o cuando tienen que elegir uno de entre varios puntos de oferta de servicios idénticos. (b) El tiempo es una medida más fácilmente comparable e intercambiable entre ámbitos distintos, con territorios con impedancias disímiles. Tal es el caso de ámbitos con distintas características de la red vial, en los cuales la misma distancia tendría distinto significado. (c) En el caso de los servicios de salud de emergencia, el tiempo de demora en la atención de urgencias y emergencias, suele ser un parámetro normativo de la calidad del sistema sanitario, por lo que tiene más sentido expresar la separación geográfica en medidas de tiempo (Garrocho C., 1992).

Los cálculos de distancia resultan muy importante en los modelos de localización-asignación. La medida de la separación entre los puntos de demanda y los puntos de oferta  $d_{ij}$ , es decir, desde los centroides de áreas con demanda agrupada hacia las instalaciones existentes o los puntos candidatos pueden ser determinadas en función a al recorrido o desplazamiento o también, por el tiempo consumido por las personas para trasladarse desde un punto de la superficie terrestre hacia otro de interés. Para obtener el tiempo en lugar de las distancias entre los pares de puntos, es necesario realizar procedimientos adicionales para llevar las unidades de distancias a unidades de tiempo, partiendo del cálculo de distancias, calculadas con diferentes métricas<sup>6</sup>, entre las que podemos mencionar:

### 2.2.1. Distancia Linear

La distancia en línea recta o distancia euclideana, la cual surge ante la consideración de un espacio ideal a partir del cual no existe limitaciones para transitar en cualquier sentido se obtiene mediante la aplicación de la siguiente fórmula .

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2.1)$$

Donde:

$p_i, p_j$  son pares de coordenadas

$p_i = (x_i, y_i)$  coordenada (x,y) para un punto (i) dado

$p_j = (x_j, y_j)$  coordenada (x,y) para un punto (j) dado

### 2.2.2. Distancia de Manhattan

La distancia de Manhattan o city block Distancia que asume que, entre dos puntos, es posible desplazarse siguiendo rectas horizontales verticales, es decir a través de una grilla regular, que está dada por.

$$d_{ij} = |(x_i - x_j) + (y_i - y_j)| \quad (2.2)$$

---

<sup>6</sup>La métrica, es la función matemática que permite calcular la distancia entre puntos y debe cumplir las condiciones de: Positividad ( $d_{ij} \geq 0$ ). Identidad, si  $d_{ij} = 0$  entonces ambos puntos se ubican en el mismo lugar del espacio. Simetría ( $d_{ij} = d_{ji}$ ) y Desigualdad Triangular ( $d_{ij} \leq d_{ik} + d_{kj}$ ).

Donde:

$p_i = (x_i, y_i)$  coordenada (x,y) para un punto (i) dado

$p_j = (x_j, y_j)$  coordenada (x,y) para un punto (j) dado

En ambos casos entre la distancia lineal y la distancia de Manhattan, los resultados se obtienen a partir de la consideración de coordenadas absolutas sobre el espacio geográfico, mientras que para el primero es la resolución potagórica del cálculo de la hipotenusa de un triángulo, el segundo sería la suma de las unidades de medida para ambos catetos.

### 2.2.3. *Distancia Lp*

Con la finalidad de generar posibilidades de cálculo más flexibles que tiendan a superar la métrica de Manhattan, ante problemas de subestimación provocados por localizaciones entre bloques o la aparición de barreras, o de sobreestimación a partir de la aparición de calles en diferente dirección de la cuadrícula de circulación básica (Hodgson et al, 1995).

$$d_{ij}^{\beta} = (|x_i - x_j|^p + |y_i - y_j|^p)^{\beta} \quad (2.3)$$

### 2.2.4. *Network distance / distancia de rutas o caminos*

También es posible obtener métricas más complejas como las definidas sobre el recorrido de la red de caminos existentes ("*network distance*"). En esta métrica es necesario disponer de un mapa en detalle de la red de caminos que conectan las ubicaciones de todos los puntos de demanda con todos los puntos de oferta de servicio (Love D. and Lindquist P., 1995; Massam Bryan H. and Akhtar Rais and Askew Ian D., 1986; Mei-Po, 1998). La distancia sobre el recorrido se obtiene identificando la ruta más corta entre dos ubicaciones empleando dicha red de caminos. Por otro lado, es posible construir medidas de la barrera geográfica basadas en estimaciones de la resistencia ó impedancia a atravesar el territorio ("*cost surface o superficie de costo*"), de las cuales se deriva el costo o los tiempos de viaje de desplazarse entre dos ubicaciones. Para ello es necesario especificar unidades del costo (ej, el tiempo) que significa atravesar cada segmento del territorio. En este caso, el tiempo (o el costo) de viaje se obtiene identificando la ruta más rápida o de menor costo. En cada caso la identificación de la ruta más corta o más rápida requiere del empleo de herramientas especializadas, algunas incorporadas en Software de Sistemas de Información Geográfica, libres y comerciales.

En resumen cada una de las métricas señaladas corresponde a supuestos y simplificaciones de cómo los usuarios de los servicios intentarán desplazarse desde sus lugares de residencia hasta las ubicaciones de destino, teniendo por ello distintas ventajas y desventajas. El empleo de una medición sobre la otra dependerá del contexto de cada aplicación particular, de las características del ámbito de estudio y de la escala del mismo. Por ejemplo, las distancias en línea recta tienen la ventaja de que son simples de calcular, y son la métrica de elección en los ámbitos con territorios planos y sin barreras, con amplias y extensas redes de caminos en los que no se identifican mayores diferencias entre éstas medidas y otras más complejas.

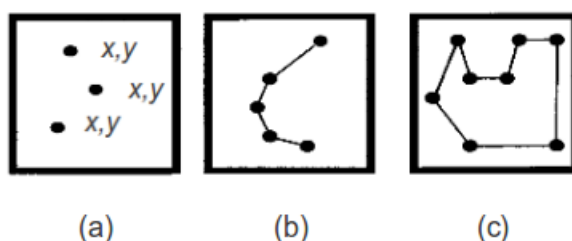
## 2.3. Modelos para el cálculo de distancias

### 2.3.1. Cálculo de distancias en base vectorial

El cálculo de distancias en base vectorial, se lleva a cabo sobre formatos vectoriales, los que se representan internamente por medio de segmentos orientados de, rectas o vectores. De este modo un mapa queda reducido a una serie de pares ordenados de coordenadas, utilizados para representar puntos, líneas y superficies y se captura de la información por medio de: mesas digitalizadoras, convertidores de formato raster a formato vectorial, sistemas de geoposicionamiento global (GPS) y entrada de datos alfanumérica. Con un par de coordenadas se define un punto, con dos puntos se genera una línea, y con una agrupación de líneas se forman polígonos.

Con el cálculo de distancias en base vectorial es posible obtener distancias más complejas como las definidas sobre el recorrido de la red de caminos existentes (“network distance”), estas distancias corresponden a las simplificaciones y supuestos de cómo los usuarios de los servicios intentarán desplazarse desde sus lugares de residencia hasta otras ubicaciones, en las que por lo general existe uno o más servicios.

Es importante señalar que los modelos network están referidas al modo en que las demandas y los viajes entre los sitios de demanda y las facilidades, asumen que ocurren en una red o grafo<sup>7</sup> compuesto de nodos y sus links, es decir que, en los modelos de localización de base vectorial, las ofertas o facilidades pueden ser ubicadas sólo en los nodos o en las líneas que unen a los nodos del modelo de red (Daskin Mark S., 1995).



**Figura 5:** Modos de representación en formatos vectoriales: (a) Representación de puntos  $(x_1, y_1)$  (b) Representación de líneas  $(x_1, y_1)(x_2, y_2)(x_3, y_3) \dots (x_n, y_n)$  y (c) Representación de polígonos  $(x_1, y_1)(x_2, y_2)(x_3, y_3) \dots (x_1, y_1)$ .

### 2.3.2. Cálculo de distancias en base celular o ráster

El formato ráster se obtiene cuando se digitaliza un mapa o se captura una fotografía o cuando se obtienen imágenes digitales capturadas por satélites. En ambos casos se obtiene un archivo digital de esa información. La captura de la información en este formato se hace

<sup>7</sup>En matemáticas y ciencias de la computación, un grafo, es un conjunto de objetos llamados vértices o nodos unidos por enlaces llamados aristas o arcos, que permiten representar relaciones binarias entre elementos de un conjunto.

mediante los siguientes medios: scanners, imágenes de satélite, fotografías aérea, cámaras de video entre otros.

Cuando los cálculos de distancias se realizan con base geométrica a partir de la cuadrícula **Raster** en la que se presenta el espacio, se denomina también un modelo discreto, estos permiten el uso de distancias arbitrarias entre los nodos, debido a que no existe líneas o redes específicas a seguir (Daskin Mark S., 1995). Los usuarios discurren por rutas digitalizadas y no digitalizadas y la distancia real depende también de la resolución espacial de la cuadrícula ráster que se usa para su cálculo, lo cual puede darse en algunas aplicaciones y en algunos ámbitos. En otras circunstancias las medidas más complejas son inevitables si es que se desea obtener datos aceptables y más cercanos a la realidad estudiada. Este es el caso, por ejemplo, cuando la movilidad dentro de cierto ámbito de estudio no es uniforme, y dependa fuertemente de la red de caminos y su estado.



**Figura 6:** Representación del mundo real, en modo vectorial versus modo ráster. La primera está definida por líneas o vectores y la segunda se trata de retículas, celdas o grillas.

Asumiendo que se cuentan con los datos espaciales apropiados para representar los servicios (por ejemplo, establecimientos de salud) y la demanda (por ejemplo, los centros poblados), es posible construir prácticamente todas las métricas descritas previamente para caracterizar la separación espacial entre la demanda y los servicios. En la época en la que los sistemas de información geográfica no existían o no eran accesibles y eran muy poco difundidos, las métricas empleadas se restringían fundamentalmente a distancias en línea recta, obtenidas mediante métodos cartográficos o a datos de registros obtenidos de manera directa, tanto de distancias como de tiempos.



**Figura 7:** Representación de los cálculos de distancias, según la métrica elegida (Apparicio Philippe and Abdelmajid Mohamed and Riva Mylène and Shearmur Richard, 2008)

El advenimiento y la difusión de los SIG, ha permitido que puedan obtenerse métricas de distancia, tiempo o costo más diversas y para una mayor cantidad de aplicaciones. En la figura se muestran cuatro tipos distintos de métricas de distancia / tiempo, que se pueden construir con SIG y la diferencia de sus valores entre ellas para un tramo dado, donde la distancia euclídeana es la más corta.

En la (Tabla 1), se resume las facilidades que proporcionan los SIG para la generación de las métricas y como auxiliares en la construcción de algunos indicadores de acceso geográfico.

**Tabla 1:** Indicador y herramienta de Sistemas de Información Geográfica para su cálculo

Métrica/Indicador	Tipos de datos requeridos	Herramienta SIG
Número de servicios contenidos dentro de unidades geográficas (disponibilidad)	Puntos (vectores) para la ubicación de la oferta. Polígono (vector) para el Área administrativa	Se identifican los puntos de oferta existentes dentro de cada polígono correspondiente a cada área administrativa
Distancias en línea rectas (Euclídeana)	Ubicación espacial de puntos de oferta y demanda	Cálculo directo de la distancia mediante el teorema de pitágoras.
Distancias Manhattan	Ubicación espacial de puntos de oferta y demanda	Cálculo directo, sumando las diferencias absolutas entre las coordenadas horizontales y verticales
Distancia de recorrido en la red de caminos (Network distance)	Ubicación espacial de puntos de oferta y demanda. Datos espaciales (líneas, usualmente vectores) para la red de caminos	Cálculo de distancias para cada segmento de la red vial (resulta de sumar las distancias euclídeas entre los puntos sucesivos que definen cada segmento de la red vial). Empleo de algoritmos ( <i>Shortest path</i> ) para ubicar la ruta de menor distancia entre puntos de demanda y punto de oferta.
Tiempos/costo de desplazamiento	Ubicación espacial de puntos de oferta y demanda	Datos espaciales para la construcción de la superficie de impedancia. Empleo de datos espaciales temáticos, de múltiples Bases (pendientes, precipitación, cobertura de suelo, etc) para asignar, mediante especificación de supuestos, los costos o tiempos que son aplicados a cada cuadrícula del territorio (modelo raster) o a la red vial (modelo vectorial). Empleo de Algoritmos ( <i>Shortest path</i> ) para ubicar la ruta de menor distancia entre puntos de demanda y punto de oferta.
Número de servicios que pueden alcanzarse dentro de un radio especificado (disponibilidad)	Puntos (vectores) para la ubicación de la oferta y la demanda	Buffering alrededor de cada punto de demanda para crear un polígono circular. Luego se identifican los puntos de oferta que se ubican dentro de cada polígono asociado a la demanda.
Número de servicios disponibles dentro de un ancho de banda especificado (disponibilidad)	Puntos (vectores) para la ubicación de la oferta y la demanda	Densidad Kernel alrededor de los puntos de oferta creando una superficie de densidad de servicios. Luego se identifica la densidad de servicios en la ubicación de cada punto de demanda.

### 2.3.3. Superficie de Costo

La superficie de costo en las geociencias, es un modelo bidimensional que comprende cuadrículas georreferenciadas ráster, resultante de combinar varias capas temáticas, estas capas son formatos raster y/o capas vectoriales previamente rasterizadas que permiten simular la realidad del terreno en celdas. Entonces, las celdas de la superficie de costo representan segmentos de territorio cuadrangulares de idéntico tamaño entre ellas, que almacenan valores que representan el costo (nivel de fricción ó impedancia), expresado en unidades de distancia o en valores de tiempos requeridos para atravesarla, dicho de otro modo representan atributos ó fenómenos conocidos que modifican la velocidad de desplazamiento sobre el territorio, tales como (a) La pendiente, (b) Los cauces de los ríos, (c) El tipo de vía, entre otros, debido a que cada uno de ellos contribuye o resta la velocidad de desplazamiento de los vehículos motorizados o de los caminantes.

El tiempo o distancia medida se almacena y representa el resultado de atravesar cada uno de dichas celdas, las que también se denominan "pixel". El pixel tiene una resolución de trabajo y para la obtención de la superficie de costo es necesario elegir un tamaño común de celdas que dependerá de la resolución de los insumos usados y de las necesidades que busca satisfacer el modelo. Por ejemplo, si se elige 30m. de resolución espacial, entonces todas las capas temáticas deberán ser remuestreadas a dicha resolución.

2	2	1	1	5	5	5
2	2	8	8	5	2	1
7	1	1	8	2	2	2
8	7	8	8	8	8	5
8	8	1	1	5	3	9
8	1	1	2	5	3	9

**Figura 8:** La imagen muestra una superficie de costo de 6 filas x 7 columnas, los valores enteros almacenados en las celdas corresponde a la combinación de las capas temáticas empleadas, las mismas que van a dar la complejidad al modelo. La celda señalada es un punto de partida para el inicio del cálculo de la superficie de costo acumulado

### 2.3.4. Superficie de Costo Acumulado

La superficie de costo acumulado consiste en la unión de celdas desde un punto inicial (A) hacia un punto final (B), a través de una ruta o camino que puede ser el más corto. Entonces el tiempo o distancia acumulada, que demora en atravesar el camino, es la suma de los tiempos de desplazamiento de todas las celdas que conforman dicho camino. Cada celda de estas nuevas cuadrículas almacena el tiempo que demora trasladarse. Este procedimiento se repite varias veces, modificando en cada vez el punto de destino, hasta obtener superficies de costo acumulado para cada uno de los pares de puntos.



Dado a las réplicas que deben realizarse para la obtención de los valores, es necesario la implementación de algoritmos a modo de facilitar el proceso y es importante restringir el área de estudio y los números de pares a procesar para que los tiempos de cómputo sean aceptables.

Dentro de los sistemas de información geográfica, el pixel tiene dos modos de ser atravesado, la primera que va desde su centro hacia el vértice por la diagonal y el otro partiendo también desde el centro en línea recta hacia uno de los lados. El costo de atravesar las celdas por la diagonal es mayor que atravesar las celdas por una ruta paralela a las aristas. El modo en que se atraviesa el pixel es importante para los cálculos de computo que se utiliza.

Para la tesis se ha elegido atravesar las celdas por la diagonal.

2	2	1	1	5	5	5
2	2	8	8	5	2	1
7	1	1	8	2	2	2
8	7	8	8	8	8	5
8	8	1	1	5	3	9
8	1	1	2	5	3	9

**Figura 9:** Para obtener el costo acumulado se parte de la celda con valor cero (inicial) hacia las otras celdas de la matriz.

21	21	20	19	17	15	14
20	22	22	19	15	12	11
22	18	17	17	12	11	9
21	14	13	12	8	6	6
16	13	8	7	4	0	6
14	9	8	9	6	3	8

**Figura 10:** El cálculo del costo acumulado se basa en la suma de las celdas, desde el centro inicial hacia el centro de la celda objetivo.

## 2.4. Acceso geográfico

Conceptualmente el acceso de una población a un servicio cualquiera esta dado por la probabilidad de que los miembros de la población interactúen con el servicio ([Bosque Sendra J. and Moreno Jiménez, 2004](#)). Al estudiar este fenómeno, se identifica al factor geográfico, definido en términos de la distancia ó tiempo de desplazamiento desde la ubicación de la población hasta los puntos de oferta del servicio, como un fuerte modelador del uso de los servicios. La impedancia al desplazamiento de las personas que impone la superficie del territorio hace que la probabilidad de interacción con los servicios se reduzca en relación inversa a la distancia (o tiempo) que separa los puntos de demanda de los puntos de oferta ([Andries et al., 1999](#); [Muller JC., 1985](#); [Peters J. and Hall G. B., 1999](#); [Phibbs C. S. and Luft H. S., 1995](#); [Rezende F. A. and Almeida, R. M. and Nobre, F. F., 2000](#); [Robin et al., 2006](#); [Shariful et al., 2008](#)).

En términos generales el acceso geográfico evalúa la dificultad (o la facilidad) con la cual las personas pueden movilizarse entre los pares de puntos, satisfaciendo con ello las necesidades por los servicios (Guagliardo Mark F., 2004). El concepto de acceso geográfico incorpora dos elementos. Uno de ellos es la disponibilidad de servicios de salud, entendida como el volumen de la oferta de servicios disponible, en relación con el volumen de demanda (o población) existente dentro de un ámbito determinado. El otro elemento tiene que ver en cómo se distribuye espacialmente la oferta respecto de la ubicación espacial de la población que demanda los servicios, lo que nos conduce al concepto de separación espacial, impedancia física ó barrera geográfica (Sander H A and Ghosh D and van Riper D and Manson S M, 2010; Talen E. and Anselin L., 1998; Tobler Waldo R., 1993; ?).

El factor físico/geográfico es claramente un elemento clave en la valoración del acceso a los servicios de salud. Este factor se fundamenta en el hecho de que el esfuerzo asociado a la decisión del individuo de acudir a un servicio de salud, por ende se argumenta que la cantidad de interacciones espaciales asociadas a las decisiones los individuos de usar los servicios ocurrirán en mayor número sobre separaciones más pequeñas y disminuirán conforme la separación se incrementa, argumentación para la que se dispone de una amplia evidencia empírica (Duarte and Gwyn, 2006; Garrocho C., 1992; Higgs Gary, 2004; Ingram D.R., 1971).

### 2.4.1. Acceso geográfico a los Servicios de Salud

La Organización mundial de la salud (OMS o WHO World Health Organization por sus siglas en inglés) define acceso a los servicios de salud como una medida de la proporción de la población que “alcanza” a los servicios de salud apropiados (WHO, Regional Office for Europe 1998). Penchansky and Thomas (1981), señalan por ejemplo que el acceso es un concepto que se relaciona con la capacidad de las personas de ingresar y hacer uso del el sistema de salud y lo desagregan luego en cinco dimensiones:

- **Disponibilidad**, que hace referencia al volumen existente de servicios en relación con las necesidades de los usuarios.
- **Accesibilidad**, que hace referencia a la barrera física que define la separación entre los usuarios de los servicios, y los medios disponibles a los usuarios para superarla.
- **Asequibilidad** (affordability), hace referencia a los recursos disponibles a los usuarios respecto del costo (gasto) que se requiere para ingresar y hacer uso de los servicios de salud.
- **Adecuación** está relacionada con la manera cómo se organizan los servicios, y si éstos son facilitadores del ingreso de usuarios en el sistema,
- **Aceptabilidad**, hace referencia al grado de satisfacción del usuario del servicio de salud recibido.

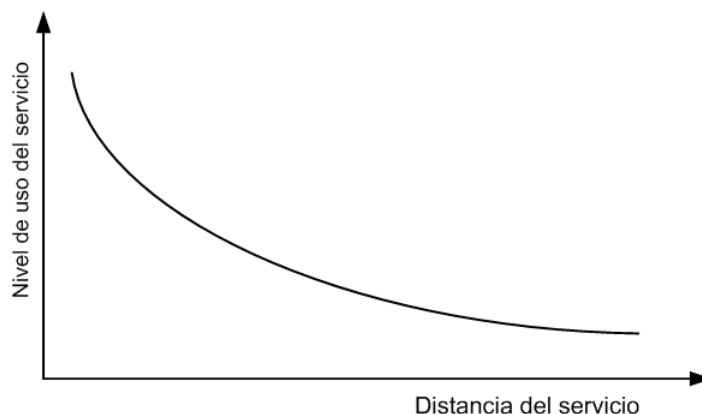
Aday L. A. and Andersen R. M. (1981) hacen también una distinción entre “tener acceso” a la salud y “obtener/ganar acceso”. En el primer caso, el individuo es pasivo, contemplándose solamente los factores estructurales del entorno así los factores que dependen del sistema de salud (como la disponibilidad de servicios). El segundo caso hace referencia a si los individuos, con los recursos o las capacidades para superar las barreras económicas, organizacionales y socioculturales descritas, hacen uso efectivo de los servicios.

Mooney (1996), desde una perspectiva distinta, sugiere que el acceso a los servicios debe ser evaluado en términos de los costos que los individuos deben asumir para usar los servicios de salud. Estos costos son todos los costos asumidos por el usuario, tales como el costo de transporte o el costo asociado a cualquier esfuerzo que haga el usuario para obtener una atención de salud. Según esta formulación, a iguales costos (para los individuos) resulta igual acceso. También argumenta que el acceso es totalmente una cuestión de 'Oferta', y que el uso de los servicios depende tanto de la oferta como de la demanda, subrayando que "Igualdad de acceso es igualdad de oportunidad. La cuestión de si la oportunidad es o no aprovechada, no es relevante para la equidad, definida en términos del acceso".

Finalmente, Khan A. A. (1992) propone una tipología que clasifica los factores descritos de acuerdo con dos dimensiones dicotómicas: La primera dimensión se desagrega los factores del acceso en espaciales y no espaciales. En el acceso espacial se contemplan los elementos de disponibilidad y accesibilidad descritos por Penchansky R and Thomas JW. (1981), mientras que en los factores no espaciales se agrupan los elementos de asequibilidad, adecuación y aceptabilidad. La segunda dimensión diferencia el acceso potencial del acceso efectivizado. El acceso potencial está asociado fundamentalmente a factores estructurales del sistema de salud (e.g. disponibilidad en cantidad y calidad, de infraestructura, recursos y personal de salud, la organización de los servicios y su costo) y del entorno del individuo (e.g. disponibilidad de vías y medios de transporte), que incluye los aspectos espaciales como no espaciales, las cuales definen las oportunidades que tienen las personas para hacer uso de los servicios de salud. Por otro lado el acceso efectivo (realizado o revelado) se focaliza en el uso actual de los servicios de salud, hace referencia a si los individuos, en base a sus necesidades, preferencias y capacidades son capaces de 'tomar' las oportunidades disponibles y hacer uso efectivo de los servicios (Joseph and Phillips, 1984; Khan, 1992). Una manera de evaluar este elemento es identificar los esfuerzos/costos que debe realizar los individuos para hacer uso final de los servicios dadas iguales oportunidades.

El factor geográfico es relevante en la valoración del acceso global a servicios debido al hecho de que buena parte del esfuerzo que realizan los individuos para hacer uso de un servicio depende de la magnitud de la barrera física que lo separa del servicio (Truelove M, 1993; Upchurch et al., 2004; Vickerman R W, 1974). Esto es, para un conjunto de servicios con condiciones iguales (exceptuando la separación geográfica), los individuos optarán por hacer uso de los servicios más cercanos. Este hecho determina que en la práctica se observe que el uso de los servicios ocurra en mayor frecuencias para separaciones más pequeñas y la frecuencia disminuye conforme la separación se incrementa (Jamie et al., 2006; Jilda C.G. Hyndman and C.D. Arcy J. Holman and Douglas A. Pritchard, 2003; J.R and de Jong T, 1999).

Dicho de otro modo, se verifica cierta 'ley natural' que establece que las probabilidades de interacción entre usuarios y servicios tengan una relación inversa con la separación física entre ambos. Esta relación entre nivel de uso de servicios y separación geográfica asume una forma funcional denominada en la literatura como "distance decay function" o función del decaimiento o reducción de la distancia (Joseph and Phillips, 1984; Talen E. and Anselin L., 1998) que puede ser equivalente a función de impedancia (Handy S L and Niemeier D A, 1997) como se observa en la figura. .



**Figura 11:** Función de impedancia, *Distance decay function*, es un término geográfico que describe el efecto de la distancia en las interacciones culturales o espaciales. El efecto de decaimiento distancia indica que la interacción entre dos lugares disminuye a medida que la distancia entre ellos aumenta.

Uno de los términos relacionados incluyen "fricción de la distancia", que describe la fuerza que crea el decrecimiento de la distancia y la primera ley de la geografía de Waldo R. Tobler que define de modo informal que "Todas las cosas están relacionadas, pero las que están cercanas más"

El decaimiento de la distancia se representa gráficamente por una línea curva que se abalanza cóncava hacia abajo, como la distancia a lo largo del eje X aumenta. También pesa en la decisión de migrar, lo que lleva a muchos migrantes a moverse menos lejos de lo que contemplan originalmente. El decaimiento de la distancia se puede representar matemáticamente por la expresión:

$$I = 1/d^2$$

Donde I es la interacción y d es la distancia.

## 2.5. La optimización y la Programación Linear (PL)

La optimización (lineal, no lineal, entera, estocástica, multiobjetivo) teoría de la decisión y de juegos, teoría de colas y simulación, teoría de grafos o flujos de redes. Otras disciplinas como algoritmos metaheurísticos y lógica borrosa, redes neuronales artificiales, reconocimiento de patrones y otras técnicas de inteligencia artificial que conceptualmente se encuadran dentro de la investigación operativa, habitualmente se estudian dentro de otras disciplinas ligadas a la ingeniería informática como la inteligencia artificial. Los contenidos de algunas de estas disciplinas también están muy ligados a la estadística.

Resolver un problema de optimización consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones.

Los métodos de optimización los podemos clasificar en: métodos clásicos (que son los algoritmos que habitualmente se explican en los libros de optimización) y métodos metaheurísticos (que aparecieron ligados a lo que se denominó inteligencia artificial e imitan fenómenos sencillos observados en la naturaleza) ([Acosta Espejo Luis Gonzalo and Boffey](#),

2003). Dentro de los primeros se encuentra la optimización lineal, lineal entera mixta, no lineal, estocástica, dinámica. En el segundo grupo se incluyen los algoritmos evolutivos (genéticos entre otros), el método del recocido simulado (simulated annealing), las búsquedas heurísticas (método tabú, búsqueda aleatoria, avariciosa, etc.) o los sistemas multiagente. De forma muy general y aproximada se puede decir que los métodos clásicos buscan y garantizan un óptimo local mientras que los métodos metaheurísticos tienen mecanismos específicos para alcanzar un óptimo global aunque no garantizan su alcance (Berke 2009).

La Programación Lineal es una teoría matemática desarrollada en el siglo XX. Los matemáticos que han intervenido en la creación y desarrollo de la Programación Lineal han sido:

Leonid Vitalevich Kantorovitch, que en 1939 publica una monografía titulada "Métodos matemáticos de organización y planificación de la producción". Tjalling Charles Koopmans, que junto con el anterior estudiaron entre 1941 y 1942 el conocido ahora como problema del transporte. Ambos recibieron el premio Nobel de Economía en 1975. George Joseph Stigler, que en 1945 planteó el problema del régimen alimenticio optimal, conocido ahora como problema de la dieta. George Bernard Dantzig, que formuló en 1947 el enunciado general al que se reduce cualquier problema de Programación Lineal y autor del método del simplex para la resolución de problemas. John von Neumann, que en 1947 relacionó los problemas de Programación Lineal con la teoría de Matrices.

La programación lineal, es una colección de procedimientos para "optimizar", esta optimización busca incrementar el beneficio o el rendimiento de la calidad, o el disfrute (Xin-She Yang, 2008). maximizando o reduciendo al mínimo las funciones lineales sujetos a restricciones lineales dadas. De otro modo, se puede incluir a los algoritmos matemáticos mediante los cuales se resuelven problemas indeterminados, formulados a través de un sistema de inecuaciones lineales, optimizando la función objetivo. Realísticamente, diremos que la PL<sup>8</sup>, busca representar los problemas del mundo real, mediante un sistema de desigualdades que están sujetos a restricciones (Xin-She Yang, 2008). Las funciones a optimizar, se denominan funciones objetivo y las cantidades a maximizar o minimizar son, los beneficios (en el caso de maximización) y el coste (en el caso de minimización) (Stryer James K., 1989). Los procedimientos de programación lineal, tienen amplias aplicaciones en diversos campos, como la economía, la salud, el transporte, los problemas de la localización entre otros.

De acuerdo con el tipo de soluciones que presenten un problema de Programación Lineal, dada sus restricciones se pueden clasificar en:

- **Factible:** si existe la región factible. En este caso nos podemos encontrar con óptimo finito y único. La solución óptima está formada por un único punto con coordenadas reales.
- **Múltiples óptimos:** Un problema de Programación Lineal puede tener más de un óptimo. Además, o bien el problema tiene un único óptimo, o bien, tiene finitos óptimos.
- **Óptimo infinito:** Un problema de Programación Lineal puede tener un óptimo no

---

<sup>8</sup>Programación Lineal: Las primeras discusiones sobre la programación lineal, datan de los años 30 con el trabajo de matemáticos, economistas de Alemania y Austria, pero ha sido a partir de los años 50 que se ha desarrollado con amplitud.

finito, es decir, la función objetivo puede tomar, un valor tan grande o tan pequeño como se quiera sin abandonar la región factible.

- **Región factible no acotada, óptimo finito:** La no acotación de la región factible no implica necesariamente óptimo infinito. Puede ocurrir que la función objetivo alcance el óptimo en la zona acotada de la región factible.
- **Región factible no acotada, óptimo finito e infinito:** Puede darse el caso que todos los puntos de una de las semirrectas que determinan la región factible no acotada sean solución del problema.
- **No factible. Región factible vacía:** El conjunto de restricciones de un problema de Programación Lineal puede ser incompatible, conduciendo a una región factible vacía.

### 2.5.1. La localización

La concentración geográfica de las actividades económicas han sido explicadas a través del tiempo. Entre las primeras teorías de la localización, se encuentra los trabajos que hizo en Alemania Johann Heinrich von Thünen en 1820, en su obra "El estado aislado". Su modelo estudia las diferencias de renta con respecto al mercado, es el paradigma para todas las teorías posteriores. La idea central es que la renta varía con la distancia con respecto al mercado, en un espacio isótropo y aislado. A este tipo de renta se le llama renta de localización o renta de ubicación. Von Thünen reconoció que el hombre trata de resolver sus necesidades económicas en el entorno inmediato, reduciendo sus desplazamientos al mínimo.

En 1909, Weber ofrece una teoría general de la localización de las actividades económicas. Los costes de transporte eran considerados como el determinante básico de la localización, aunque lejos de considerarlos directamente, los contempla como una función del peso de los bienes y de la distancia que tiene que cubrirse al transportarlos. La teoría de Weber de la localización industrial sigue un formato semejante al planteado por Thünen. En primer lugar, Weber supone que las empresas se localizarán en aquel lugar donde los costes de producción y de distribución puedan ser minimizados. Weber plantea su modelo en tres etapas diferenciadas:

- a) El punto que minimiza el coste de transporte
- b) Sitios con costes laborales mínimos
- c) Aglomeración

En la actualidad, las teorías de la localización han dado origen a los modelos de localización matemáticos que están diseñados para hacer frente a una serie de preguntas, como:

- a. ¿Cuántas instalaciones deberían estar situadas?
- b. ¿Dónde debe ubicarse cada instalación?
- c. ¿Qué tan grande debe ser cada instalación?
- d. ¿Cómo se debe asignar la demanda a las instalaciones? entonces, notamos que existe doble objetivo en la localización, por un lado encontrar la localización óptima y por el otro determinar la asignación de la demanda a dichos centros.

### 2.5.2. Localización en el sector privado y público

Un punto muy interesante, resulta al cuestionarnos, sobre ¿cuál es la principal diferencia entre las ubicaciones/localizaciones que existen o se proyectan entre el sector público y privado?, la respuesta recae en la naturaleza del objetivo o de los objetivos que los tomadores de decisiones consideran. Podemos decir que, las aplicaciones en el sector público y privado difieren en sus criterios de optimización. El sector privado busca la maximización de los beneficios, la captura de la mayor cuota de consumidores con respecto a sus competidores por esta razón, son preferidas las ciudades de mayor población para fortalecer las actuales ubicaciones de los servicios o proponer uno nuevo, mientras que la minimización del costo social, la universalidad del servicio, la eficiencia y equidad son los objetivos del sector público (Drezner Zvi and Hamacher Horst W., 2004; Toregas C. and Reville C., 1973), esto significa que el mayor costo sea asumido por el estado y pueda existir servicios hasta en ciudades más alejadas.

Según Beyer y Bullen, una dificultad para el abordaje de la localización en el sector público, es que no existe una necesidad primordial y una serie de respuestas pueden surgir en la búsqueda de algo mejor, por ejemplo, si estamos interesados en ubicar un servicio, podemos estar interesados en minimizar el tiempo promedio de respuesta del sistema, o cubrir a la población en riesgo dentro de un tiempo una distancia dada. El primer ejemplo constituye a lo que es conocido en la literatura de la localización como un problema de la p-mediana y el segundo ejemplo es conocido como un problema de cobertura, entre los que encontramos a los modelos (a) definidos por su ubicación (Location Set Covering Problems LSCP), o (b) de cobertura máxima (Maximal Covering Location Problems). La mayoría de servicios publicos usa uno de estos enfoques o una combinación de ambos.

También, existe otro campo, en el cual, los equipamientos a instalar son deseables (beneficiosos para la población) o no deseables (perjudiciales). Mientras que los primeros generan básicamente externalidades positivas (establecimientos de salud, escuelas, centros de refugio etc.) los otros generan externalidades negativas tales como la ubicación de (camales, cárceles, fosa de residuos, etc.), los que se prefieren que estén alejados de las poblaciones (Buzai G. and Baxendale C., 2011).

### 2.5.3. Modelos de localización - asignación

El éxito o el fracaso de los servicios tanto de los sectores privados y públicos depende en gran medida de su localización (Daskin Mark S., 1995; Drezner Zvi and Hamacher Horst W., 2004). En las últimas cuatro décadas se ha incrementado el desarrollo y aplicación de los modelos de localización - asignación de instalaciones (Buzai G. and Baxendale C., 2011; Ricketts Thomas C., 2009; Rispel L. and Doherty J. and Makiwane F. and Webb N., 1996; Rizwan et al., 2009). A partir de esta doble necesidad (1) localizar (2) asignar, es que se desarrollan los modelos de localización - asignación. De acuerdo con (Bosque Sendra J., 2001) los modelos de localización - asignación responden a las siguientes características: (a) son modelos matemáticos, ya que se considera a este lenguaje apto para captar la realidad, (b) son modelos meso-espaciales, porque los aspectos a resolver se encuentran claramente delimitados en un territorio, y (c) son modelos normativos, porque se debe buscar la mejor solución a un determinado problema. En síntesis, estos modelos intentan evaluar las localizaciones actuales de los centros de servicio en base a la distribución de la demanda y generar alternativas para lograr una distribución espacial más eficiente y/o equitativa.



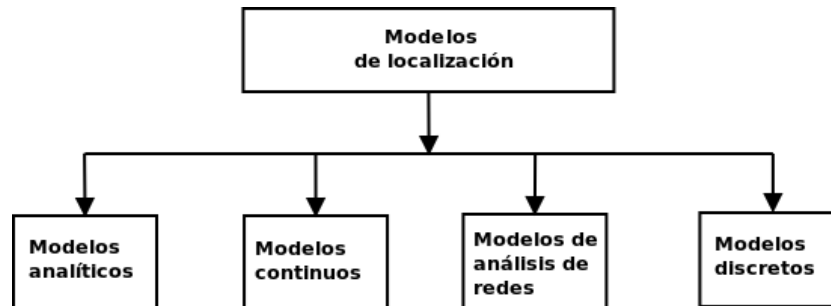
Buscan las ubicaciones óptimas (localización) y determinan las mejores vinculaciones de la demanda (asignación), para lo cual se utilizan estrategias heurísticas para su resolución<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup>El método heurístico: está compuesto por, principios, sugerencias para hallar la solución, analogía y reducción, reglas (ayudan a encontrar los medios para resolver los problemas. La enorme popularidad del término heurística se le debe al matemático George Pólya, quien a través de varias propuestas heurísticas que volcó en su libro "Cómo Resolverlo", se convirtió en una invaluable ayuda para sus alumnos a la hora de resolver problemas complejos.

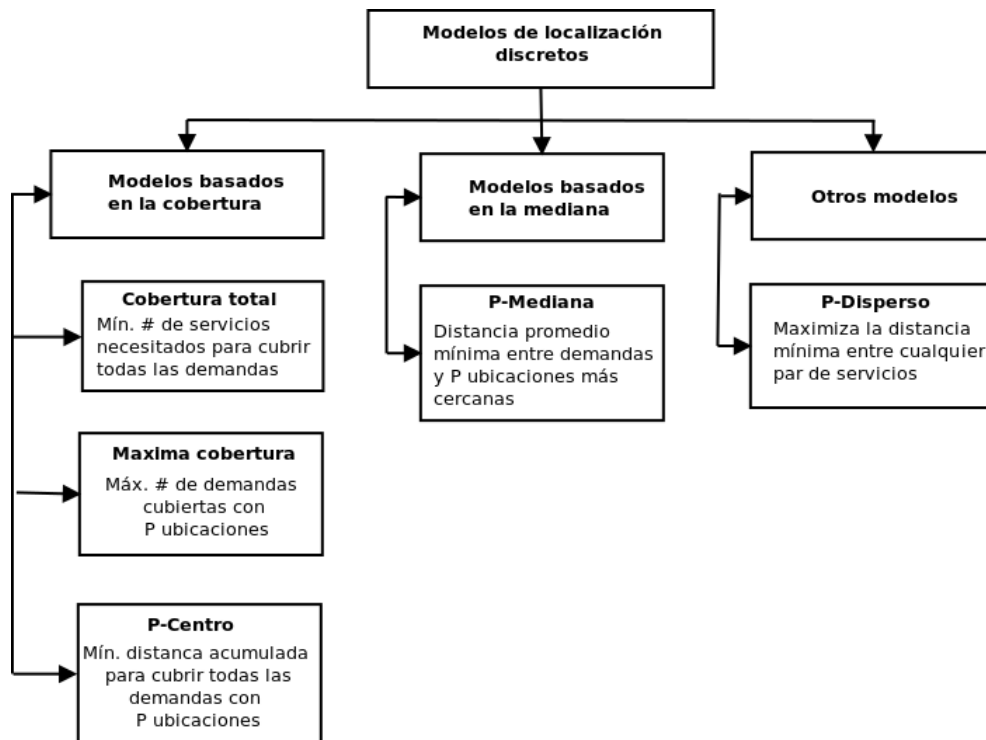
### 2.5.4. Taxonomía de los modelos de localización

Existen diversos modos de subdividir el amplio espectro de los modelos de localización, nosotros usaremos el que propone Mark S. Daskin (2008) en su artículo *“What you should know about location modeling”*.



**Figura 12:** Gráfico adaptado del artículo elaborado por Mark S. Daskin y publicado en Wiley InterScience, (2008)

Donde desarrolla ampliamente la cuarta y última rama de la taxonomía. Se trata de los modelos discretos de localización (Redondo J. L. et al., 2011). En estos modelos, se puede o no, fijar una distancia métrica. Las distancias o costos entre cualquier par de nodos puede ser arbitraria, aunque en general, suelen seguir alguna regla (por ejemplo, Euclidiano, Manhattan, red o grandes áreas de influencia). Las demandas surgen generalmente en los nodos y las instalaciones se limitan a un conjunto finito de lugares candidatos. Los modelos de localización discreta se pueden dividir en tres amplias áreas.



**Figura 13:** Gráfico adaptado del artículo elaborado por Mark S. Daskin y publicado en Wiley InterScience, (2008)

#### 2.5.4.1. Modelos basados en la cobertura (*covering algorithms*)

Los modelos de cobertura, asumen que hay una cierta distancia de la cobertura crítica o el tiempo en el que exige que tenga que ser servido si se quiere contar como “cubierto” o “adecuadamente servido”. Tales modelos normalmente se utilizan en el diseño de servicios de emergencia y es ampliamente usado en el sector público, sin embargo, su uso se está incrementando en el sector privado, cuando la cobertura es una aproximación de la calidad de los servicios. Al modelo de cobertura máxima y al modelo (p-center ó p-centros) también se les denomina (MinMax) porque, buscan minimizar la distancia (o tiempo) máximo que pueda haber entre los puntos de demanda y los puntos de oferta.

#### 2.5.4.2. Modelos basados en la mediana

Los modelos basados en la mediana buscan minimizar la demanda de la distancia media ponderada entre un nodo de la demanda y el nodo de la oferta. También se suelen llamar de mínima suma (MinSum), porque su objetivo es de minimizar la suma del recorrido (distancia o tiempo) total entre los puntos de demanda y los puntos de oferta. Esto suele ser útil para la ubicación de almacenes privados, donde se necesita ahorrar los tiempos de transporte, reduciendo la cantidad de combustible (y dinero) empleado

#### 2.5.4.3. Modelos dispersos

El modelo de dispersión maximiza la distancia mínima entre cualquier par de ofertas. Este modelo es útil en la localización de puntos de venta de franquicias, donde se desea no saturar el servicio.

### 2.5.5. Modelos de cobertura

Debido a la relevancia para la tesis, por ser el modelo aplicado para la solución del problema, vamos ahondar en el modelo de cobertura máxima. Existen dos modelos básicos de cobertura, el primero es Location Set Covering Model (LSCP), modelo de cobertura máxima definida por la localización, modelado dentro de la programación lineal ([Toregas C. and ReVelle C., 1972](#)), este modelo busca ubicar un número mínimo de servicios necesarios para obtener la cobertura obligatoria de toda la demanda ([Toregas C. and ReVelle C., 1973](#)). En otras palabras, cada punto de demanda tiene como mínimo un servicio ubicado dentro de un tiempo o distancia establecida o estandarizada. La primera aplicación de este modelo fué en el área de emergencias de servicios. En este contexto el modelo posiciona un número mínimo posible de vehículos de emergencia de tal modo que la población total, tiene por lo menos uno de estos vehículos inicialmente ubicados dentro de un tiempo o distancia estandar ([Drezner Zvi and Hamacher Horst W., 2004](#)).

([Church R. and ReVelle C., 1974](#)) y ([White J. and K. Case, 1974](#)), formularon el segundo modelo básico de los modelos de cobertura, el Maximal Covering Location Problem (MCLP). Si bien, los servicios públicos deberían estar disponibles para todos, como lo modela el LSCP, el MCLP reconoce una cobertura mandatoria para toda la población en todas las localidades sin importar que tan lejos vivan, el desarrollo de este modelo podría requerir demasiados recursos. Así, el MCLP no fuerza la cobertura de todas las demandas pero, en su lugar, busca la localización de un número fijo de ofertas, que probablemente

no sea suficiente para cubrir toda la demanda dentro de los estándares. de tal modo que, la población o demanda a ser cubierta por el servicio es maximizada. El número fijado de servicios es una aproximación para un limitado presupuesto. Su formulación es la siguiente:

$$v(MCLP) = \text{máx} \left\{ \sum_{i=1}^m f_i x_i \right\} \quad (2.4)$$

Subject to:

$$x_i \leq \sum_{j \in N_i} y_j, \quad i \in I \quad (2.5)$$

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (2.6)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, \quad i \in I \quad (2.7)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad j \in J \quad (2.8)$$

Donde:

$I = \{1, 2, \dots, m\}$  Es el conjunto de puntos de demanda (centros poblados),

$J = \{1, 2, \dots, n\}$  Es el conjunto de ubicaciones potenciales para los servicios de Cuidados Básicos Obstétricos (COB)<sup>10</sup>

$N_i = \{j \in J | d_{ij} \leq T\}$  Es el conjunto de servicios que están localizados dentro de un tiempo de viaje crítico  $T$  desde un punto de demanda  $i$

$f_i$  Es la población del punto de demanda  $i$

$d_{ij}$  Es la distancia más corta del tiempo de viaje, desde un punto de demanda  $i$  hacia un servicio  $j$

$T$  Es el tiempo de viaje crítico, a partir de cual el punto de demanda se considera no cubierto.

$p$  Es el número de Cuidados Básicos Obstétricos a ser seleccionados/ubicados.

$x_i, y_j$  son variables de decisión:

$x_i = 1$  si el punto de demanda  $i$  es cubierto ( $x_i = 0$  de lo contrario)

$y_j = 1$  significa que el servicio COB debería se ubicado en el lugar  $j \in J$  ( $y_j = 0$  de lo contrario).

### 2.5.6. El problema de los caminos mínimos

El algoritmo de Dijkstra, también llamado algoritmo de caminos mínimos, es un algoritmo para la determinación del camino más corto dado un vértice origen al resto de vértices en un grafo con pesos en cada arista.

En la solución del problema del camino mínimo o del camino más corto, se vuelve ineficiente el uso de un paquete estándar de programación lineal o algoritmo, existen medios más efectivos para resolverlo, el más conocido y empleado es el algoritmo de Dijkstra, su nombre hace referencia a Edsger Dijkstra, quien lo describió por primera vez en 1959,

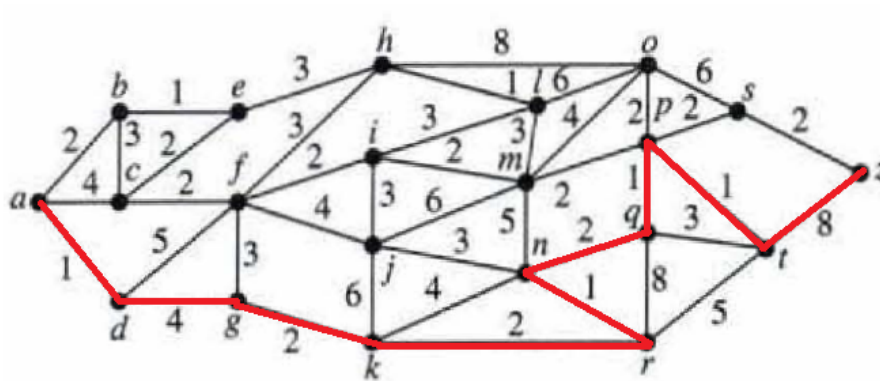
<sup>10</sup>COB: Son servicios que proveen servicios obstétricos básicos y sus siglas en inglés corresponden a BOC Basic Obstetric Care

Dijkstra recibió el Premio Turing en 1972. La idea subyacente en este algoritmo consiste en ir explorando todos los caminos más cortos que parten del vértice origen y que llevan a todos los demás vértices; cuando se obtiene el camino más corto desde el vértice origen, al resto de vértices que componen el grafo, el algoritmo se detiene. El algoritmo es una especialización de la búsqueda de costo uniforme<sup>11</sup>, y como tal, no funciona en grafos con aristas de coste negativo (al elegir siempre el nodo con distancia menor, pueden quedar excluidos de la búsqueda nodos que en próximas iteraciones bajarían el costo general del camino al pasar por una arista con costo negativo).

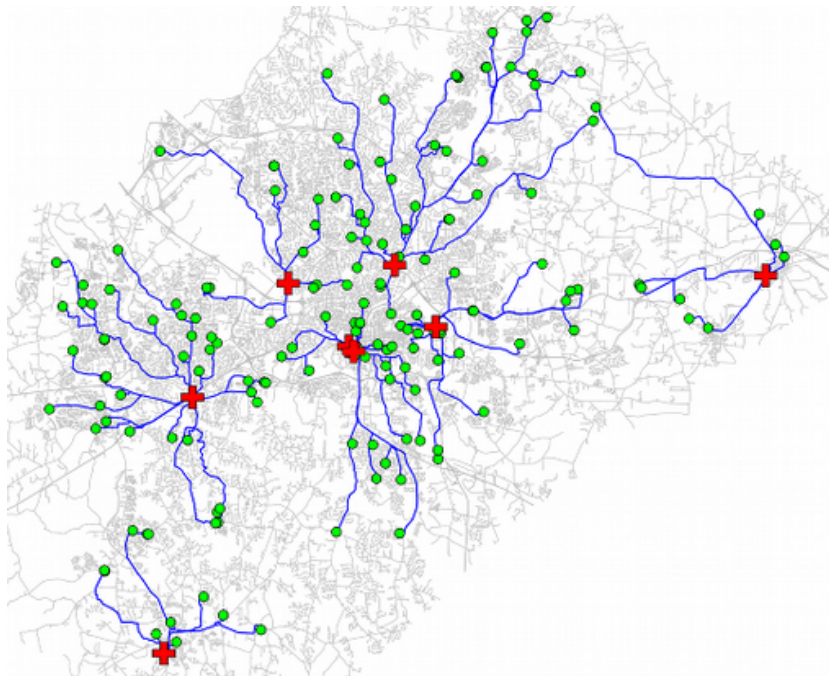
El algoritmo de Dijkstra, está implementado en varios paquetes de computación dedicados a los Sistemas de Información Geográfica, tales como ArcGIS, Grass, entre otros. El algoritmo clásico, resuelve el problema de la trayectoria más corta de origen único en un gráfico ponderado (Sherif Amer, 2007).

---

<sup>11</sup>Búsqueda de Costo Uniforme: En ciencias de la computación, la búsqueda de costo uniforme (UCS) es un algoritmo de árbol de búsqueda. La búsqueda comienza en el nodo raíz, continúa visitando el siguiente nodo, que tiene el menor costo total de la raíz. Los nodos son visitados de esta manera hasta que se alcanza un estado final.



**Figura 14:** En la teoría de grafos, el problema del camino más corto es el problema de encontrar un camino entre dos vértices (o nodos) en un gráfico tal que la suma de los pesos de sus bordes constituyentes se reduce al mínimo. Figura tomada de la web.



**Figura 15:** La figura ilustra como se vincula la red de caminos con la red de servicios de salud, figura tomada de la web.

## **2.6. Planteamientos de salud pública**

### **2.6.1. Los sistemas de salud y su planteamiento espacial para el problema de salud materno neonatal**

El desempeño de los sistemas de salud es relevante para la mejora de la salud de la población, teniendo impacto además en el desarrollo y productividad de las naciones. Un elemento necesario (no el único) para que los sistemas de salud consigan los resultados sanitarios es que los servicios de salud que conforman el sistema sanitario estén disponibles y que sean usados por las personas (Ministerio de Salud, 2001; World Health Organization, 2009). Esto significa que la planificación de los sistemas de salud y la toma de decisiones relacionada debe buscar la mejora del acceso de las personas a los servicios (Nicholls S., 2001; Parker E. B. and Campbell J. L., 1998; Paul et al., 2011), ya sea creando puntos de oferta de los servicios y reduciendo las barreras que limitan el uso de éstos. Por ello la importancia de la toma de decisiones en la planificación de los servicios orientadas a mejorar el acceso de las personas, a fin de reducir las barreras que impiden el uso de servicios y que el acceso a estos sea más equitativo, un elemento crítico e inevitable, dadas sus características intrínsecas, en la planificación de servicios es el factor espacial (Nadine et al., 2006; Oppong Joseph R. and Hodgson M. John, 1994; Perry B. and Gesler W., 2000).

El planeamiento espacial de los servicios de salud tiene que ver con la identificación de ubicaciones geográficas más apropiadas para los servicios de salud en un espacio o territorio dado, de manera que las necesidades de salud de la población dentro de ese territorio sean satisfechas de manera óptima. En este planteamiento resulta fundamental el concepto de acceso ó accesibilidad. En términos bastante generales el acceso está relacionado con la capacidad de las personas de superar diferentes barreras para poder hacer uso de un servicio, siendo un elemento habitual de las intervenciones de salud pública, mediante las cuales se busca acercar al usuario a la satisfacción de sus necesidades de salud.

Aunque el acceso es un objetivo frecuente en el planeamiento de servicios públicos y un término usado con frecuencia en la literatura (Walsh S. J. and Page P. H. and Gesler W. M., 1997; Wang Fahui, 2006, 2012), resulta muchas veces un concepto difícil de precisar, y que ha sido definido y operacionalizado de muchas maneras. Por lo que es necesario disponer de una definición clara de esta conceptualización, para a partir de allí identificar la mejor manera de operacionalizar para los propósitos requeridos, dados los insumos/datos disponibles. En nuestro caso estos propósitos son dos. Primero, disponer de un indicador que ayude a bosquejar un diagnóstico del acceso geográfico de la población a los servicios de salud y segundo, mediante el uso de estos datos orientar la toma de decisiones en el planeamiento de los servicios de salud, particularmente en la delimitación de la red de servicios de salud.

El problema de salud materno/neonatal (concretamente la emergencia obstétrica) es uno de los casos paradigmáticos en los cuales la prestación de servicios de salud curativos (en oposición a servicios preventivos) tienen mayor ponderación e impacto en la mejora de la salud poblacional, es decir que las variaciones en la salud materno/neonatal se explican mayoritariamente por diferencias en el acceso/uso de servicios de salud en general y de servicios con capacidad de resolver emergencias obstétricas y neonatales en particular (un gran porcentaje de las complicaciones obstétricas son imprevisibles y cuando ocurren, el

tiempo que demora hasta que éstas se resuelvan son críticos para prevenir la muerte de la madre o el recién nacido) ([Dirección General de Epidemiología, 2003](#)).

Una primera manera tradicional, de abordar el tema del acceso físico a servicios de salud emplea ratios de oferta/demanda (e.g. Número de establecimientos de salud por número de habitantes, número de camas por habitante ó número de médicos por habitante). Un ejemplo concreto del uso de estos indicadores, son los estándares propuestos por el UNICEF <sup>12</sup>, la OMS <sup>13</sup> y la UNFPA <sup>14</sup> (1997) sobre el número mínimo de los establecimientos que cumplen funciones obstétricas básicas debe existir (4 por cada 500,000 habitantes) y funciones obstétricas esenciales (1 por cada 500,000 habitantes) Los centros que cumplen con las funciones obstétricas básicas son llamados COB (Centros Obstétricos Básicos) en nuestra tesis.

Estas cifras son en realidad una valoración de la disponibilidad de la oferta de servicios de salud para la población dentro de regiones geográficas usualmente definidas dentro de límites administrativos y no proveen información sobre la dificultad que tienen las personas para llegar a los servicios. Por ejemplo en un ámbito en particular podría tener el número apropiado de establecimientos para la población existente, sin embargo si el área geográfica es demasiado extensa, con pocas vías de comunicación y con población dispersa, el número de establecimientos podría resultar insuficiente. Otros indicadores que son empleados con frecuencia, con la intención de capturar el factor geográfico de acceso a los servicios, son las medidas de ruralidad ó de densidad poblacional. Estas mediciones suelen emplearse como sustitutos ó medidas indirectas del aislamiento e inaccesibilidad de las poblaciones a vías de comunicación ó a lugares donde se ofertan los servicios, sin embargo resultan ser bastante limitadas como valoraciones del acceso físico, puesto que enmascaran la heterogeneidad de los puntos de demanda (e.g. centros poblados) con respecto a la distancia que los separa de una carretera, de los centros urbanos o de los mismos servicios de salud. Adicionalmente, este tipo de indicadores no toman en cuenta la ubicación de los establecimientos que ofertan servicios o de la infraestructura de transporte existente para trasladarse hacia ellos.

**Tabla 2:** Indicadores y los niveles mínimos aceptables

Indicador	Niveles mínimos aceptables
Cantidad de COE	Por cada 500 000 hab. debería haber:
Instalaciones básicas de COE	Al menos 4 unidades con COE Básicos.
COE Ampliados	Al menos 1 und. con COE Ampliada.
Distribución geográfica de unidades con COE	Se cumple con los niveles mínimos de cantidad de servicios de COE en las zonas subnacionales.
Proporción nacimientos en los servicios básicos y ampliados	Al menos el 15% de todos los nacimientos en la población tienen lugar en los servicios COE Básicos y Ampliado.

La tabla es citada en documentos producidos por Debora Maine ([Deborah Maine and Brown, 1997](#)) y forma parte de los estándares de la OMS. Los COE Básicos son los COB

<sup>12</sup>UNICEF: Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia

<sup>13</sup>OMS: Organización Mundial de la Salud

<sup>14</sup>Fondo de Población de las Naciones Unidas



en la tesis.

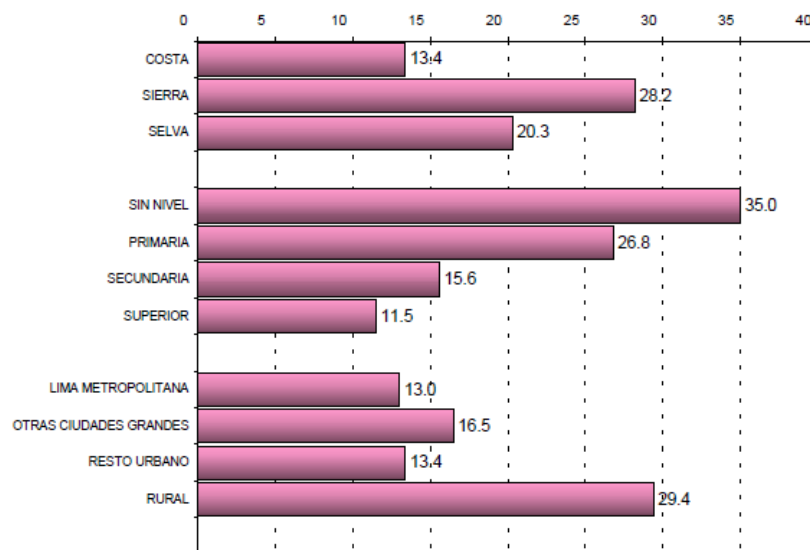
COE básico: Son los cuidados obstétricos esenciales que incluyen tratamiento médico inicial de las complicaciones obstétricas y neonatales (anticonvulsivantes, oxitócicos y antibióticos, reanimación neonatal referencia inmediata), procedimientos manuales (remoción de placenta, reparo de desgarros), parto vaginal asistido, cuidados postparto y postaborto.

COE ampliado: Incluye los cuidados del básico más la posibilidad de realizar cesáreas, anestesia, sangre y/o hemoderivados y manejo de las complicaciones obstétricas.

### **2.6.2. Mortalidad materna e infantil**

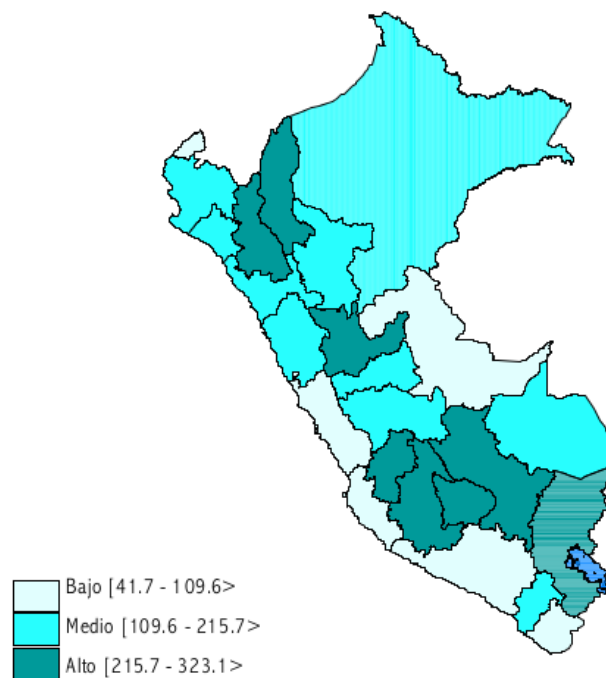
Según la OMS, la muerte materna está definida como la muerte de las mujeres debidas a causas relacionadas con la gestación hasta los 42 días en el postparto. En el mundo se estima que anualmente ocurren más de 500 000 muertes maternas, es decir 1 por minuto. Las complicaciones del embarazo son la primera causa de muerte y morbilidad en las mujeres en edad reproductiva, por encima de la tuberculosis o las enfermedades de transmisión sexual. Actualmente el 99 % de las muertes maternas ocurren en países en vías de desarrollo. La diferencia entre la mortalidad materna entre países desarrollados y en vías de desarrollo puede llegar a ser enorme. Por ejemplo en algunos países africanos la mortalidad materna es cientos de veces más elevada que en países europeos o de Norteamérica. Dentro de cada país la muerte materna se concentra fuertemente en las mujeres más pobres, de zonas rurales, no instruidas, con escasa autonomía y sin acceso a los servicios de salud. Cuando el 90 % de la mortalidad por complicaciones obstétricas podía ser evitada con tecnología disponible desde varias décadas atrás. El reconocimiento de esta realidad condujo a que en 1987, en Nairobi, Kenya se reúnan varias entidades internacionales en lo que se llamó La Iniciativa para una Maternidad Segura. Desde entonces ha habido ya varios acuerdos, planes y programas en diferentes niveles y con el propósito de reducir la mortalidad materna. El trabajo de estos organismos se ha focalizado fundamentalmente en países en vías de desarrollo, en mujeres de estrato socioeconómico bajo y del ámbito rural.

Morbilidad materna grave: Morbilidad grave es aquella que presenta una mujer que casi muere pero sobrevive a una complicación que ocurre durante el embarazo, el parto o dentro de los 42 días de terminado el embarazo. Para el caso el término morbilidad materna grave fue el aprobado por los Cuerpos Directivos de OPS y es sinónimo de morbilidad materna severa, morbilidad materna extrema, morbilidad materna extremadamente.



**Figura 16:** El gráfico de la Dirección General de Epidemiología (DGE) muestra el comportamiento de la mortalidad materna en el país según ámbitos geográficos, nivel educativo y por urbanidad-ruralidad sobre la percepción como problema en el acceso a los servicios de salud el no saber donde ir.

En el Perú fallecen anualmente entre 1500 a 1800 mujeres por problemas relacionados con embarazo, estas muertes cuales ocurren en los departamentos con mayor población en situación de pobreza.



**Figura 17:** Mapa del Perú estratificado por regiones de Razón de Muerte Materna para el año 2010. Fuente: DGE - Perú

### **2.6.3. Las causas directas de la Mortalidad Materna**

Las causas directas de las muertes maternas se deben a las complicaciones del embarazo. Las causas de mayor frecuencia y/o importancia son:

- Hemorragia: anteparto o post-parto
- Parto prolongado/obstruido
- Sepsis postparto
- Complicaciones del aborto
- Preeclampsia/eclampsia
- Embarazo ectópico
- Ruptura uterina.

### **2.6.4. Datos de la Mortalidad Materna según el Sistema de salud de Cusco**

En la Dirección Regional de Salud de Cusco (DIRESA Cusco) se calcula que razón de mortalidad materna en el 2002 fue de 223 por 100 mil nacidos vivos (Análisis de Situación de Salud -ASIS 2003 DIRESA Cusco, fuente Oficina de Estadística e Informática (OEI)-Cusco) y la cobertura de parto institucional para el año periodo 1995-2000 en el ámbito rural del departamento del Cusco fue inferior a 25 % (Encuesta Demográfica y de Salud Familiar ENDES 2000), ocupando el decimoquinto lugar en el ranking nacional de un total de 25 regiones. La proporción de cesáreas en el ámbito rural según los datos de la ENDES 2000 fue de 3.3 %. La proporción de pobres y pobres extremos en el departamento de Cusco en el 2004 fue 53.7 % y 22 % respectivamente (Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI -Compendio Estadístico 2004).

- La Tasa Bruta de Natalidad (TBN) en Cusco para el año quinquenio 2000-2005 es de 25.9 nacimientos por mil habitantes, tasa que ha ido disminuyendo a través de los años y que el INEI proyecta una tendencia decreciente para los próximos quinquenios.
- La Tasa Bruta de Mortalidad (TBM) en Cusco para el quinquenio 2000 - 2005 proyectada por el INEI, nos muestra que el número de fallecidos que en promedio ocurren anualmente es de 9.7 por mil habitantes, y que a nivel nacional se halla ubicado en el cuartil cuarto o percentil 75. La evolución de la Tasa Bruta de Mortalidad y las defunciones promedio anual en lo próximos quinquenios tiende a un comportamiento decreciente, proyectándose así la Tasa Bruta de Mortalidad para el quinquenio 2010-2015 una TBM de 8.4 por mil habitantes.
- A nivel Perú la Tasa Bruta de Mortalidad para el quinquenio 2000 - 2005 es de 6.2 por mil habitantes, siendo el más bajo el indicador del Callao con 3.9 por mil habitantes y el más alto el departamento de Huancavelica con 11.3 por mil habitantes. El sistema de salud peruano está conformado por el sector privado y público, no es diferente en la región de salud 08 Cusco.
- Para el 2006, la DIRESA Cusco <sup>15</sup> tiene registrado 4,605 defunciones; con una Tasa

---

<sup>15</sup>La DIRESA Cusco comprende la misma área que el departamento de Cusco

Bruta de Mortalidad de 3.6 por mil habitantes, lo que evidencia claramente un sub-registro de por lo menos el 50 %.

- La Tasa de Mortalidad Infantil (TMI) en Cusco para el quinquenio 2000–2005 es de 65 por mil nacidos vivos, esta tasa es mayor en niños que en niñas (72 y 58 × 1000 N.V. respectivamente).
- En el año 2006, la Dirección Regional de Salud Cusco, ha registrado un total de 435 defunciones en menores de 1 año, con una tasa de mortalidad infantil de 18.3 por mil nacidos vivos, lo que evidencia un sub-registro de por lo menos del 60 % en el sistema de información existente a nivel regional.
- La Región Cusco, es una de las regiones del país que presenta anualmente una Razón de Mortalidad Materna (RMM) por encima de 150 por 100,000 nacidos vivos, con grandes diferencias provinciales que superan este criterio internacional de identificación de zonas de muy alto riesgo para mortalidad materna; presentándose espacios provinciales con zonas caracterizadas con problemas sociales, económicos, culturales y de accesibilidad a educación y salud. Así tenemos que la Razón de Mortalidad Materna para el 2004 en la Región es de 200 × 100,000 n.v.; mostrándose que desde el 2002 a la fecha existe un estancamiento y estacionariedad de las tendencias de la mortalidad materna, lo que debe ser tomado muy en cuenta en el proceso de priorización y elaboración de planes de intervención.

Los datos reportados han sido tomados del Análisis de Situación de Salud (ASIS) de la Dirección Regional de Salud Cusco.

### **2.6.5. Número de establecimientos de salud y cobertura**

La DIRESA Cusco, cuenta con un total de 304 establecimientos de salud tanto del Ministerio de Salud, ESSALUD, Fuerzas armadas, Fuerzas Policiales y sector privado los que brindan servicios de salud; cifra que equivale a 2.3 establecimientos por cada 10 mil habitantes, indicador muy por debajo del promedio nacional y que resulta insuficiente dado que existen muchos grupos poblacionales (comunidades) con poblaciones menores a 1,000 habitantes las que se hallan muy dispersos, siendo de difícil acceso a un servicio de salud.

## **2.7. Redes de servicios de salud en Cusco**

De acuerdo con Bosque Sendra (1992) Una red espacial es un sistema interconectado de elementos, que forman una estructura espacial por la que pueden pasar flujos de algún tipo: personas, mercancías, energía, información. Por otro lado, de acuerdo con los lineamientos para la conformación de redes (MINSAL, 2001), una red de salud es un “Conjunto de establecimientos y servicios de salud, de diferentes niveles de complejidad y capacidad de resolución, interrelacionados por una red vial y corredores sociales, articulados funcional y administrativamente, cuya combinación de recursos y complementariedad de servicios asegura la provisión y continuidad de un conjunto de atenciones prioritarias de salud, en función de las necesidades de la población”.

De acuerdo con estos lineamientos, para conseguir que el conjunto de establecimientos y servicios funcione como una red, se requiere (1) Acción articulada entre los establecimientos. (2) Combinación adecuada de recursos, complementando servicios básicos con servicios

especializados. (3) Adecuación de los procesos y servicios, buscando la continuidad de los cuidados de salud. (4) Ofrecer mejor acceso a servicios de mayor calidad, al mejorar las capacidades resolutorias del conjunto de los establecimientos de la red. (5) La consecución de economías de escala, concentrando ciertos servicios de alto costo de producción en algunos establecimientos clave dentro de la red, optimizando el gasto en este tipo de recursos.

Se define a la microrred de salud como un conjunto de establecimientos de salud del primer nivel de atención cuya articulación funcional, según criterios de accesibilidad, ámbito geográfico y epidemiológico, facilita la organización de la prestación de servicios de salud, constituyendo una unidad básica de gestión y organización de la prestación de servicios". Las microrredes son entonces subconjuntos de establecimientos de atención primaria, distales dentro de una red de salud, la cual incluye además establecimientos de niveles superiores que son capaces de ofrecer servicios de mayor complejidad. En principio, la conformación de las redes no sigue necesariamente criterios de delimitación político administrativa. La red ordena la oferta de servicios de salud existentes en función del flujo de la demanda y las necesidades de la población. La estructura de la red está constituida por las vías de comunicación cotidianamente utilizadas por la población. En términos abstractos una red corresponde al concepto de grafo, que es una representación abstracta de un conjunto de elementos en la cual algunos pares de elementos se encuentran conectados por relaciones. Los elementos interconectados se denominan nodos, puntos ó vértices, y las relaciones que conectan pares de nodos se denominan arcos ó simplemente líneas. Típicamente un grafo es representado de manera diagramática como conjuntos de puntos para los vértices, unidos por líneas para los arcos. Al momento de concretizar esta abstracción los vértices y los bordes pueden representar cualquier elemento que tengamos interés en estudiar y que se adapte a esta estructura. Por ejemplo, los vértices pueden representar personas y los arcos permiten identificar si dos personas se conocen entre sí. Los arcos también pueden tener dirección. En ese caso nos referiremos a grafos dirigidos y a redes con arcos dirigidos. Un ejemplo de esto último sería por ejemplo un grafo que corresponde a las referencias institucionales de pacientes entre establecimientos de salud.

Entonces podemos redefinir una red de salud, como un sistema interconectado de establecimientos (ubicados espacialmente) que tiene como propósito proveer servicios de salud a la población de una manera eficiente y equitativa. La estructura espacial de esta red de servicios, definida por la separación espacial de los elementos que la conforman (los nodos), resulta un factor determinante de los flujos de usuarios desde los centros poblados a los establecimientos y del flujo de usuarios entre establecimientos de salud y por lo tanto un determinante de la medida en la cual el sistema de salud es capaz de lograr eficiencia y equidad en la provisión de servicios.

# CAPÍTULO 3

---

## Procesos metodológicos

---

*"Las ideas no duran mucho.  
Hay que hacer algo con ellas..".  
Santiago Antúnez de Mayolo  
Matemático peruano*

**Resumen:** El capítulo, aborda el planteamiento del problema, las características del área de estudio, las bases de datos y los procesos metodológicos para la elaboración de la superficie de costo, la construcción de la matriz de distancias y la selección de servicios de salud.

### 3.1. *Area de estudio*

La investigación se desarrolla en el departamento de Cusco - Perú. Por tener un alto número de muertes maternas, neonatales y por ser atendida en su totalidad por el sistema de salud nacional. Su porcentaje de población es mayormente rural, favoreciendo la aplicación del estudio diseñada para ámbitos rurales.

Cusco se sitúa en la parte sureste del país, ocupa un territorio aproximado de 72 mil kilómetros cuadrados que comprende territorios mayormente montañosos. Limita con los departamentos de Junín y Ucayali por el norte, Madre de Dios y Puno por el este, Arequipa por el suroeste y Apurímac, Ayacucho por el oeste. Está conformada por las Provincias de: Acomayo, Anta, Calca, Canas, Canchis, Cusco, Chumbivilcas, Espinar, La Convención, Paruro, Paucartambo, Quispicanchi y Urubamba. Su clima es frío y seco de mayo a diciembre y lluvioso en los meses de enero hasta abril. La temperatura media en la capital es de 12°C siendo la máxima de 18°C y la mínima alrededor de 4°C más o menos, sin embargo la zona correspondiente a la selva amazónica es de clima tropical. La población proyectada para el departamento de Cusco, para junio del 2013, es de 1 300 609 según INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). La mayor concentración poblacional se da, en las provincias de: Cusco 32,7 %, La Convención 14 % y Canchis 8 %.

Departamento de Cusco en números:

Superficie:  $\sim 72\,000\text{ km}^2$

Latitud Sur:  $11^\circ 13' 19''$

Longitud oeste, entre meridianos:  $72^\circ 59' 52''$  y  $73^\circ 57' 45''$

Capital del Departamento: Cusco 3 399 msnm.

Provincias: 13

Distritos: 108

Población total: proyección 2012  $\sim 1\,100\,000$  habitantes

Ruralidad: 80 %

Densidad demográfica:  $\sim 16.3\text{ hab. km}^2$

Centros poblados: 9 703

Establecimientos de salud: 304

Los hospitales: Regional de Cusco, Lorena, Espinar, Quillabamba y Sicuani son los más importantes y de amplio desempeño.



**Figura 18:** Mapa de ubicación del departamento de Cusco y sus departamentos fronterizos

La región Cusco es heredera de una gran riqueza cultural porque fué sede de la civilización Inca que se desarrolló por varios siglos hasta. Muchas ruinas Incas, incluyendo pirámides ceremoniales y fortalezas, permanecen en la región, dando una visión de la cultura y sociedad Inca a los arqueólogos, antropólogos, y turistas. Esta imagen topográfica del sistema ASTER (Radiómetro Espacial Avanzado de Emisión y Reflexión Termal) del satélite Terra de la NASA, capturada el 18 de julio de 2006, muestra la ciudad de Cusco, que está asentada en el valle, rodeada de picos nevados de los Andes. Esta imagen a su vez muestra la accidentada geografía de la región que no es característica única de Cusco

sino que es típica de la región de sierra del país, donde se vuelve más útil una planificación espacial con la consideración del terreno porque una pequeña distancia en el mapa podría significar varios kilómetros de caminata en la realidad, que conforme a la función “distance decay” las poblaciones optarían por acudir a los servicios más cercanos o por no acudir, haciendo más complejo el acceso a los servicios



**Figura 19:** Imagen topográfica del sistema ASTER (Radiómetro Espacial Avanzado de Emisión y Reflexión Termal) del satélite Terra de la NASA, capturada el 18 de julio de 2006



### 3.2. Descripción de la Metodología

Para obtener una solución al problema planteado sobre cuál es el subconjunto de servicios de salud, que distribuidos optimamente en toda la región, permitan atender a los puntos de demanda con pesos poblacionales, en un tiempo menor o igual a 2 horas, tal que se maximice la cobertura poblacional, se aborda con la aplicación de diversas técnicas, entre ellas el uso de herramientas geoespaciales y algoritmos de localización - asignación.

Con el uso de las herramientas geoespaciales se busca la obtención de la **superficie de costo**, que es una cuadrícula georreferenciada (raster en la terminología de SIG) resultante de combinar varias capas temáticas raster y consta de celdas que representan segmentos de territorio cuadrangulares de idéntico tamaño que almacenan valores que representan el costo (nivel de fricción impedancia) expresado en unidades de tiempo, de atravesar cada uno de dichos segmentos, con la que se caracteriza de manera simplificada la heterogeneidad del territorio respecto a la magnitud en la cual éste impide (o facilita) el desplazamiento de las personas, sus valores de impedancia/resistencia, son generados a partir de cinco capas temáticas rasterizadas, las que combinan información del uso de suelo, redes viales, redes hidrográficas, pendientes y precipitación, proveniente de instituciones nacionales e internacionales y asumen una serie de criterios y aplicación de conocimientos a los que se les denomina "los supuestos", que son los que van a modificar la velocidad de movimiento de los individuos, que parten desde un punto inicial hacia otro final. Para establecer el desplazamiento vamos a referirnos a que las personas se movilizan de un punto A hacia B por la ruta más corta o la de menor costo, empleando algoritmo shortest path, desarrollado por Edsger Dijkstra y ampliamente usado en el análisis de redes, el principal producto es la matriz de tiempos/distancias.

La segunda técnica se trata del uso de los modelos de optimización como lo es el modelo de **localización y asignación** que corresponde a los modelos discretos de ubicación de instalaciones (facility location) con la finalidad, que del número total de establecimientos de salud (localizados en el área de estudio) se pueda elegir un reducido número, con los que se maximice la cobertura de la población, para ello hacemos uso del algoritmo denominado Maximal Covering Location Problem MCLP, de un algoritmo de optimización matemática, con el propósito de identificar la solución óptima. Requiere de la especificación previa del número de establecimientos que deben componer la solución del problema. Asimismo se requiere de prolongados tiempos de cómputo para llegar a dicha solución, sin descartar la posibilidad de que existan en algunos casos problemas de convergencia debido a la escala del problema, que contempla grandes volúmenes de datos (cientos de establecimientos y miles de centros poblados en cada región, y cientos de miles a millones de tiempos de viaje entre ellos). Por ello, para abordar este problema desde un punto de vista pragmático, se prefirió utilizar un algoritmo de programación lineal, el cual además de su simplicidad y mejores tiempos de cómputo da como resultado una solución, que no necesariamente es la solución óptima única, pero sí una solución optimizada y posiblemente cercana al valor máximo. Hemos preferido el uso del MCLP por situarse en el nivel intermedio entre máxima eficiencia y máxima equidad debido a que la tesis busca este punto de equilibrio porque el estudio está dirigido a los sistemas públicos de salud, que no sólo se enfoca en el mayor beneficio, como lo haría un estudio dirigido al sector privado, sino que también busca la equidad espacial, de modo tal que el problema de gasto de movilización de los usuarios sea compartida con el estado.

A partir de la matriz de tiempos de desplazamiento desde centros poblados a establecimientos de salud, se efectuó la optimización del acceso físico en base al criterio de la cobertura espacial máxima.

$$v(MCLP) = \text{máx} \left\{ \sum_{i=1}^m f_i x_i \right\} \quad (3.1)$$

Subject to:

$$x_i \leq \sum_{j \in N_i} y_j, \quad i \in I \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (3.3)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, \quad i \in I \quad (3.4)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad j \in J \quad (3.5)$$

Donde:

$I = \{1, 2, \dots, m\}$  Es el conjunto de puntos de demanda (centros poblados),

$J = \{1, 2, \dots, n\}$  Es el conjunto de ubicaciones potencial es para los servicios de Cuidados Básicos Obstétricos (COB)

$N_i = \{j \in J | d_{ij} \leq T\}$  Es el conjunto de servicios que están localizados dentro de un tiempo de viaje crítico  $T$  desde un punto de demanda  $i$

$f_i$  Es la población del punto de demanda  $i$

$d_{ij}$  Es la distancia más corta del tiempo de viaje, desde un punto de demanda  $i$  hacia un servicio  $j$

$T$  Es el tiempo de viaje crítico, a partir de cual el punto de demanda se considera no cubierto.

$p$  Es el número de Cuidados Básicos Obstétricos a ser seleccionados/ubicados.

$x_i, y_j$  son variables de decisión:

$x_i = 1$  si el punto de demanda  $i$  es cubierto ( $x_i = 0$  de lo contrario)

$y_j = 1$  significa que el servicio COB debería se ubicado en el lugar  $j \in J$  ( $y_j = 0$  de lo contrario).

### **3.3. Decisiones para la elaboración de la Superficie de Costo**

La superficie de costo nos brinda información sobre el espacio geográfico que vamos a estudiar, el costo de desplazamiento depende directamente de la magnitud de la fricción, para lograr una superficie de costo razonable, tomando diversas decisiones, que han requerido de tiempo y dedicación, respecto a si debe ser un modelo vectorial o ráster, si debe ser modelo de poblaciones agregadas o desagregadas, el tamaño de la celda, si se es mejor obtener tiempos o distancias y finalmente si este debe ser isotrópico o anisotrópico, fundamentando cada decisión, a continuación se lista las decisiones evaluadas para cada caso y su fundamento.

#### **3.3.1. Modelo rásterizado**

Se ha preferido el modelo ráster en lugar del modelo de redes (network), porque el segundo, permite el movimiento entre nodos conectados, mientras que el modelo ráster no restringe el movimiento a las zonas en las que no se encuentran conectadas a través de las redes viales, lo que hace que en el modelo network las áreas no servidas sean en mayor número que en el modelo raster (Delamater Paul L. and Messina Joseph P. and Shortridge Ashton M. and Grady Sue C., 2012). Tratándose de Cusco una región mayormente rural, en la que no todos los centros poblados están conectados mediante vías y las bases de datos espaciales de redes viáles no necesariamente empalman o se enlazan entre ellas, por la no conectividad real o por error en los datos espaciales, se prefiere aplicar el modelo ráster.

#### **3.3.2. Modelo de poblaciones agregadas**

Sobre la distribución de las poblaciones se emplea la población agrupada (o agregada) a nivel de centros poblados. Dentro del Perú las poblaciones se agrupan en, departamentos (regiones), provincias y distritos.

Como menciona el INEI, centro poblado, es todo lugar del territorio nacional identificado mediante un nombre y habitado con ánimo de permanencia, por lo general, por varias familias o, por excepción, por una sola familia o una sola persona. Las viviendas pueden hallarse agrupadas de manera contigua formando manzanas, calles y plazas, como en el caso de los pueblos y ciudades, semi-dispersos, como una pequeña agrupación de viviendas contiguas, como es el caso de algunos caseríos, rancherías, anexos, etc. o, hallarse totalmente dispersos, como por ejemplo las viviendas de los agricultores en las zonas agropecuarias.

Centro Poblado Mayor, es aquel en donde se encuentra la sede de las autoridades de gobierno (Gobernador y Tenientes Gobernadores), autoridades locales (Alcalde Distrital, Alcaldes de Centros Poblados Menores, Agente Municipal) o comunales (Presidente de la Comunidad Campesina o Nativa). La jurisdicción de un centro poblado mayor puede comprender 1 ó más centros poblados menores.

Centro Poblado Menor, es aquel que se encuentra en el ámbito territorial de la jurisdicción de las autoridades. (Tenientes Gobernadores, Alcaldes Menores, Agente Municipal y Presidente de la Comunidad Campesina o Nativa).

Centro Poblado Rural, es todo centro poblado que no tiene 100 viviendas agrupados contiguamente ni es capital de distrito en el que generalmente las viviendas se encuentran dispersas.

Para el modelo se prefiere trabajar con poblaciones agrupadas porque en el país es la mínima unidad agrupada georreferenciada, salvo algunos polígonos de zonas urbanas de grandes capitales.

### **3.3.3. Resolución espacial del modelo**

Las cuadrículas se trabajaron en un tamaño de celda de 30 metros, este tamaño es adecuado para la caracterización de la zona, es decir brinda tanta información como se pueda detectar en los 30m. Una consideración al decidir la resolución de las cuadrículas fue adoptar un punto medio entre la pérdida de información con tamaños de celda muy grandes y la generación de grandes volúmenes de datos que incrementa los tiempos de cómputo si la celda es muy pequeña (Delamater Paul L. and Messina Joseph P. and Shortridge Ashton M. and Grady Sue C., 2012). Este tamaño de celda es adecuado para la investigación planteada, de ser poco detallada, las estimaciones de tiempo de desplazamiento tendrían poca exactitud y resultarían sesgadas; si por otro lado el tamaño de celdas resultara muy pequeño o detallado, los datos serían grandes y se prolongaría el tiempo de procesamiento.

### **3.3.4. Modelo basado en tiempos**

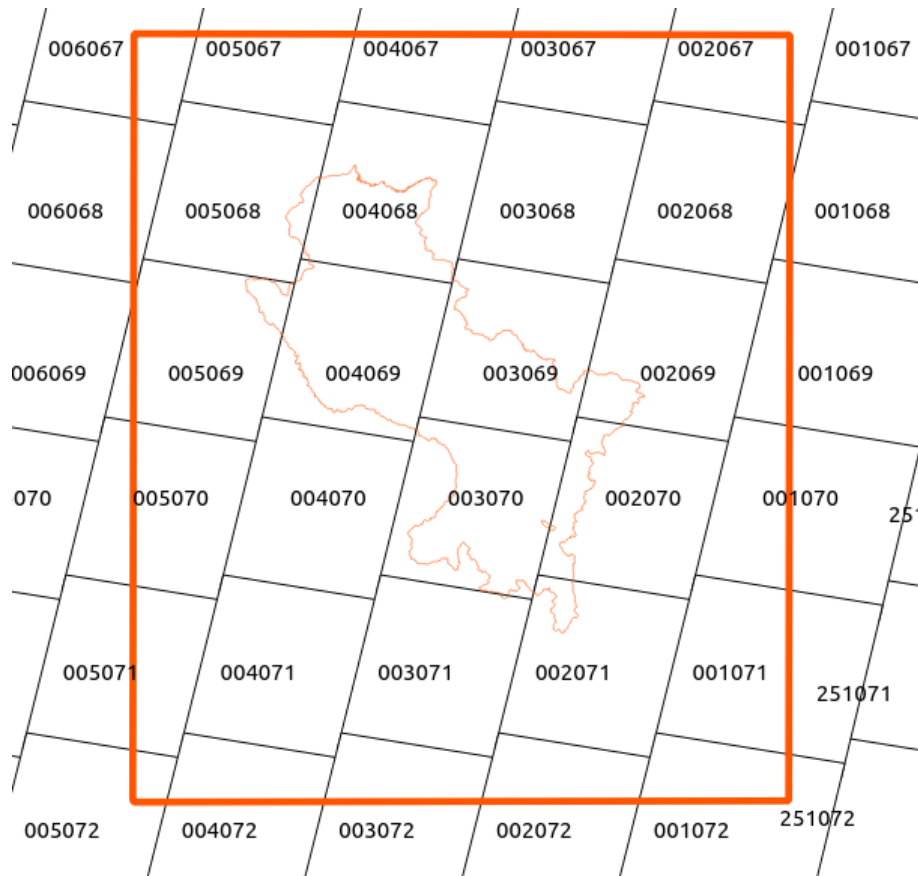
Uno de los procesos que se realiza durante el desarrollo del modelo, es obtener la matriz de distancias, sin embargo, al momento de cargar los datos en la optimización, en lugar del uso de distancias, se ha optado por usar un modelo de tiempos. En general se considera que la toma de decisiones de los individuos asociada al desplazamiento hacia los servicios se relaciona más claramente con los tiempos de viaje que con las distancias hasta el servicio (Handy S L and Niemeier D A, 1997).

### **3.3.5. Modelo isotrópico**

Es sabido que en la realidad el tiempo de caminar en un pendiente de ángulo positivo es diferente a que si lo hacemos en una pendiente negativa, para fines de cálculo se ha optado por trabajar bajo un modelo isotrópico en lugar de un modelo anisotrópico, hecho que facilita el procesamiento y el tiempo de dedicación en la obtención del producto final. Sin embargo, cabe destacar que las decisiones pueden ser cambiadas o mejoradas a criterio en caso de replica de los procesos.

## **3.4. Metodología para la superficie de costo**

El diseño de la superficie de costo, parte con las decisiones que se toman para la construcción del modelo, para dar paso a la búsqueda de información de las capas temáticas que serán empleadas, de área que cubra el total de la extensión del departamento de Cusco y un poco más.



**Figura 20:** Cuadrículas de LandSat de 30m. que recubren una área más extensa que el departamento de Cusco, los valores indican el Path y el Row, para recubrir el área de estudio se necesitan 13 escenas, que se han descargado en reiteradas oportunidades hasta conseguir un resultado óptimo

### 3.4.1. Bases de datos empleadas

Las bases de datos, empleadas para la construcción de la superficie de costo, son cinco. Las fuentes primarias se encuentran en formato vectorial y ráster, para el modelo las bases de datos espaciales han sido rasterizadas. La proyección empleada para los datos espaciales es UTM y su datum WGS84. La tabla 3, resume que insumos son espaciales o no espaciales.

**Tabla 3:** Bases de datos espaciales para la construcción de la Superficie de Costo

Información	Tipo de información	Bases de datos	Origen
Red Vial	Vector multilíneas	Base de datos espacial	IGN
Red Hidrográfica	Vector multilíneas	Base de datos espacial	IGN
Landcover	Ráster	Base de datos espacial	Tsinghua
Pluviosidad	Ráster	Base de datos espacial	TRMM
DEM	Ráster	Base de datos tabular	Combinado

#### ■ **Red Vial.**

El Perú cuenta con un sistema de transporte, terrestre básicamente a través de carreteras, las cuales conectan a todas las capitales de departamento y la mayoría de las capitales de provincia, la panamericana conecta al país de norte a sur; sin embargo, existen zonas y poblados bastante aislados del territorio que aún no se han podido conectar entre ellas a través de redes viales, o la conexión es aún precaria. La red vial en formato digital ha sido obtenida del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC), actualizadas al 2013. El MTC (Ministerio de Transporte y Comunicaciones). Esta información de la red vial ha sido tabulada en 5 categorías por el MTC, y en 4 categorías de acuerdo con el estado de la vía:

#### Superficie de vía:

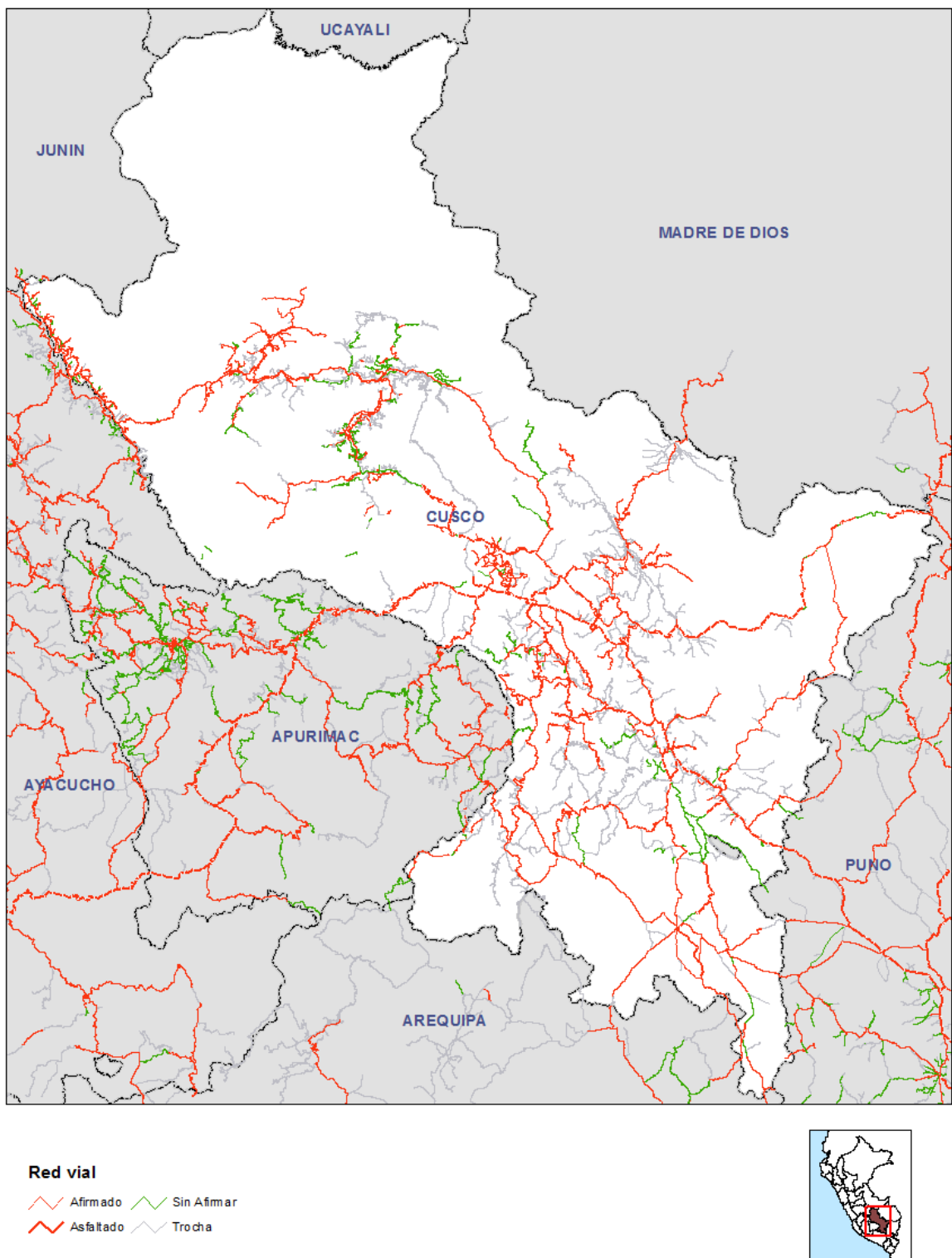
- Afirmado
- Asfaltado
- Proyectado
- Sin afirmar
- Trocha

#### Estado de las vías:

- Bueno
- Malo
- Muy malo
- Regular

#### ■ **Red hidrográfica:**

La capa vectorial de ríos con la que se ha desarrollado la tesis ha sido levantada a partir de las hojas cartográficas 1 : 100 000 del IGN, los datos hidrográficos no registran ninguna información adicional, además del ID, sin embargo para el modelo han sido categorizadas de acuerdo con sus velocidades



**Figura 21:** La red vial de la región Cusco, no se dibuja la categoría en proyecto porque todavía es inexistente

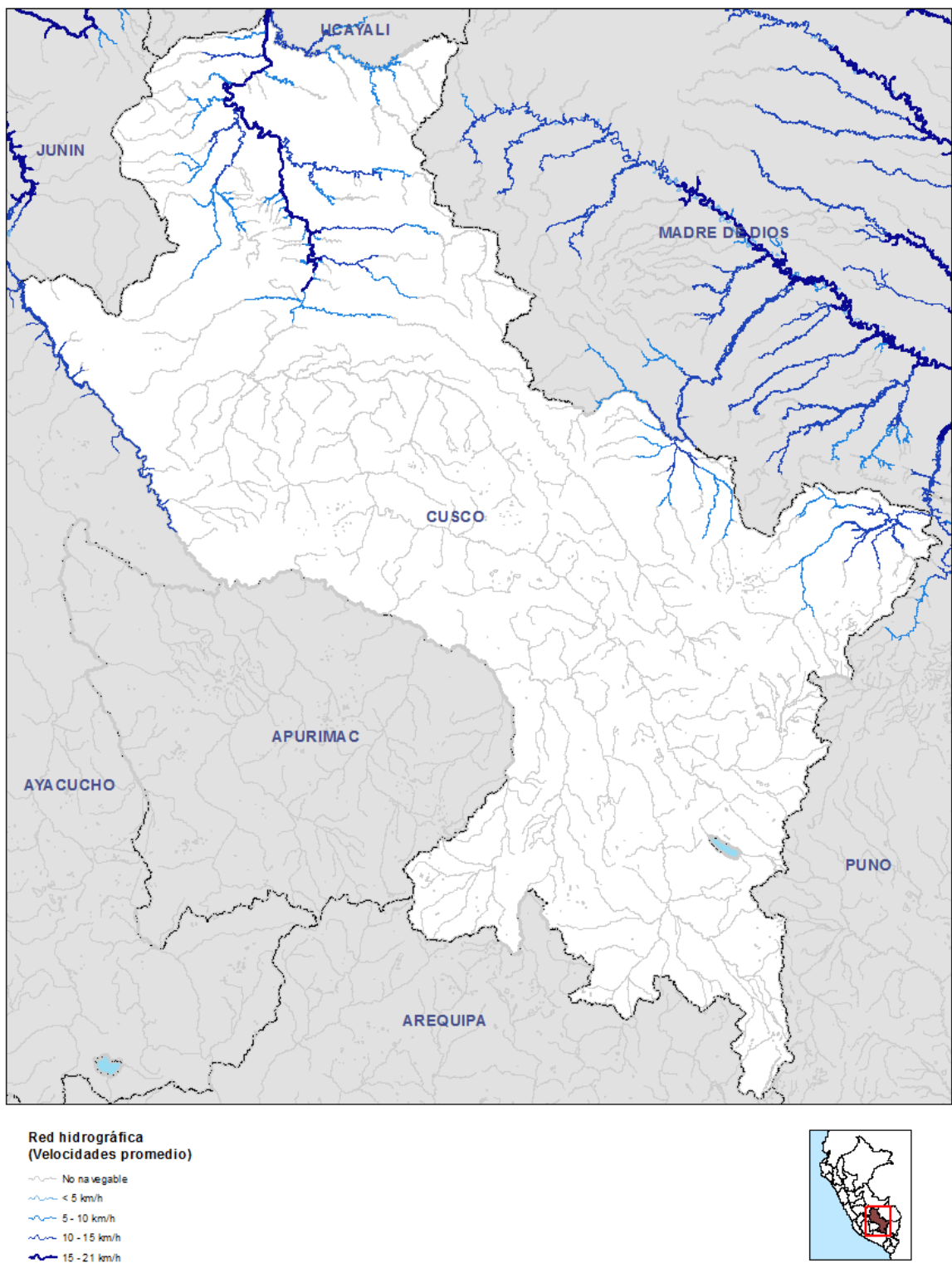


Figura 22: La red hidrográfica de la región Cusco



- **LandCover:**

El Landcover usado para la tesis ha sido descargado desde [tsinghua data](#), es una publicación realizada por el equipo de ([Peng Gong, 2013](#)). Viene a ser el primer LandCover de 30m. de resolución de la cubierta terrestre utilizando LandSat *Thematic Mapper* (TM) y *Enhanced Thematic Mapper* además de (ETM + Datos). En este trabajo se han clasificado más de 6.600 escenas de los datos Landsat TM a partir del 2006 , y más de 2300 escenas de Landsat TM y ETM + datos antes de 2006 , todos los seleccionados a partir de la temporada verde. Estas imágenes cubren la mayor parte de la superficie terrestre del mundo excepto en la Antártida y Groenlandia. Para la clasificación se emplearon cuatro clasificadores que eran libremente disponibles, incluyendo el clasificador de máxima verosimilitud convencional (MLC), clasificador de árbol de decisiones, clasificadores de conjunto como Random Forest (RF)<sup>16</sup>, máquinas de soporte vectorial o máquinas de vectores de soporte clasificador (SVM)<sup>17</sup>. Se ha descargado en total 3 versiones, la primera en julio del 2013, la segunda en diciembre de 2013 y finalmente con la que se ha procesado la superficie de costo, la que fue descargada en febrero de 2014. En cada descarga se observó una mejora del producto. Previamente a este proceso, en el año 2013, se elaboró un LandCover con LandSat8 y Landsat7, para lo ello se generó un algoritmo implementado en IDL, para optimizar los procesos. Sin embargo, el resultado no fué del todo satisfactorio por la gran cantidad de nubes con la que estaban cubiertas las imágenes en la zona este de Cusco. Por este motivo se optó por usar el producto de [tsinghua data](#).

- **Precipitación:**

Se utilizó los datos de la precipitación total anual en América del Sur desarrollado por TRMM que , es una misión conjunta entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial del Japón ( JAXA ) diseñado para monitorear y estudiar la precipitación tropical, a pesar que en un inicio se planteó la posibilidad de dividir en dos momentos la precipitación (época de invierno y época de verano) lo que daría mayor complejidad al modelo. Finalmente se usó el dato anual TRMM 2B31 que es el promedio de 12 años de precipitación (1998 al 2009).

- **Modelo Digital de Elevación, MDE, DEM:**

El MDE es una estructura de datos numérica que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno ([Felicísimo A. M., 1994b](#)), también ver el [MDT](#) en el glosario de la tesis.

---

<sup>16</sup>Random Forest: Es una combinación de árboles predictores tal que cada árbol depende de los valores de un vector aleatorio probado independientemente y con la misma distribución para cada uno de estos. Es una modificación sustancial de bagging que construye una larga colección de árboles no correlacionados y luego los promedia.

<sup>17</sup>Clasificador SVM: Este método está propiamente relacionado con problemas de clasificación y regresión. Dado un conjunto de ejemplos de entrenamiento (de muestras) se puede etiquetar las clases y entrenar una SVM para construir un modelo que prediga la clase de una nueva muestra. Intuitivamente, una SVM es un modelo que representa a los puntos de muestra en el espacio, separando las clases por un espacio lo más amplio posible. Cuando las nuevas muestras se ponen en correspondencia con dicho modelo, en función de su proximidad pueden ser clasificadas a una u otra clase.

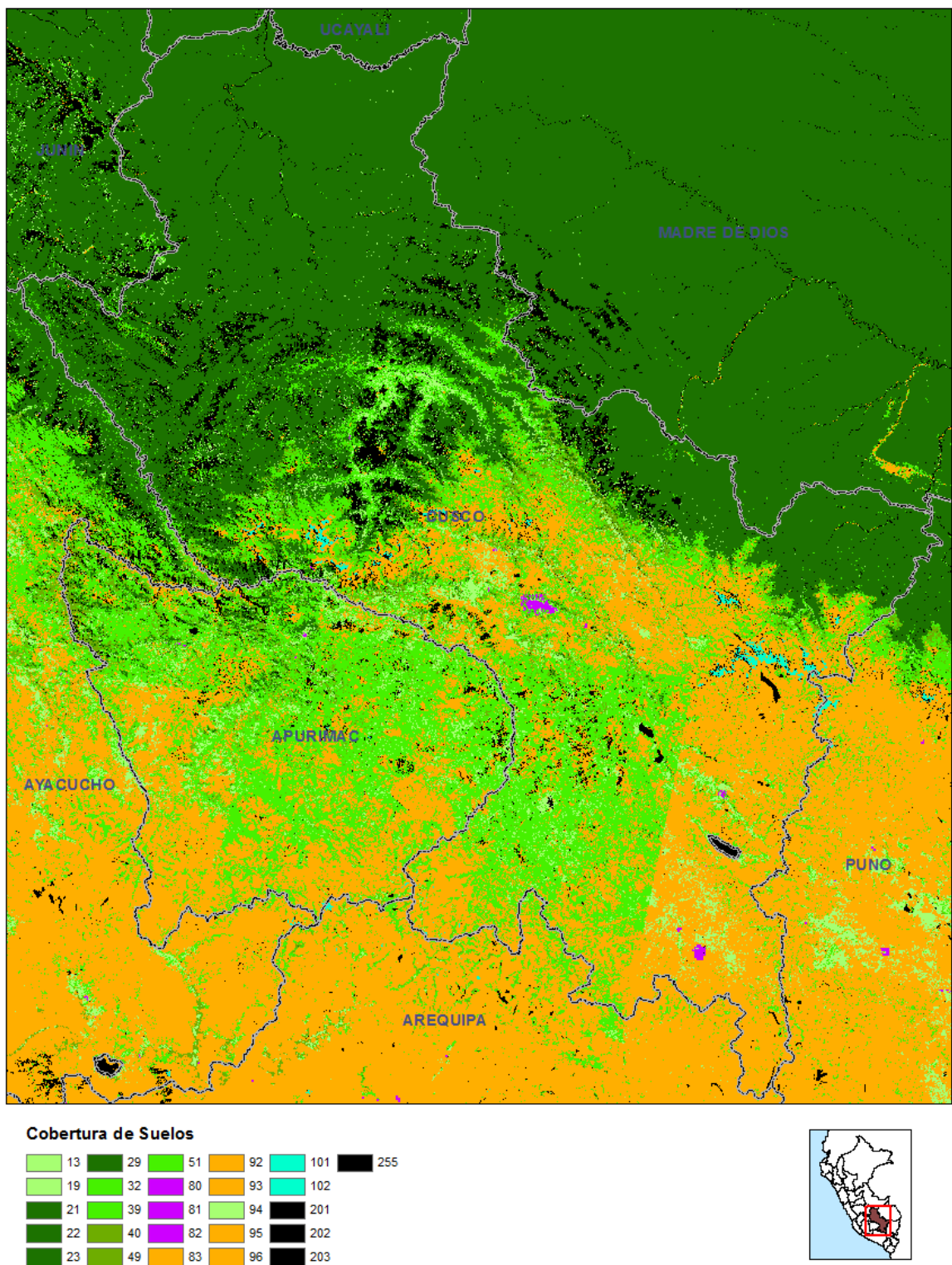
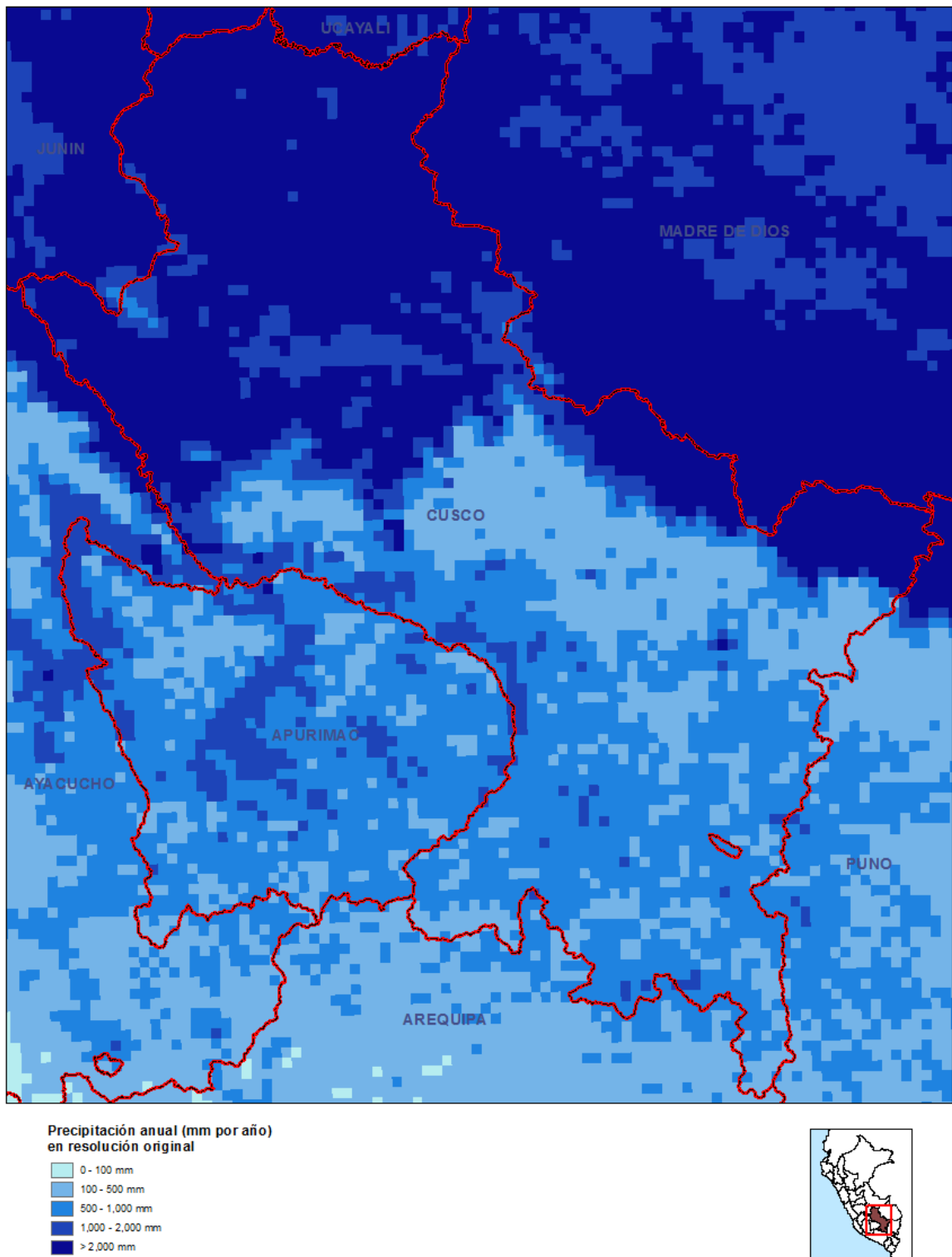
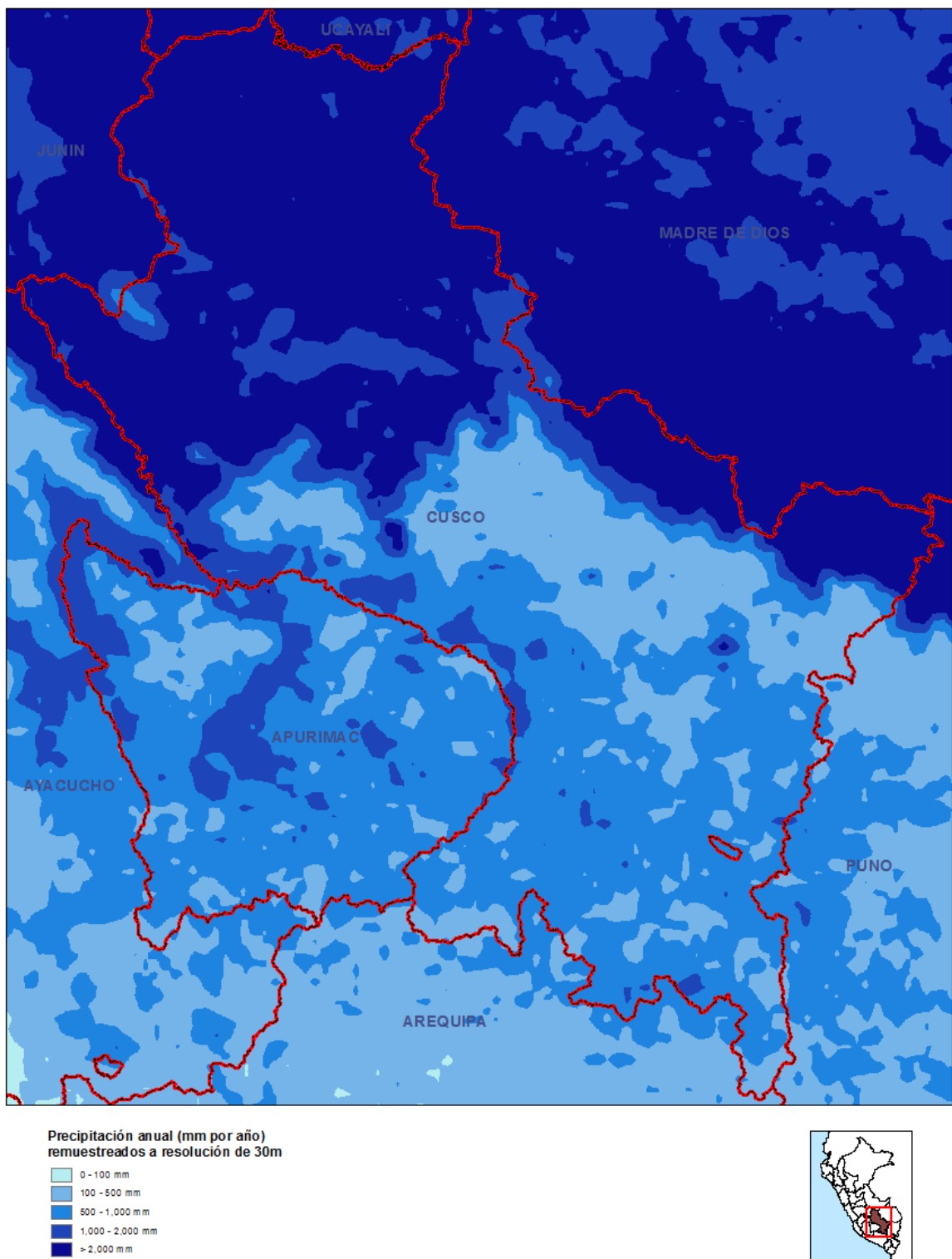


Figura 23: Landcover de la región Cusco



**Figura 24:** Ráster de la precipitación de la región Cusco, de alta resolución de la distribución espacio-temporal de la estacionalidad de precipitaciones y los fenómenos extremos sobre la base de una serie de tiempo TRMM de 12 años, Bookhagen, B.



**Figura 25:** Ráster de la precipitación de la región Cusco

Para el modelo se ha realizado un pre-procesamiento del DEM, que viene a ser el resultado de una combinación de productos entre el ASTER GDEM, el SRTM y las curvas de nivel, siendo el ASTER GDEM la base principal del producto:

- ASTER GDEM Ver.2 <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/4.html> tiene una cobertura global de (83N y los 83S) en coordenadas UTM, ha sido producido en cooperación del equipo de ciencia Japan-US ASTER, usando los datos ASTER, que han sido adquiridos desde el inicio de la observación hasta finales de agosto del 2010 y ha sido puesto a disposición de los usuarios en octubre del 2011. El tamaño de la celda es de 1 arcosegundo (30m x 30m) y el área de cobertura de (60km x 60 km). Se ha empleado la *Interferometría* para su elaboración. Sin embargo, los ASTER DEMs, generalmente tienen algunos defectos, tales como: Error de elevación relativa, para puntos de referencia y escalas verticales, valores vacíos en (cuerpos de agua, nieve/hielo y nubes), además de algunos artefactos como picos o profundidades no existentes en la realidad

Para la corrección de estos errores se ha empleado el SRTM y las curvas de nivel. Siendo que el SRTM tiene varios años de lanzado y la versión 2 es una versión mejorada del modelo permite disminuir el error en los valores del terreno, por lo que se ha optado por compararlos, el GDEM versus el SRTM y el SRTM versus las curvas de nivel, el algoritmo empleado busca la diferencia en primera instancia entre el GDEM y el SRTM sea positiva o negativa mayor de 200m de diferencia, en los lugares donde existe esta diferencia se coloca el valor del SRTM, y si el SRTM y las curvas de nivel tienen una diferencia positiva o negativa de mayor de 200m, entonces el algoritmo reemplazará el valor de la celda por el de la curva de nivel.

- SRTM *Shuttle Radar Topography Mission*, modelo actualizado con la metodología del CGIAR3 descargado de <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/> es un proyecto internacional liderado por la Agencia National Geospatial-Intelligence (NGA) y la Aeronáutica y el Espacio (NASA). La versión 2 es el resultado de un esfuerzo sustancial de edición por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial y exhibe cuerpos y las costas de agua bien definidos y la ausencia de picos y pozos (errores de un solo píxel), aunque algunas áreas de datos carecen de información. El tamaño de la celda es de 3 arcosegundos (90m x 90m) y el área de cobertura es de (60km x 60 km).
- Curvas de nivel o isohipsas de cada 50m. el MDT está constituido por el conjunto de las curvas de nivel que pasan por la zona representada, separadas generalmente por intervalos de 50m de altitud, proveniente del Instituto Geográfico Nacional (IGN), las curvas han sido digitalizadas de las cartas nacionales. La interpolación se ha realizado con la técnica de la triangulación TIN. se compone de un conjunto de triángulos irregulares adosados y que suele identificarse por las siglas de su denominación inglesa: *triangulated irregular network*, TIN (Peucker et al 1978). Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, y se adosan sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve. Se trata de una estructura en la que el terreno queda representado por el conjunto de superficies planas que se ajustan a un conjunto previo de puntos.

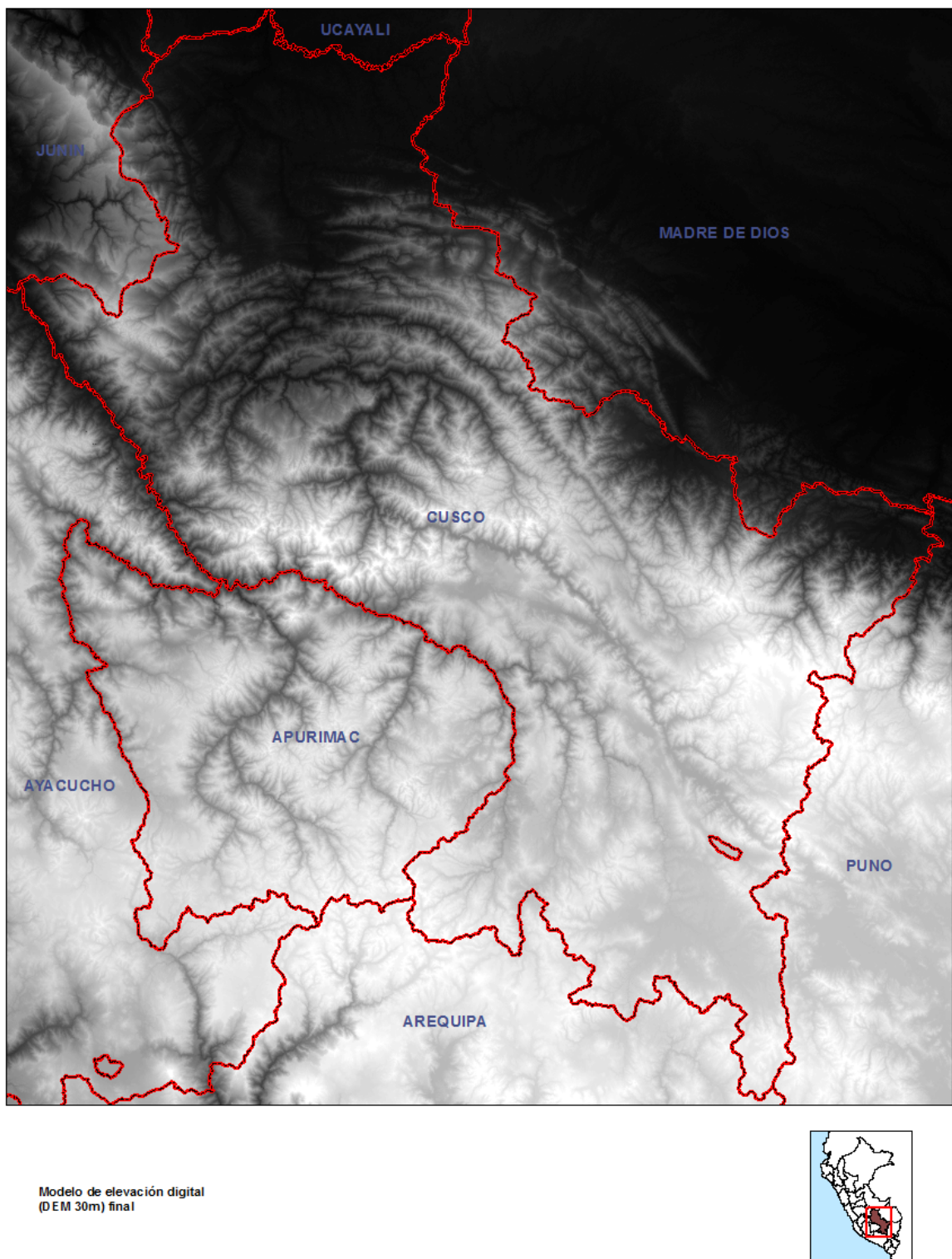
Algoritmo empleado para la corrección del ASTER GDEM

```
IF Abs (ASTER.value - SRTM.value)<100 THEN ASTER.value  
ELSE SRTM.value  
END
```

**3.4.2. Calidad de los datos**

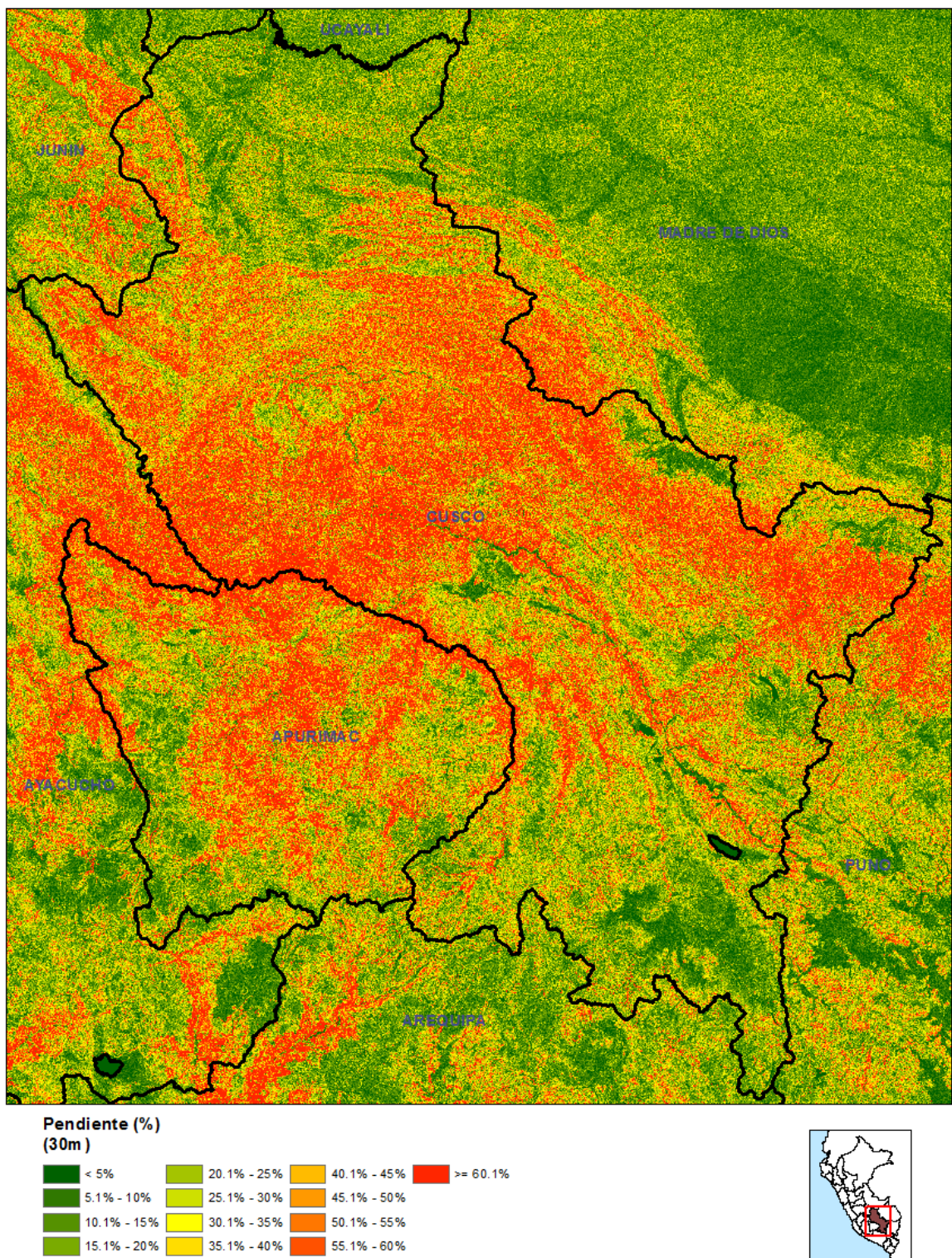
Abordar el tema de la calidad de datos y su disponibilidad es sin duda uno de los pendientes que tiene el país en temas geográficos, durante el proceso de desarrollo de la tesis se ha evidenciado errores en la localización geográfica tanto de servicios de salud como de la infraestructura vial, motivo por el cual se ha realizado un mínimo de correcciones que se han previamente al ingreso de las capas temáticas como parte del insumo del modelo, sin embargo, se reconoce que el proceso demanda una revisión exhaustiva y rigurosa con la finalidad de mejorar la calidad de los datos geoespaciales que posee el estado peruano.





**Figura 26:** DEM de la región Cusco, procesado a partir del uso del GDEM, SRTM y las curvas de nivel.





**Figura 27:** Slope de la región Cusco, de 30 metros de resolución espacial



### 3.5. Los supuestos

Una labor posterior a completar las bases de datos que se han empleado, surge la necesidad de indicar de que modo va a afectar cada elemento en la distancia/tiempo de arribo del punto A de inicio hacia el punto B de destino. Es decir surge la necesidad de plantear los supuestos que serán convertidos en funciones matemáticas, es una etapa que ha demandado la aproximación a documentos técnicos que hayan abordado el desarrollo de superficies de costo, los documentos que han sido insumo iniciales son (Black et al., 2004; Ray Nicolas and Ebener Steeve, 2008), también ha sido necesario recurrir a los conocimientos de profesionales que aporten en esta etapa, entre ellos destaca los aportes y los escritos del Dr. Walter Valdivia, quien lleva varios años trabajando en el tema.

Definido el íntegro de los supuestos se ha ido procesando cada una de las capas con sus funciones matemáticas, estas funciones cumplen el papel de acercar el modelo a la realidad.

#### 3.5.1. Red vial

Las velocidades del transporte por carretera se definieron de acuerdo a los siguientes atributos de las vías: Tipo de carretera, superficie de rodadura y estado de la carretera. Además de la sinuosidad, que permite penalizar la velocidad en segmentos de carretera más tortuosos (mayores curvas). como se muestra en la tabla 4. Asimismo, se espera que la sinuosidad afecte con mayor intensidad a las vías de transporte de mayor velocidad. Las funciones por las cuales la sinuosidad afecta el desplazamiento  $x$  carretera son:

**Tabla 4:** Tabla de velocidades según tipo de carretera

Tipo de Carretera (Superficie de rodadura)	Velocidad de transporte (Km/h)
Carretera asfaltada	80
Carretera no asfaltada	40
Trocha	25

#### 3.5.2. Red hidrográfica

Las masas de agua no navegables se consideran una barrera, por ello se les aplica una velocidad de desplazamiento pequeña. El rango de velocidades elegidas para el transporte fluvial se estableció entre 7 y 35 km/h.

### 3.5.3. Landcover

**Tabla 5:** Velocidades de transporte de acuerdo con el tipo cobertura de suelos

Tipo de Cobertura	Velocidades de transporte (Km/h)
Zona Urbana	30
Masas de agua no navegables	0.06
Vegetación de baja densidad	5
Vegetación de densidad intermedia	4
Vegetación densa	3
Desierto	5.5

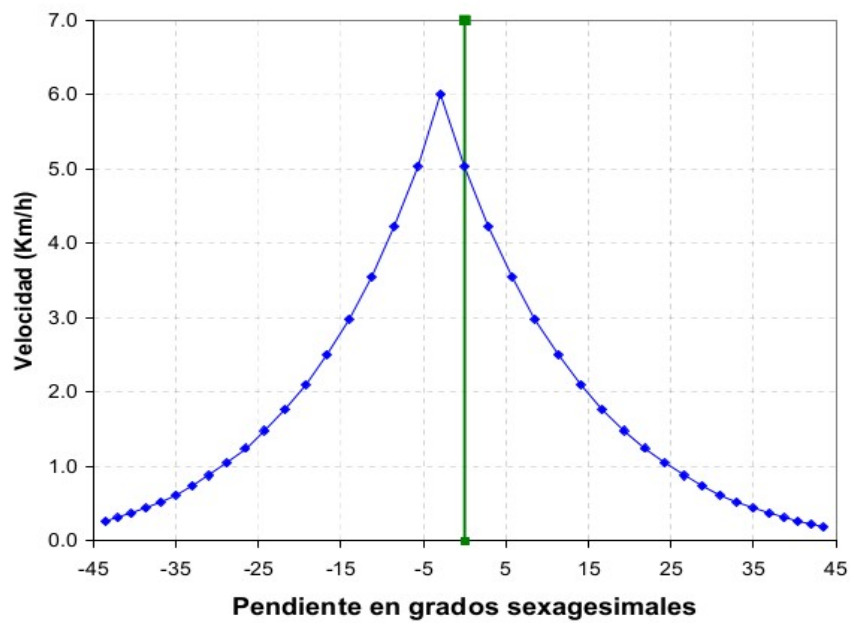
### 3.5.4. Cuadrícula Pluviosidad

Los valores de celda representando la precipitación promedio de los valores anuales para los años 1981 – 1990. Los datos originales corresponden a América del sur y tienen una resolución de 30 minutos (Aprox. 60x60 Km<sup>2</sup>). Los valores de precipitación anual sobre el territorio nacional observados van desde 0 hasta 3242 mm.

- Vías Asfaltadas:  $-0.00459 \times [\text{Precipitación anual}] \times 100 \%$
- Vías Afirmadas:  $-0.00816 \times [\text{Precipitación anual}] \times 100 \%$
- Trochas carrozables:  $-0.01613 \times [\text{Precipitación anual}] \times 100 \%$
- Transporte pedestre:  $-0.00816 \times [\text{Precipitación anual}] \times 100 \%$

### 3.5.5. Modelo Digital de Terreno, MDE, MDT, DEM

El modelo de elevación digital se transforma en un mapa de pendientes y se asume que el grado de inclinación del terreno reduce la velocidad de desplazamiento a pie de acuerdo con la fórmula de Waldo Tobler (1993) *Tobler's hiking function*, que es una función exponencial que determina la velocidad de caminata dependiendo de la pendiente. Según la fórmula, cuando la pendientes es cero grados, la velocidad es cercana 5km/hr, mientras que cuando la pendiente es 10 la velocidad es cercana a 3km/hr y con pendiente -10 es cercana a 4km/hr. Dado que el modelo propuesto es isotrópico, se emplea el promedio de las velocidades estimadas para trayectos cuesta arriba y cuesta abajo.



**Figura 28:** Superficie de impedancias generada a partir de las capas temáticas y la metodología propuesta.

$$V = 6e^{-3.5\left|\frac{dh}{dx}+0.05\right|} \quad (3.6)$$

Pendiente:

La pendiente se calcula con la siguiente fórmula:

$$\frac{dh}{dx} = \tan \theta \quad (3.7)$$

Donde:

dh - Diferencia de la elevación

ds - Diferencia de distancia

$\theta$  - Angulo de la pendiente (inclinacion)

**Tabla 6:** Estratos y sus valores de impedancia

Pendiente en grados	Valor de la impedancia
Pendiente de 0 – 5 %	Impedancia 1.0
Pendiente de 5 – 10 %	Impedancia 1.5
Pendiente de 10 – 15 %	Impedancia 2.0
Pendiente de 15 – 25 %	Impedancia 3.0
Pendiente de 25 – 35 %	Impedancia 4.0
Pendiente de 35 – 45 %	Impedancia 5.0
Pendiente > 45 %	ND

ND: No data, barreras absolutas en el modelo, se asume que las personas no elegirán las rutas con pendientes mayores a 45 grados.

La impedancia para el primer estrato (pendiente 0-5 %, considerada como superficie plana) tiene valor de uno, lo que significa que los territorios representados con este atributo no tienen restricción en el desplazamiento. Los valores restantes (1.5 a 5.0) significan que el desplazamiento por estos territorios tienen crecientes niveles de penalización. Por ejemplo atravesar los segmentos de territorio con pendientes entre 35 % y 45 % demandan 5 veces el esfuerzo que atravesar una superficie llana. De este modo 1 kilómetro en pendientes 35 % a 45 % equivale a 5 kilómetros en el llano. Las pendientes superiores a 45 % son consideradas barreras absolutas las que están clasificadas como (No Data)

### **3.6. Procesamiento para la obtención de la superficie de costo**

Tomadas las decisiones declaradas en los supuestos, definidas las bases de datos, se procesan cada una de las capas temáticas bajo las operaciones de álgebra de mapas donde la resolución espacial es de 30m, que abarcan al área de estudio. En un primer paso se transforma las coberturas vectoriales a ráster. Los supuestos que se convierten en efecto de la distancia hacia los cuidados de salud (Anja et al., 2011; Annis S., 1981; Antonio, G., Steven, Catherine and Matthew, 2010; Antonio, Ruben, Steven, Catherine and Matthew, 2010).

Los supuestos se empiezan a aplicar dentro de los SIG, partiendo desde la cobertura que corresponde a la red vial, debido a que si existe una red de caminos que son viajados en automóvil, este modo de viaje será preferido, porque se asume que sería el primer medio de transporte para movilizarse, es decir que donde hay vías hay capacidad de movimiento y de flujo vehicular.

- Vectores de carreteras del Ministerio de Transportes del Perú.  
Se calcula la sinuosidad para cada segmento de 3 kilómetros de carretera está definida como la razón entre la longitud y la distancia lineal entre sus extremos, luego se opera sinuosidad con la la función velocidad de carreteras y se obtiene el ráster de velocidad modificada por la sinuosidad, se realiza la función precipitación y se obtiene un ráster de velocidad modificada por la sinuosidad y la precipitación, finalmente se ejecuta la función pendiente un ráster de velocidad modificada por la sinuosidad, la precipitación y la pendiente.

- Cuadrícula de pluviosidad. de TRMM  
Se interpola y entra como una función que modifica a la velocidad de transporte.
- Con el DEM (Modelo de Elevación Digital), se genera un mapa de pendientes, de acuerdo con la tabla 4.
- Cuadrícula de cobertura de suelos.  
A partir de las escenas descargadas de tshingua data, se reclasifica a 6 clases, se genera el mosaico para la región Cusco y se opera de acuerdo con su supuesto la función de Tobler, para luego intervenir en la función velocidad modificada por la pendiente.
- Cuadrícula de Ríos, se rasteriza, opera para obtener las velocidades de navegación, que reemplaza a los valores de las vías en caso de existir ríos navegables.

Bajo los supuestos establecidos, Las cuadrículas se combinan empleando en una cuadrícula de velocidades de desplazamiento. Posteriormente, a partir de la superficie de velocidades, y tomando en cuenta el tamaño de las celdas, se obtiene finalmente la superficie de costo.

### 3.6.1. Cálculo de los caminos mínimos (*shortest path*)

Obtenida la superficie de costo, se prepara la información para obtener el cálculo de las rutas más cortas entre los centros poblados y los establecimientos de salud. Se ha decidido resolver este problema utilizando el algoritmo de Dijkstra, algoritmo iterativo que debe ejecutarse para todos y cada uno de los nodos de la red. Este algoritmo funciona asignando un indicador de la distancia del nodo origen al nodo en cuestión. Así, se hace una partición de la red: Se crea un conjunto de nodos con indicador permanente (conjunto P) y un conjunto de nodos con indicador tentativo (conjunto T), es decir, un conjunto de nodos cuyo indicador puede cambiar en las siguientes iteraciones (Ahuja R. K., Magnanti T. L., Orlin J. B., 1993; Hu T.C., 1982).

Para el cálculo mínimo del costo acumulado entre dos puntos se ha usado el algoritmo (*shortest path*) de Dijkstra, implementado en el módulo r.cost del GRASS.<sup>18</sup>

Considerandos:

- $d_{ij}$  distancia del enlace entre dos nodos  $i$  y  $j$  contiguos. Si no existe enlace entre dichos nodos, su valor será infinito. Si  $i$  es igual a  $j$  (se trata del mismo nodo), esta distancia será nula.
- Para un nodo  $s$ , calcula el camino más corto con origen  $s$  y destino el resto de los nodos de la red (árbol de divergencia)
- $D_i$  es la distancia del camino que va de nodo  $s$  al nodo  $i$ .  $D_{ij} = D[i, j]$  es la distancia entre dos nodos no contiguos.
- P es el conjunto de los nodos que tienen una etiqueta de distancia ( $D_i$ ) que es permanente.  $P[i, j] = (K_1 = i, \dots, K_n = j)$

<sup>18</sup>GRASS es un software SIG bajo licencia GPL. Puede soportar información tanto raster como vectorial y posee herramientas de procesamiento digital de imágenes.

- T es el conjunto de los nodos que no están en P.

### 3.6.2. Insumos del (*shortest path*)

Los insumos para la obtención de la ruta más son: (a) la superficie de costo (b) los establecimientos de salud como puntos y (c) los centros poblados.

- **Superficie de costo**

Descrita anteriormente, el tamaño de celda o grilla es de 30m.

Un total de 9.703 centros poblados de Cuscos, están georreferenciados de manera puntual. La base de datos, corresponde a los registros del INEI del Censo de población y vivienda 2007.

- **Establecimientos de Salud:**

Puntos georreferenciados por MINSA. Contiene además información sobre el nombre del servicio, tipo de establecimiento, departamento, provincia, distrito, ubigeo, DIRESA (Dirección Regional de Salud), Red, Microred y otros campos, actualizados junio del 2013.

### 3.6.3. Procesamiento del (*shortest path*)

Se empleó el algoritmo de SIG para crear superficies (rasters) con los tiempos acumulados de desplazarse sobre las celdas de la superficie de costo, siguiendo la ruta de menor costo (Shortest path algorithm) desde cualquier punto de la superficie, hasta la ubicación de cada uno de los establecimientos de salud. Este proceso se desarrolló en el GRASS 6.4 con el uso del módulo r.cost, donde la estimación del tiempo de desplazamiento entre pares de puntos es la suma de los tiempos de desplazamiento de todas las celdas que conforman dicho camino y cada celda almacena el tiempo que demora trasladarse, por la ruta más corta. El producto es un raster, en el que cada celda contiene el menor costo total de atravesar el espacio entre cada rejilla y los puntos especificados, los costes de las diagonales se multiplican por un factor que depende de celda, el proceso interno del cálculo está descrito en el manual del software Geographic Resources Analysis Support System (GRASS).



**Figura 29:** La imagen muestra los caminos con un corte de 2 horas, la gráfica varía de acuerdo con los puntos de corte establecidos.

#### **3.6.4. Insumos para la matriz de distancias**

Los insumos para la obtención de la ruta más son: (a) la superficie de costo (b) los establecimientos de salud como puntos y (c) los centros poblados.

- **Superficie de costo**

Se trata de una matriz con valores en cada celda, estos valores representa el costo de atravesar la celda, de una resolución espacial de 30m.

- **Centros Poblados:**

Un total de 9.703 centros poblados de Cuscos, están georreferenciados de manera puntual. La base de datos, corresponde a los registros del INEI del Censo de población y vivienda 2007.

- **Establecimientos de Salud:**

Puntos georreferenciados por el Ministerio de Salud (MINSa). Contiene además información sobre el nombre del servicio, tipo de establecimiento, departamento, provincia, distrito, ubigeo, DIRESA (Dirección de Salud), Red, Microrred y otros campos, actualizados junio del 2013.

#### **3.6.5. Cálculo de la matriz de tiempos**

Para la construcción de esta matriz se emplearon algoritmos de SIG para crear superficies (rasters) con los tiempos acumulados de desplazarse sobre las celdas de la superficie de

costo, siguiendo la ruta de menor costo desde cualquier punto de la superficie (incluyendo la ubicación de los centros poblados) hasta la ubicación de cada uno de los establecimientos de salud. Por ejemplo, si el camino más corto para trasladarse desde un centro poblado A hacia un establecimiento B es a través de una determinada hilera de celdas contiguas, la estimación del tiempo de desplazamiento entre los puntos A y B será la suma de los tiempos de desplazamiento de todas las celdas que conforman dicho camino. Cada celda de estas nuevas cuadrículas almacena el tiempo que demora trasladarse, por la ruta de menor fricción, desde cada celda hasta el punto previamente seleccionado como destino que corresponde a la ubicación de un establecimiento de salud. Este procedimiento se repite varias veces, modificando en cada vez el punto de destino, hasta obtener superficies de costo acumulado para cada uno establecimientos.

Luego de los procesos `r.cost` se genera una matriz<sup>19</sup> de distancias/tiempos, cuyos elementos representan las distancias entre los centros poblados y los establecimientos de salud más cercanos. Se trata, por lo tanto, de una matriz simétrica de tamaño  $N \times N$  o asimétrica  $M \times N$ , conteniendo números reales no negativos como elementos, que indica el valor desde la celda en la que se ubica el centro poblado hasta el punto (servicio) previamente seleccionado. Este procedimiento se repite varias veces, modificando en cada vez el punto de destino (el establecimiento de salud), hasta obtener valores de costo acumulado para cada uno establecimientos de Salud. Para esta rutina se implementó un código en Python que facilita la iteración.

codigo	d_est	categoria	nomccpp	nviv	nperscen	cp_x	cp_y	es_x	es_y	tpo
2510	PAUCARTAMBO	I-4	MUSQAHUISA	21	73	875236.987	8518570.619	868610.3962	8525044.955	2.160273
2501	CCAPI	I-2	QQUEHUAYLLO	33	108	822533.3827	8458523.263	815148.3956	8466554.794	0.992
9963	CANCAHUANI	I-1	QQUEHUAYLLO	33	108	822533.3827	8458523.263	819884.679	8439221.686	1.771949
2401	CAPACMARCA	I-2	QQUEHUAYLLO	33	108	822533.3827	8458523.263	823751.2186	8449176.407	0.800814
6983	ORCCOMA	I-1	MOSOCLLACTA	10	26	806736.0004	8371784.018	817578.0336	8380420.345	1.875147
7111	YAVINA	I-1	MOSOCLLACTA	10	26	806736.0004	8371784.018	802174.7166	8387723.858	1.998602
6746	LLIQUE	I-1	MOSOCLLACTA	10	26	806736.0004	8371784.018	808746.4095	8391254.335	1.816651
2399	PULPERA	I-2	MOSOCLLACTA	10	26	806736.0004	8371784.018	820655.8077	8377562.603	2.028899
2400	ALHUACCHULLO	I-2	MOSOCLLACTA	10	26	806736.0004	8371784.018	806310.7709	8382027.151	1.748241
6983	ORCCOMA	I-1	PATAWASI	5	5	807857.3778	8371476.363	817578.0336	8380420.345	1.483294
7111	YAVINA	I-1	PATAWASI	5	5	807857.3778	8371476.363	802174.7166	8387723.858	1.898051
6746	LLIQUE	I-1	PATAWASI	5	5	807857.3778	8371476.363	808746.4095	8391254.335	1.688625
2399	PULPERA	I-2	PATAWASI	5	5	807857.3778	8371476.363	820655.8077	8377562.603	1.637046
2400	ALHUACCHULLO	I-2	PATAWASI	5	5	807857.3778	8371476.363	806310.7709	8382027.151	1.714632
2501	CCAPI	I-2	ACOBAMBA	6	22	816639.3216	8472833.188	815148.3956	8466554.794	0.917769
7110	INCACANCHA	I-1	INCACANCHA CH	5	19	957758.2789	8479787.692	953012.7223	8482591.724	0.699897
7110	INCACANCHA	I-1	CONDEA	5	14	957233.841	8480424.553	953012.7223	8482591.724	0.764159
7110	INCACANCHA	I-1	CHUKUANI	10	4	959359.2878	8482356.806	953012.7223	8482591.724	1.663078
7110	INCACANCHA	I-1	INCACANCHA SE	4	10	954576.8211	8483437.302	953012.7223	8482591.724	0.794978
2535	MARCAPATA	I-2	YURAC CANCHA	5	16	952806.901	8486239.114	937460.3956	8493372.448	2.081038
7110	INCACANCHA	I-1	YURAC CANCHA	5	16	952806.901	8486239.114	953012.7223	8482591.724	0.580261
2535	MARCAPATA	I-2	INCACANCHA PAT	2	2	952436.5242	8486770.012	937460.3956	8493372.448	1.940837
7110	INCACANCHA	I-1	INCACANCHA PAT	2	2	952436.5242	8486770.012	953012.7223	8482591.724	0.564808

Figura 30: La matriz de tiempos es el insumo principal para el desarrollo del algoritmo

<sup>19</sup>Matriz: Se denomina así a todo conjunto de números o expresiones, formando filas y columnas



### **3.7. Metodología para la optimización de ubicaciones**

Obtenida la superficie de costo, las rutas mínimas y la matriz de distancia, se inicia la etapa de la optimización de localizaciones, con la aplicación de modelos de localización asignación. Dado a que el interés de la tesis es apoyar al sector público, con el fin de mejorar la capacidad institucional para la organización espacial de los servicios de salud, se ha convenido el uso del modelo *Maximum Covering Location Problem (MCLP)*, que es probablemente uno de los más útiles modelos de localización de servicios desde el aspecto teórico como el práctico (Marianov V and ReVelle C., 1995; Zanjirani Farahani Reza and Steadie Seifi Maryam and Asgari Nasrin, 2010; Zanjirani R. and Hekmatfar M., 2009) que permite obtener un punto intermedio entre la eficiencia y la equidad. El desarrollo metodológico se ha planteado dentro de la programación lineal bajo un conjunto de restricciones.

### **3.8. Selección de ubicaciones candidatas**

El objetivo del MCLP es obtener un subconjunto  $P$  de establecimientos a fin de maximizar la población atendida con éste número, en un rango menor o igual a  $r$  que para nuestro caso equivale a las 2 horas, punto de corte de acuerdo con la corte planteado por la UNICEF<sup>1</sup>, conjuntamente con WHO<sup>2</sup> y UNFPA<sup>3</sup> a partir del documento "Guidelines for Monitoring the Availability and Use of Obstetric Services" (?), en el que reconocen la existencia de niveles mínimos aceptables en el número de servicios obstétricos para la atención de salud, así como las complicaciones en la atención de emergencias superado las 2 horas, sobre todo referidas al control de las hemorragias. Para la selección, se emplea el algoritmo de optimización que identifica los establecimientos que ofrecen las mejores soluciones de cobertura poblacional dentro de las áreas de influencia de los establecimientos  $\leq 2$  horas que representa el área de influencia sobre una superficie de costo, maximizando la población incluida dentro de esas áreas. El algoritmo procesa de manera secuencial y jerárquica, evaluando soluciones de cobertura poblacional con un número creciente de establecimientos: Cobertura máxima (por ejemplo en 2 horas) con soluciones de 1, 2, 3, ...,  $K$  establecimientos. El indicador que define la inclusión de un establecimiento en la solución de acceso físico es la ganancia adicional en cobertura de población que el establecimiento ofrece al sumarse a otros establecimientos incluidos previamente para la oferta de servicios de salud. Para el MCLP se considera que la cobertura es binaria, si es atendido (1) de lo contrario (0).

---

<sup>1</sup>UNICEF: The United Nations Children's Fund - UNICEF - works for children's rights, their survival, development and protection.

<sup>2</sup>WHO: World Health Organization – works health within the United Nations system.

<sup>3</sup>UNFPA: United Nations Population Fund, is an international development agency that promotes the right of every woman, man and child.

### **3.8.1. Elementos del modelo**

Población total: (proyección 2012) ~ 1 100 000 habitantes

Centros poblados: 9 703

Establecimientos de salud: 304

### 3.8.2. Formulación del Maximum Covering Location Problem

El Maximum Covering Location Problem (MCLP) está dado por:

$$v(MCLP) = \text{máx} \left\{ \sum_{i=1}^m f_i x_i \right\} \quad (3.8)$$

Subject to:

$$x_i \leq \sum_{j \in N_i} y_j, \quad i \in I \quad (3.9)$$

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (3.10)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, \quad i \in I \quad (3.11)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad j \in J \quad (3.12)$$

Donde:

$I = \{1, 2, \dots, m\}$  Es el conjunto de puntos de demanda (centros poblados),

$J = \{1, 2, \dots, n\}$  Es el conjunto de ubicaciones potencial es para los servicios de Cuidados Básicos Obstétricos (COB)

$N_i = \{j \in J | d_{ij} \leq T\}$  Es el conjunto de servicios que están localizados dentro de un tiempo de viaje crítico  $T$  desde un punto de demanda  $i$

$f_i$  Es la población del punto de demanda  $i$

$d_{ij}$  Es la distancia más corta del tiempo de viaje, desde un punto de demanda  $i$  hacia un servicio  $j$

$T$  Es el tiempo de viaje crítico, a partir de cual el punto de demanda se considera no cubierto.

$p$  Es el número de Cuidados Básicos Obstétricos a ser seleccionados/ubicados.

$x_i, y_j$  son variables de decisión:

$x_i = 1$  si el punto de demanda  $i$  es cubierto ( $x_i = 0$  de lo contrario)

$y_j = 1$  significa que el servicio COB debería se ubicado en el lugar  $j \in J$  ( $y_j = 0$  de lo contrario).

Restricciones (2) estado para el punto de la demanda  $i$  a ser cubierto ( $x_i = 1$ ) en los que debería existir por lo menos un COB  $j$  localizado dentro del tiempo de viaje crítico  $T$  desde  $i$  ( $N_i \neq \emptyset$  para su correspondiente  $i$ )

Restricción (3) limitar el número de establecimientos de salud en la solución a  $p$

Restricciones (4) y (5) definido de 0 – 1 naturaleza de la decisión de las variables.

En el MLCP para la región de Cusco, hemos definido un porcentaje de atención igual al 90% de la población dentro de las  $T = 2$  horas

### 3.8.3. Implementación del algoritmo en R y ejecución

El algoritmo para la selección de candidatos en la región de Cusco - Perú, ha sido implementado en el software R, con el nombre de Linear.R. Si bien, existen varias herramientas para la optimización de localizaciones, tanto comerciales como el software Gurobi y libres como el glpsol, durante el periodo de la pasantía en Italia, como parte de la maestría, empleé buena parte del tiempo en planificar como sería la selección de los candidatos que pudiera satisfacer a la demanda de la región Cusco y con el apoyo del Dr. Andrea Gobbi de la (Fondazione Bruno Kessler FBK, Trento - Italia), se desarrolló un código ad-hoc en el R, que es un lenguaje orientado a objetos, desarrollado como un proyecto de software libre, con la posibilidad de cargar diferentes bibliotecas, librerías o paquetes con finalidades específicas de cálculo o gráfico. El R ha demostrado ser eficiente para programar e implementar los algoritmos de optimización, entre sus librerías para la optimización están el, simplex, lpSolve y lpSolveAPI. Para el código se ha empleado el lpSolve, por su versatilidad para resolver problemas de programación lineal, fue desarrollado originalmente por Michel Berkelaar en Universidad Tecnológica de Eindhoven, pero ha tenido muchos aportes a lo largo del tiempo.

El código ejecuta las funciones diseñadas para el R, tiene a la matriz de tiempos como el único insumo. Los parámetros son ingresados manualmente y al finalizar el proceso, devuelve como resultado el listado de establecimientos seleccionados, la curva de agregación y dos mapas, uno de ellos con las localizaciones de los establecimientos seleccionados, coloreados de la misma manera que su asignación, el otro se trata de un mapa de símbolos de tamaños graduados que muestran las agrupaciones poblacionales y finalmente el cuadro con la distribución de tiempos, los que indica la población que es cubierta a cero, una, dos o más horas.

Para su funcionamiento es necesario instalar el R, que se descarga desde la página de CRAN (<http://cran.rproject.org/>). La interfaz de R es una consola de comandos convencional, viene sin ninguna IDE avanzada, pero podemos utilizar el RStudio u otro que nos facilite su aplicación, para ejecutarlo es necesario ingresar `sudo Rscript -vanilla Linear.R` dentro de la ruta en la que se ubican nuestros archivos.

Los paquetes requeridos en el R:

- `library(lattice)`: es un sistema de visualización de datos de alto nivel potente y elegante, con un énfasis en datos multivariantes
- `library(maptools)`: herramientas para la lectura y la manipulación de objetos espaciales. Conjunto de herramientas para manipular y leer datos geográficos.
- `library(rgdal)`: Enlaces para la abstracción de datos Biblioteca Geospatial
- `library(spatstat)`: Paquete de estadística espacial

Se han realizado varias modificaciones en el Linear.R, de acuerdo con las necesidades que fueron surgiendo a lo largo de su desarrollo. Los parámetros han sido concebidos de acuerdo con las necesidades que podrían tener los ejecutores de políticas del estado, permitiendo así, forzar el ingreso de establecimientos de salud de acuerdo con los criterios que manejan las políticas de salud pública nacional o restringiendo la selección de determinados servicios por la misma razón.

En la tabla 7 se verifica lo descrito, con respecto a los criterios que se ha manejado para la obtención de la respuesta. El tiempo  $t$  es menor o igual a las 2 horas, es como lo

entiende el código y este punto de corte ha sido defendido previamente, el porcentaje de población a atender, se ha elegido el 90 % dado que es un número que se considera aceptable para la atención estatal. En este caso se ha forzado el ingreso de los establecimientos de salud :  $X_1, X_2..X_n$ , el número máximo de establecimientos a seleccionar ha sido 11, los posibles candidatos, este valor ha sido consignado luego de una primera corrida con 15 establecimientos y luego de observar la curva de agregación se ha establecido a 11 como un número que un estado con bajos recursos estaría en capacidad de potenciarlos. No se ha seleccionado ningún centro o servicio para que quede fuera de la selección. El resto de los parámetros son para elegir si se desea obtener los mapas y las curvas, lo que incrementa el tiempo de procesamiento. Finalmente, el mapa que es proporcionado por el R, es un shapefile proyectado en coordenadas UTM, zona 18 Sur, el datum usado es el WGS84.

**Tabla 7:** Tabla: Parámetros del código Linear.R

Parámetros	Valor	Descripción
time	2	Tiempo máximo para considerar a un poblado atendido.
perc=	0.9	Fracción de la población atender considerada aceptable.
force=	list()	Establecimientos de salud que consideramos deberían estar en el listado final, se coloca el código del establecimiento.
not_desidered=	list()	Establecimientos de salud excluidos, se fuerza a que ciertos servicios no sean elegidos.
nmax=	11	Número que consideramos aceptable, estos serán mejorados y depende del presupuesto que asigne el estado.
compute_curve=	False	Para construir la curva se coloca (false) por defecto, true de lo contrario, es un proceso que tarda en su construcción.
exist_shape=	True	Para indicar que existe el shapefile que se usará para elaborar los mapas, para el caso en particular se trata del mapa de Cusco.
p_time=	TRUE	Calcula el tiempo de distribución de los establecimientos de salud.
shapefile=	"shapes/cusco_rigth.shp"	Se indica la ruta del shapefile, de existir.
proj=	<i>CRS("+ proj = utm + zone = 18 + south + ellps = WGS84 + datum = WGS84 + units = m + nodefs")</i>	Se especifica la proyección del shapefile.

---

R también proporciona un conjunto de métodos más robustos englobados dentro de la familia de los algoritmos evolutivos, tales como los algoritmos genéticos. Parte del poder de los algoritmos genéticos es que su operación abstrae cualquier detalle de la estructura del problema, reduciéndose todas las variables de decisión a un “cromosoma”, finalmente la forma estándar de trabajo es mediante cromosomas con “genes” binarios. Esta forma de selección de candidatos en el proceso de localización - asignación, es descrita en ([Boffey B., Yates D., and Galvao RD, 2003](#)).

# CAPÍTULO 4

---

## Resultados

---

*“Un gran descubrimiento resuelve un gran problema, pero hay una pizca de descubrimiento en la solución de cualquier problema.*

*Tu problema puede ser modesto, pero si es un reto a tu curiosidad y trae a juego tus facultades inventivas, y si lo resuelves por tus propios métodos, puedes experimentar la tensión y disfrutar del triunfo del descubrimiento.”.*

*George Pólya*

El resultado principal de la tesis, consiste en brindar una lista de establecimientos de salud y sus localizaciones para la atención de la población cercana al total de habitantes de la región Cusco, para el logro de este resultado, se han realizado los procesos, tales como la elaboración de la superficie de costo, un proceso largo y cuya utilidad va más allá de los resultados que aquí se describen y la aplicación del algoritmo de localización - asignación para la optimización.

### **4.1. Principales resultados**

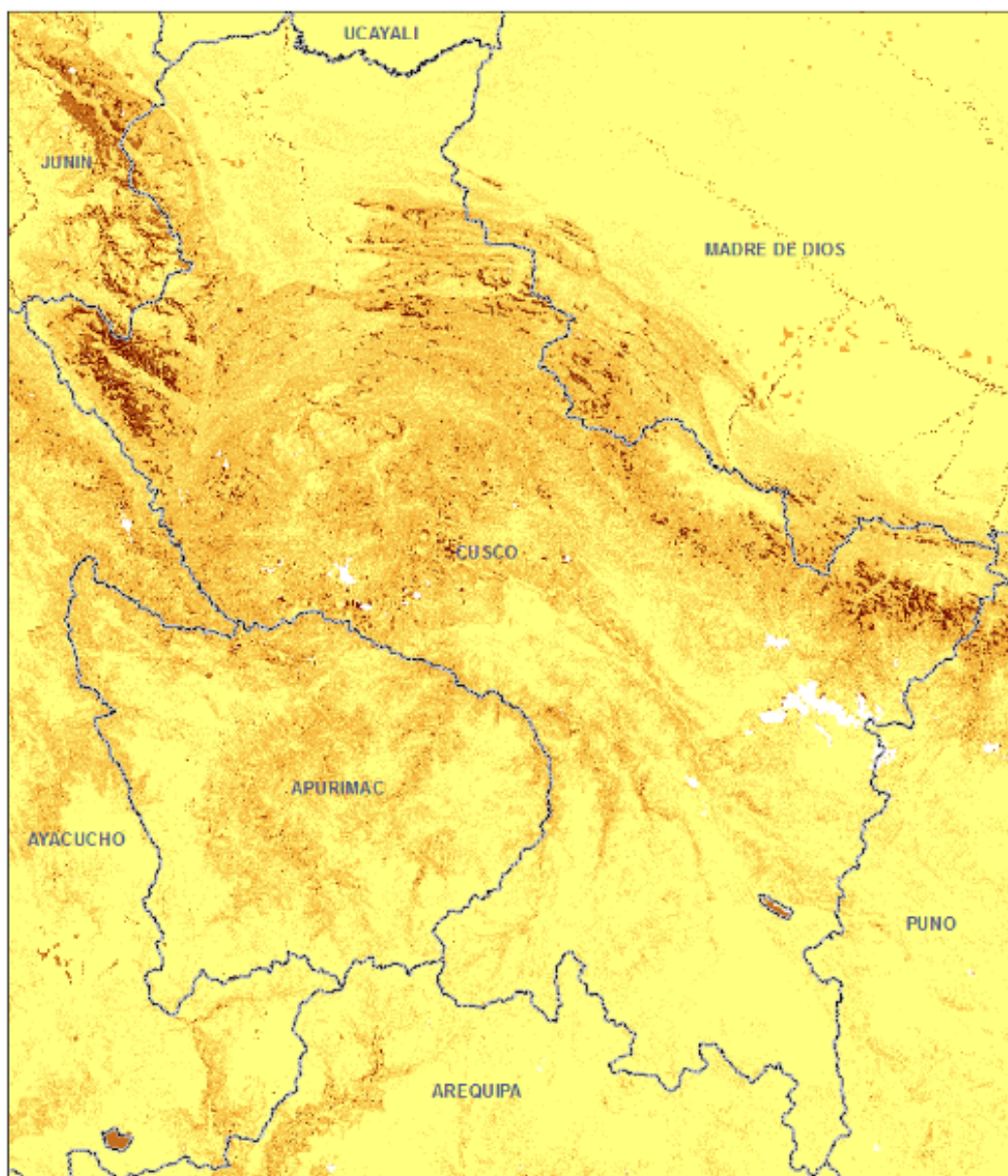
#### **4.1.1. Superficie de costo y matriz de tiempos**

El primer resultado que se obtiene de los procesos, es la superficie de costo de un área más extensa que la división geopolítica del departamento de Cusco, correspondiente a las cuadrículas empleadas del tshingua data. de resolución. La superficie de costo es una cuadrícula georreferenciada (raster en la terminología de SIG) resultante de combinar varias capas temáticas raster y consta de celdas que representan segmentos de territorio cuadrangulares de idéntico tamaño que almacenan valores que representan el costo (nivel de fricción ó impedancia), expresado en unidades de tiempo, de atravesar cada uno de dichos segmentos. Las cuadrículas se trabajaron en un tamaño de celda de 30 metros. Una consideración al decidir la resolución de las cuadrículas fue adoptar un punto medio entre la pérdida de información con tamaños de celda muy grandes y la generación de grandes volúmenes de datos que incrementa los tiempos de cómputo si la celda es muy pequeña

---

([Delamater Paul L. and Messina Joseph P. and Shortridge Ashton M. and Grady Sue C., 2012](#)). Este punto ha sido citado en la metodología del modelo.





**Mapa 31:** Superficie de costo/impedancias generada a partir de las capas temáticas y la metodología (en minutos) de traslado sobre cada celda correspondiente a 30x30 metros del territorio.

Las áreas que se encuentran de color blanco pertenece a zonas en las cuales es imposible desplazarse. Los tonos claros indican valores de impedancia/resistencia bajos, mientras que, los tonos oscuros representan a valores de impedancia altos. De la superficie de costo se desprende la matriz de distancias/tiempos entre Centros poblados y Establecimientos de Salud, que es una matriz superior a los 100,000 registros.