

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA DE EXPANSIÓN URBANA SOBRE EL CORREDOR CALI-
JAMUNDÍ CONSIDERADO COMO UNA ZONA DE RECARGA DEL ACUÍFERO DEL VALLE
DEL CAUCA

Ing. Agrícola. OSCAR ALEXANDER TRÓCHEZ MONTOYA

Trabajo final de maestría presentado como requisito para optar al título de: Magister en
Desarrollo Sustentable.

Directora. Física OLGA LUCIA BAQUERO MSc. Geofísica - UNIVALLE
Codirector. Ing. HÉCTOR FABIO ARISTÍZABAL RODRIGUEZ PhD: - CVC

ÉNFASIS: GESTIÓN DEL RIESGO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
MAESTRÍA EN DESARROLLO SUSTENTABLE

Santiago de Cali, Colombia

2019

Resumen

Actualmente la población de los grandes centros urbanos crece aceleradamente debido fundamentalmente al modelo de desarrollo centralista que concentra industrias y servicios, lo cual favorece la migración de los habitantes de ciudades pequeñas e intermedias a ciudades capitales. La ciudad de Santiago de Cali no es ajena a este comportamiento en el crecimiento poblacional, dicho crecimiento demanda a los planificadores del territorio nuevas áreas de desarrollo urbanístico, lo que se les conoce como expansión urbana y que en sí genera cambios en el uso del suelo de pasar de zonas blandas a zonas duras. El cambio de uso del suelo afecta directamente la dinámica de los acuíferos especialmente en la disminución de los caudales de recarga y en consecuencia aumentado la salinidad de sus aguas, entre otros factores. La presente investigación estudia la dinámica del acuífero aluvial del río Cauca al sur de la ciudad de Santiago de Cali en la zona de expansión urbana, con el objetivo de determinar si la expansión urbanística amenaza la recarga del acuífero, como resultado de la investigación se evaluó el riesgo por agotamiento del acuífero para cada uno de los parciales, a partir del balance de agua entrada y salida de los escenarios de modelación numérica, y posterior a ello se comparó los escenarios con y sin intervención, obteniendo como resultado que los planes parciales propuestos hacia el Suroccidente de la zona de expansión afectará la dinámica del acuífero en cuanto su balance que los que se propone al Nororiente, por último se plantea una metodología para que el desarrollo urbanístico no afecte el balance de agua del acuífero en la zona de expansión.

Palabras claves: Expansión urbana, Dinámica del acuífero, Amenaza, Riesgo por agotamiento, Escenarios de modelación numérica y Propuesta de ocupación

Summary

Currently the population of large urban centers is growing rapidly mainly due to the centralist model development concentrated industries and services, which favors the migration of the inhabitants of small and intermediate to capital cities. The city of Santiago de Cali is no stranger to this behavior in population growth, this growth demand planners territory new areas of urban development, which are known as urban sprawl and that in itself generates changes in land use to move from soft to hard zones. The change in land use directly affects the dynamics of aquifers especially in reducing recharge rates and increased salinity of the water, among other factors accordingly. The dynamics of aquifers especially in reducing recharge rates and consequently increased salinity of the water, among other factors. This research studies the dynamics of the alluvial aquifer of the Cauca River south of the city of Santiago de Cali in the area of urban expansion, in order to determine whether urban sprawl threatens the aquifer recharge as a result of the investigation was evaluated the risk for depletion of the aquifer for each partial from the balance of incoming and outgoing scenarios numerical modeling water, and scenarios after it was compared with and without intervention, resulting in the partial plans proposed to the southwest of the expansion zone will affect the dynamics of the aquifer as its balance sheet that it intends to Nororienta finally a methodology is proposed for land development does not affect the water balance aquifer in the expansion zone

Keywords: Urban Sprawl, Dynamic aquifer, Threat, Risk exhaustion, numerical modeling scenarios and Proposal occupation

CONTENIDO

Pág.

Resumen.....	ii
1. Introducción.....	1
2. Problema de investigación	3
2.1 Planteamiento del problema de investigación.....	3
2.2 Objetivo general	5
2.3Objetivos específicos.....	5
3 Marco normativo, conceptual y teórico	6
3.1 Marco normativo	6
3.1.1Normatividad colombiana	6
3.2 Marco conceptual	9
3.2.1 Gestión ambiental y Riesgo ambiental	9
3.2.2 Vulnerabilidad de un acuífero	11
3.2.3 Riesgo por agotamiento	12
3.3 Marco teórico	13
3.3.1 Agua subterránea	13
3.3.2 Clasificación formaciones geológicas desde la hidrogeología	13
3.3.3 Definición de acuífero	14
3.3.4 Tipos de acuíferos desde el punto de vista hidráulico	14
3.3.5 Tipos de acuíferos según su textura	15
3.3.6 Acuíferos aluviales.....	16
3.3.7 Recarga de un acuífero.....	17
3.3.8 Porosidad y Permeabilidad del suelo	19
3.3.9 Modelo conceptual de un acuífero	20
3.3.10 Modelación Numérica de Acuíferos.....	20

3.4 Variabilidad Climática.	22
4. Descripción y localización de zona de estudio	23
5. Metodología	25
6. Cálculos y resultados del modelo numérico.....	27
6.1 Línea base	27
6.1.1 Caracterización del acuífero regional del Valle del Cauca	27
6.1.2 Caracterización geológica y geomorfológica del área de estudio.....	29
6.1.3 Análisis de la precipitación efectiva	30
6.1.4 Topografía del área de análisis	32
6.2 Modelo conceptual y modelación numérica	33
6.2.1 Correlaciones estratigráficas zona de expansión urbana.....	33
6.2.2 Modelo estratigráfico del acuífero.....	36
6.2.3 Líneas piezométricas de agua subterránea en el área de estudio	39
6.2.4 Modelación numérica	42
6.2.5 Límites del Sistema	45
6.2.6 Dimensiones	46
6.2.7 Condiciones de frontera del modelo	48
6.2.7.1 Análisis de resultado modelo dos capas.....	54
6.2.7.2 Análisis de resultado modelo tres capas.....	55
7. Evaluación de los diferentes escenarios	57
7.1 Evaluación de los diferentes escenarios de amenaza de ocupación urbana.	57
7.1 Impermeabilización del suelo en su primer metro.	62
7.2. Impermeabilización del suelo en su segundo metro.....	69
7.3 Impermeabilización del suelo en su tercer metro.....	76

7.2 Análisis de resultados de riesgo por agotamiento	82
8 Propuesta y discusión	87
8.1 Propuestas de ocupación urbana para la mitigación del riesgo por agotamiento reduciendo la amenaza al que se encuentra sometido el acuífero.	87
8.1.1 Planteamiento de la metodología para determinar los cambios de uso de suelos reduciendo el riesgo.	87
8.1.1.1 Identificación de espesor semi permeable	89
8.1.2 Resultados del modelo numérico	89
8.1.2.1 Identificación de celdas secas.....	90
8.1.2.2 Profundidad del nivel de agua subterránea.....	91
8.1.2.3 Resultados del riesgo por agotamiento.	92
8.1.3 Delimitación de zonas para ocupación urbana.	93
9 Conclusiones y recomendaciones.....	96
ANEXOS.....	100
A.1 Análisis de los resultados obtenidos de las líneas piezométricas	100
Referencias.....	106

Índice de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1. Acuífero confinado y libre</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2. Métodos para la cuantificar la recarga, Tróchez, 2016</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3. Ubicación espacial del corredor Cali-Jamundí, Fuente CVC-POT 2014.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4 Zonificación de la vulnerabilidad del acuífero. Fuente CVC, 2000.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5. Zonificación del acuífero del Valle del Cauca Fuente CVC.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 6 Unidades geológicas (Izq.), Unidades geomorfológicas (Der) en el área de expansión análisis Fuente CVC</i>	<i>30</i>
<i>Figura 7. Topografía de la zona de modelación Fuente CVC.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 8. Especialización de las cortes para las correlaciones litológicas</i>	<i>33</i>
<i>Figura 9. Subzonas Litoestratigráfica.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 10. Modelo Estratigráfico al Sur de la zona de expansión</i>	<i>37</i>
<i>Figura 11. Número de capas empleadas en el modelo litoestratigráfico, sentido Sur-Norte.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 12. Modelo 3D corte horizontal, sentido occidente-oriente extremo norte</i>	<i>39</i>
<i>Figura 13. Líneas de flujo promedio máximo.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 14. Líneas de flujo promedio mínimo</i>	<i>42</i>
<i>Figura 15. Ubicación de los Pozos en la Zona de Estudio (lectura de niveles 2013-1).....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 16. Límites del área de modelación numérica</i>	<i>46</i>
<i>Figura 17. Discretización de la malla del Modelo</i>	<i>46</i>
<i>Figura 18. Identificación de dos y tres capas del modelo</i>	<i>47</i>
<i>Figura 19. Parámetros de entrada en la condición de River</i>	<i>49</i>
<i>Figura 20. Ubicación geográfica de las condiciones de frontera evaluación hidrogeológica regional</i>	<i>50</i>
<i>Figura 21. Valores de Conductividad hidráulica</i>	<i>52</i>
<i>Figura 22. Gráfico de ajuste de dos capas.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 23. Gráfico de ajuste de tres capas.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 24. Modelo de dos capas.</i>	<i>55</i>

<i>Figura 25 Mapa de dirección de flujo de tres capas.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 26. Refinamiento de la malla para los escenarios.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 27. Zonas de balance en el modelo numérico.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 28 Ubicación espacial de cada uno de los planes parciales</i>	<i>61</i>
<i>Figura 29. Cambio de la conductividad hidráulica en la primera capa.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 30. Dirección de flujo y comportamiento de celdas secas para el primer escenario.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 31. Corte transversal del comportamiento de las líneas de flujo</i>	<i>64</i>
<i>Figura 32. Comportamiento de las líneas de flujo y distribución de celdas secas.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 33. Corte transversal del comportamiento de las líneas de flujo</i>	<i>71</i>
<i>Figura 34. Comportamiento de las líneas de flujo y de celdas secas para el tercer escenario.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 35 Riesgo por agotamiento Capa1 Figura 36 Riesgo por agotamiento capa 2</i>	<i>85</i>
<i>Figura 37 Efecto barrera de la impermeabilización</i>	<i>86</i>
<i>Figura 38 Metodología propuesta para evaluar zonas de ocupación urbana</i>	<i>88</i>
<i>Figura 39 Espesor del material semipermeable en la primera capa.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 40. Zonas con ausencia del nivel de aguas subterránea evaluado en cada uno de los escenarios</i>	<i>90</i>
<i>Figura 41. Niveles de agua subterránea en cada uno de los escenarios.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 42. Ubicación espacial del nivel freático entre 1-3 metros</i>	<i>92</i>
<i>Figura 43 Identificación de riesgo por agotamiento.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 44. Propuesta de ocupación urbana</i>	<i>95</i>
<i>Figura 45. Líneas de flujo 2009-2</i>	<i>100</i>
<i>Figura 46. Líneas de flujo 2010-1</i>	<i>101</i>
<i>Figura 47. Líneas de flujo 2011-1</i>	<i>102</i>
<i>Figura 48. Líneas de flujo 2012-1</i>	<i>103</i>
<i>Figura 49. Líneas de flujo 2012-2</i>	<i>104</i>
<i>Figura 50. Líneas de flujo 2013-1</i>	<i>105</i>
<i>Figura 51. Líneas de flujo 2013-2</i>	<i>105</i>

Índice de Tablas

	Pág.
<i>Tabla 1. Precipitación efectiva anual y mensual multianual.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 2. Precipitación efectiva en el área de la zona de expansión.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3. Pozos con información litológica Fuente CVC</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 4. Información de las correlaciones</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 5 Valor medio de los niveles freáticos en la zona de estudio (2009-2-2013-2) Fuente CVC</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 6 Localización de los pozos de aprovechamiento de agua subterránea (lectura 2012-1) Fuente CVC.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 7. Valores y Tipo de condiciones de frontera para el modelo acuífero propuesto</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 8 Matriz de ordenamiento de parámetros de calibración</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 9 Porcentaje de agotamiento en la primera capa</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 10 Porcentaje de agotamiento en la segunda capa</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 11 Porcentaje de agotamiento en la tercera capa.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 12 Porcentaje de agotamiento del escenario dos capa uno</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 13 Porcentaje de agotamiento del escenario dos capa dos.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 14 Porcentaje de agotamiento escenario dos capa tres</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 15 Porcentaje de agotamiento del escenario tres capa uno.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 16 Porcentaje de agotamiento del escenario tres capa dos</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 17 Porcentaje de agotamiento del escenario tres capa tres</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 18 Agotamiento promedio para la Capa 1</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 19 Agotamiento promedio para la Capa 2</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 20 Escala de clasificación de la amenaza para la capa 1.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 21 Escala de clasificación de la amenaza para la capa 2.....</i>	<i>84</i>

1. Introducción

Actualmente la población de los grandes centros urbanos crece aceleradamente debido fundamentalmente al modelo de desarrollo centralista que concentra industrias y servicios, lo cual favorece la migración de los habitantes de ciudades pequeñas e intermedias a ciudades capitales, las cuales ofrecen mayor bienestar económico y social a sus moradores. La ciudad de Santiago de Cali no es ajena a este comportamiento en el crecimiento poblacional, motivo por el cual la secretaría de Planeación del municipio de Santiago de Cali (Alcaldía de Santiago de Cali, 2013), ha proyectado que para el año 2036, se puede presentar un incremento de la población en el sector urbano en un 18.28% es decir aproximadamente 2.849.127 habitantes.

Este crecimiento exponencial de la población demanda a los planificadores del territorio nuevas áreas de desarrollo urbanístico, lo cual implica un incremento en la demanda de servicios como transporte, energía, gas y agua potable. La disponibilidad del recurso hídrico en un territorio, está ligado no sólo a factores internos sino también a externos, los cuales se encuentra asociados con temas ambientales que afectan tanto la cantidad como la calidad de este recurso. Es así que el servicio de agua potable en la ciudad de Santiago de Cali se ha visto afectado dado a que la principal fuente hídrica, es el río Cauca, el cual surte el 75 % del agua de la ciudad (Diario El País Cali, n.d.), fuente que se ha ido deteriorando en el tiempo por lo cual las reservas hídricas subterráneas se han convertido en un factor determinante para el desarrollo sostenible de la ciudad.

La expansión urbana genera cambios en el uso del suelo, dada a la construcción de viviendas, infraestructura industrial y comercial, lo cual se convierte en un fenómeno antrópico que afecta al medio ambiente, y por lo general este cambio genera impactos negativos que suelen ser irreversibles en los sistemas ambientales que se encuentran en área de desarrollo urbanístico, como lo son la pérdida de biodiversidad de fauna y flora, deterioro de la calidad de agua, entre otros factores ambientales importantes para el equilibrio de los ecosistemas. Los cambios en el uso del suelo en las áreas de expansión urbana reúnen aspectos políticos, sociales y económicos, los cuales se establecen en el Ordenamiento Territorial-OT, siendo este último un instrumento normativo de la planificación del territorio y ordenamiento ambiental. Como se ha mencionado, un área de expansión urbana trae consigo un crecimiento demográfico y económico, que a su vez genera una serie de impactos ambientales en el territorio. (Dávila Pórcel & de León Gómez, 2017) señala que la expansión urbana fuera de tener una afectación en los sistemas ambientales superficiales, incide también, en la dinámica de los acuíferos, en la

disminución de los caudales de recarga, aumentado la salinidad de sus aguas, genera fluctuación de los niveles freáticos, problemas de subsidencia del terreno y contaminación de sus aguas por metales pesados. Por ende, se hace necesario la conservación y manejo de las aguas subterráneas en las zonas de expansión o de desarrollo urbanístico sin que este afecte la calidad y cantidad del agua subterránea.

De igual forma se ha demostrado que los cambios del uso del suelo inducen a cambios en los ciclos hidrológicos, siendo los más impactantes los producidos por la construcciones de las urbanizaciones, que entre otros se manifiestan en cambios de humedad en el aire, lo que a su vez disminuye los volúmenes de lluvia sobre los centros poblados, afectando ecosistemas que depende de la fluctuación de los niveles de agua subterránea (Gwenzi & Nyamadzawo, 2014), pero fundamentalmente reducen la infiltración al impermeabilizar el suelo y por ende afecta la percolación hacia zonas donde se almacena el agua subterránea.

La presente investigación estudia la dinámica del acuífero aluvial del río Cauca al sur de la ciudad de Santiago de Cali en la zona de expansión urbana, decretada por el POT del 2014 del municipio de Santiago de Cali, con el objetivo de determinar cómo dicha expansión urbanística amenaza la recarga del acuífero, de igual manera en el presente estudio se analizaran diferentes normas de construcción que permitan mitigar dicha amenaza y de esta manera gestionar el riesgo al que se somete el acuífero ante cambios en el uso del suelo.

2. Problema de investigación

2.1 Planteamiento del problema de investigación

El consumo de agua en el mundo casi se ha duplicado en los últimos cincuenta años. Se estima que de los 4.000 km³/año de agua que utiliza la humanidad, entre 600 y 700 km³/año corresponden a aguas subterráneas, es decir, entre el 15 y el 18% del agua total (Pernía Llera & Fornés Azcoiti, 2009 p.2). Las aguas subterráneas se consideran como un recurso estratégico frente a la disponibilidad, cantidad y calidad del recurso hídrico superficial. La accesibilidad y utilización del recurso hídrico subterráneo se encuentra en función de la profundidad del nivel de agua, del tipo del material estratigráfico que conforma el acuífero y de su ubicación geográfica. En la mayoría de los casos es empleada para procesos agrícolas o de consumo humano, según el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM, la demanda de agua subterránea en Colombia, principalmente es para uso agrícola con un 54%, seguido del domestico con un 29% y por último el uso industrial con un 13% y en un menor porcentaje el pecuario con 3% (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). La protección de los acuíferos a nivel Nacional se establece con el Decreto 1640 de 2012 donde se reglamentan los instrumentos de planificación, ordenamiento y manejo de las cuencas hidrográficas y la estructuración de los planes de manejo ambiental de los acuíferos.

Sin embargo, esta protección tiene sus limitaciones, y las características (físico-química y disponibilidad) de las aguas subterráneas pueden verse alteradas por efectos que sean persistentes en el tiempo, como serían los originados por acciones antrópicas: vertimiento de agroquímicos o hidrocarburos, contaminación puntual o difusa, cambios en el uso del suelo que afecte la cantidad y calidad del agua, entre otros. La expansión urbana se traduce en un cambio de uso del suelo que incorpora impactos negativos en el medio ambiente, como lo sería la pérdida de hábitats, biodiversidad y servicios ecosistémicos. Los impactos ambientales por la urbanización persisten durante siglos o incluso no llegan a desaparecer.

La urbanización no solo crea obstáculos para el ciclo hidrológico al perturbar los procesos de evaporación, transpiración e infiltración, sino que también impacta negativamente en los recursos naturales. Un factor que contribuye en la mayoría de las urbanizaciones es que impermeabilizan una proporción significativa de la superficie del terreno y la principal recarga hacia el acuífero local. se encuentra por fuera de los límites urbanos. La urbanización también causa cambios importantes en la

frecuencia y el volumen de la recarga de agua subterránea (Foster, Morris, & Lawrence, 2015). De igual forma para (Martín Del Campo, Esteller, Expósito, & Hirata, 2014), identifica un factor que contribuye a la evolución temporal en los niveles de agua subterránea y lo asocia con una recarga reducida como consecuencia de la impermeabilización del suelo en aquellas áreas ocupadas donde el suelo y el subsuelo no permiten la infiltración de agua para los acuíferos, reduciendo su volumen en el tiempo; por otro lado (Misra, 2011), determina una disminución de los niveles freáticos de 0.20 m por año en la cuenca Ganga (India), debido a la urbanización que se está originando en dicha área. Estudios recientes afirman que los cambios en la cobertura del suelo asociados con la urbanización tienen un efecto profundo sobre el balance hídrico, debido a la impermeabilización de las superficies ocupadas, eliminación de vegetación con raíces profundas y alteraciones en la red de drenaje (Barron, Barr, & Donn, 2013). En ese orden de ideas la expansión urbana se puede considerar como una amenaza que afecta tanto el recurso hídrico superficial como subterráneo, estas afectaciones se pueden mitigar a través de la disminución de la amenaza que plantea la ocupación urbana planteando diferentes alternativas de desarrollo urbano.

2.2 Objetivo general

- ♦ Evaluar el riesgo que supone un cambio de uso del suelo en la zona de expansión urbana definida en el Plan de Ordenamiento Territorial- POT del municipio de Santiago de Cali, en la zona de recarga del acuífero.

2.3Objetivos específicos

- ♦ Realizar la modelación de flujo de agua subterránea en la zona de estudio para determinar la dinámica del acuífero.
- ♦ Evaluar diferentes escenarios de generación de ocupación urbana para determinar la amenaza que se podría generar hacia el acuífero de la zona de estudio.
- ♦ Proponer pautas de ocupación urbana que puedan utilizarse para la mitigación del riesgo reduciendo la amenaza al que está sometido el acuífero en la zona de expansión urbana.

3 Marco normativo, conceptual y teórico

3.1 Marco normativo

3.1.1 Normatividad colombiana

La normatividad Colombiana el Artículo 1 de la Ley 99 de 1993 mencionan los principios generales de la política ambiental, resaltado los más importantes para el desarrollo del presente trabajo de investigación:

4. Las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial.
5. En la utilización de los recursos hídricos, el consumo humano tendrá prioridad sobre cualquier otro uso.
11. Los estudios de impacto ambiental serán el instrumento básico para la toma de decisiones respecto a la construcción de obras y actividades que afecten significativamente el medio ambiente natural o artificial.
14. Las instituciones ambientales del Estado se estructurarán teniendo como base criterios de manejo integral del medioambiente y su interrelación con los procesos de planificación económica, social y física (Secretaria del Senado de la República de Colombia, 1993)

Amparados en algunos de los principios mencionados anteriormente, para el año 2010 el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial publica la Política Nacional para la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), tiene por objetivo principal “garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante un uso eficiente y eficaz. Considerando el agua como un factor de desarrollo económico y de bienestar social” (p.9). Por ende, es importante la conservación y sostenibilidad ambiental del recurso hídrico en el territorio, debido a que el agua en la actualidad se considera un bien económico y social.

Tradicionalmente el agua ha sido considerada como un recurso natural, ilimitado y renovable, y ha existido cierto consenso en considerar al agua como bien libre, no económico y, por tanto, gratuito. Sin embargo, el rápido crecimiento de la población y del desarrollo económico en el último siglo está provocando su escasez relativa en muchas zonas. No obstante, en la actualidad se acepta que el agua dulce es un recurso escaso, susceptible de usos alternativos y cuya gestión debe hacer frente a elevados costos. El agua es más que un factor de producción, es sobre todo un factor de cohesión social, económica y ambiental Por

ello, la conceptualización del agua puede abordarse desde distintas perspectivas .Como factor de producción, como activo financiero y como activo eco social (Olmeda, 2006)

De la misma forma La Ley 1523 del año 2012 menciona en su Artículo 3, Numeral 9 que el principio de sostenibilidad ambiental está inmerso en el desarrollo sostenible, mencionado que el desarrollo de un territorio debe satisfacer las necesidades del presente sin comprometer el deterioro ambiental de los ecosistemas en el territorio. Lo anterior, implica tener en cuenta la dimensión económica, social y ambiental de los proyectos a desarrollar en el territorio y podrían tener impactos negativos irreversibles en los sistemas ambientales (Congreso de Colombia, 2012).

Pasando a nivel regional la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC desde el año 1979, aprueba el Acuerdo 20 por el cual reglamenta el aprovechamiento y la protección de las aguas subterráneas en el área de su jurisdicción, a causa de este acuerdo se convierte en un instrumento importante normativo del recurso hídrico subterráneo, el cual permitió implementar actividades de la administración del recurso. Posterior a ello aparece el Acuerdo 042 del año 2010 donde adopta la reglamentación integral para la gestión de las aguas subterráneas en el departamento del Valle del Cauca, dicho acuerdo menciona en sus artículos:

Artículo 107. En las zonas de recarga de acuífero se limitará la construcción de nuevos pozos de aprovechamiento de agua subterránea y solo se autorizará la construcción de pozos para abastecimiento público cuando no exista fuentes de agua superficial que puedan atender la demanda.

Artículo 108. La CVC no autorizará en zonas de recarga la instalación de rellenos sanitarios, cementerios, industrias con actividades potencialmente peligrosas para la contaminación de las aguas subterráneas, estaciones de servicios con tanques enterrados, lagunas de tratamiento y aplicación en el suelo de productos químicos que puedan afectar las características físico-químicas de las aguas subterráneas.

Artículo 109. Las actividades de protección de las zonas de recarga de aguas subterráneas estarán articuladas a los planes de ordenamiento de cuenca y planes de ordenamiento territorial.

Artículo 110. Los usos de los suelos en zonas de recarga deberán respetar las disposiciones establecidas en los Planes de Ordenamiento Territorial, el Plan de Ordenamiento de Cuencas y las disposiciones ambientales que establezca la CVC para el manejo y protección de las

zonas de reserva natural de la sociedad civil a que hace referencia el artículo 109 de la Ley 99 de 1993 y las zonas de manejo especial (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC, 2010, p.92, 93)

Por otro lado, el Decreto 3600 del 2007 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, el cual reglamenta las disposiciones relativas a las determinantes de ordenamiento de uso de suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación de este tipo de suelo, menciona en su Artículo 1, párrafo 1:

Estructura Ecológica Principal. Conjunto de elementos bióticos y abióticos que dan sustento a los procesos ecológicos esenciales del territorio, cuya finalidad principal es la preservación, conservación, restauración, uso y manejo sostenible de los recursos naturales renovables, los cuales brindan la capacidad de soporte para el desarrollo socioeconómico de las poblaciones (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007).

El nuevo Plan de Ordenamiento Territorial-POT, del municipio de Santiago de Cali basados en el párrafo anterior menciona que:

Estas zonas se consideran suelos de protección ambiental por su importancia en la recarga de los acuíferos y por lo tanto su uso y aprovechamiento sólo se permitirá bajo las condiciones establecidas en el componente rural del presente Plan según corresponda a cada área de manejo rural en la cual se encuentren. Cabe aclarar que este suelo de protección restringe, mas no se prohíbe, su posibilidad de urbanizarse y que dicha restricción se basa simplemente en el cuidado del acuífero. Para ser consecuentes con la sostenibilidad del desarrollo y el cuidado del ambiente se acogerán las disposiciones del Acuerdo C.D. 042 de 2010 de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) o las normas que lo complementen o sustituyan (POT, 2014)

El POT, solo restringe en áreas de recarga de agua subterránea la instalación de rellenos sanitarios, cementerios, industrias con actividades potencialmente peligrosas para la contaminación de las aguas subterráneas, estaciones de servicios con tanques enterrados, lagunas de tratamiento de aguas residuales y aplicación sobre el suelo productos que al lixiviarse por su composición físico, química o bacteriológica,

puedan afectar las características del agua subterránea en las zonas de recarga y en las zonas vulnerabilidad de estos a la contaminación (POT, 2014)

Desde punto de vista normativo las zonas de recarga de las aguas subterráneas se encuentran amparadas por la protección de las diferentes entidades encargadas de la conservación de los sistemas ambientales, además se debe tener en cuenta que a futuro el agua subterránea se convertirá en un agente clave para el abastecimiento de agua potable para la ciudadanía, debido a que la fuente de agua superficial en la actualidad se encuentra en un estado avanzado de deterioro ambiental creciente.

3.2 Marco conceptual

3.2.1 Gestión ambiental y Riesgo ambiental

La Gestión Ambiental se realiza por medio de políticas y planes de manejo ambiental, desempeña un papel importante en el manejo de los recursos naturales y que se encuentran estructurados desde la normatividad ambiental. La gestión busca mejorar o recuperar la calidad de los recursos naturales ya sea aumentando su resiliencia o su capacidad de respuesta ante amenazas antrópicas o naturales o bien reduciendo la amenaza o la vulnerabilidad, esta repuesta es el equilibrio de las cargas entre el desarrollo de la economía, el incremento exponencial de la población y uso de los recursos naturales, buscando proteger el ambiente y promueve el desarrollo sostenible a una escala y aprovechamiento razonable, para los diferentes niveles gubernamentales que formulan las políticas ambientales en acciones locales, regionales o nacionales.

El término de la gestión ambiental proviene de:

El postulado por el Club de Roma 1972 y en la Declaración de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, celebrada en Estocolmo, en 1972. Ambas circunstancias y los debates que suscitaron fueron críticos en destacar la forma irracional y acelerada en que la sociedad moderna utilizaba, gastaba o contaminaba los recursos naturales del planeta, para el año 2002 el tema de la gestión ambiental cala hondo y se enfatiza en su característica central de ser un mecanismo para garantizar el desarrollo humano y social en Condiciones de sostenibilidad de los recursos ambientales. La noción de sostenibilidad hace referencia a la oportunidad y necesidad de garantizar el desarrollo de la sociedad moderna sin comprometer el de las futuras generaciones por el

agotamiento o destrucción paulatina o acelerada de los recursos naturales, renovables y no renovables (Lavell & Latina, 1994)

La gestión ambiental puede ser correctiva, cuando se requiere remediar impactos ambientales generados por la degradación de los ecosistemas o prospectiva cuando se pretende anticipar y evitar impactos ambientales (Lavell & Latina, 1994). Sin embargo, la gestión ha sido poca o nula después de la revolución industrial, solamente en las tres últimas décadas se incorpora el término en entidades públicas encargadas del manejo de los recursos naturales y en las entidades privadas por medio de mecanismos de certificación industrial. La poca gestión ambiental que se ha tenido después de la revolución industrial lleva a plantear por parte de *Joao Pessoa en 1995* la hipótesis que la degradación ambiental incrementa la vulnerabilidad hacia los desastres (Fernández, 1996). Por lado, es importante notar como en la planificación de ciudades puede existir una relación directa entre la degradación ambiental y el incremento de la vulnerabilidad de la sociedad ante las amenazas que se encuentran expuestas. En la actualidad se puede encontrar que el desarrollo urbanístico de las ciudades se realizaba cerca a zonas inundables o lugares de pendientes altas, generando una exposición mayor a un evento de una amenaza.

Se ha observado que la actividad humana es la principal causante de la degradación ambiental, “ya que en el nombre de sostener a la sociedad y promover el desarrollo que la actividad humana que se convierte en una fuente principal de degradación ambiental” (Fernández, 1996, p.132). Es probable que el desarrollo de la expansión urbana pueda traer cambios significativos en la dinámica natural del agua subterránea tanto en cantidad y calidad. La pregunta a responder *¿será que la degradación ambiental se puede considerar como un desastre o riesgo lento, sabiendo que la recarga y la contaminación del agua subterránea altera la calidad de los sistemas ambientales que depende de ellas?*

El deterioro de las aguas subterráneas en las zonas urbanas se convierte en un riesgo tanto físico como de salud, que se encuentran asociados en general a problemas de subsidencia, accesibilidad y calidad del recurso hídrico, por ende es importante evaluar los procesos de urbanización que interviene en el deterioro del acuífero y como desde el punto de vista de la mitigación se podrá implementar acciones de conservación y protección de un recurso hídrico y que en la actualidad se encuentra amenazado por la expansión (Dávila-Pórcel, 2011), referencia que la Hidrogeología Urbana- HU, “investiga las condiciones hidrodinámica del agua subterránea, el uso y calidad de agua, así como el manejo, preservación y repercusión de los acuíferos de áreas urbanizadas y en sus alrededores orienta al

abastecimiento de la población.”. La HU juega un papel importante en la solución de problemas relacionados con la posible afectación que tendrá la unidad hidrogeológica ante agentes antrópicos.

La gestión ambiental debe de involucrar en sus apartados la evaluación del riesgo ambiental a que están expuestos los diferentes ecosistemas o recursos naturales, entre estos los acuíferos, que son vulnerables ante la amenaza que se materializa como el impacto negativo de una actividad antrópica, en particular la ocupación del suelo.

3.2.2 Vulnerabilidad de un acuífero

La vulnerabilidad es un concepto muy amplio dentro la comunidad científica y es aplicado a cada escala social, política, económica, cultural y técnica. Para efectos del estudio se tendrá en cuenta el concepto tal como lo define la Ley 1523 del 2012.

Vulnerabilidad: susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales y de apoyo que puede ser afectado por eventos peligrosos (Congreso de Colombia, 2012)

Para (Foster et al., 2015) la vulnerabilidad de un acuífero es la característica intrínseca que determina la sensibilidad ante una carga contaminante (Aguilar Duarte, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., & Delgado, 2013), entendiendo que la vulnerabilidad intrínseca es la susceptibilidad natural del medio hidrogeológico a la contaminación sin tener en cuenta la característica del agente contaminante, es decir que un acuífero es vulnerable dado a sus propiedades físicas como porosidad del material, condiciones de litológicas, estratigráficas, ambiente geológico. De igual forma definen la vulnerabilidad de un acuífero como “una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y/o naturales (Palmer, Holman, Robins, & Lewis, 1995).

Se observa que en general la vulnerabilidad intrínseca en los estudios hidrogeológicos se aplica a la calidad del agua más no a la cantidad del recurso hídrico subterráneo. Puede extenderse este concepto que la vulnerabilidad intrínseca a la recarga es la susceptibilidad que tiene el acuífero de impermeabilizar

alguna de sus capas o de perder la conexión entre los poros es decir que algunas de las partes de sus estructuras disminuyan su conductividad hidráulica.

3.2.3 Riesgo por agotamiento

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADS (2014) define el riesgo por agotamiento como sigue:

El agotamiento de un acuífero puede considerarse como una reducción en el volumen de agua en la zona saturada, es decir que para la evaluación se tiene en cuenta la relación de la oferta y la demanda del recurso actual o futuro, y como a futuro las diferentes acciones pueden poner en riesgo el agotamiento del acuífero, es de aclarar que el riesgo por agotamiento es independientemente de las condiciones de la calidad del agua de la unidad hidrogeológica, algunos efectos negativos es la reducción del volumen son los siguientes (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014):

- ◆ Profundización de los niveles freáticos.
- ◆ Reducción del flujo base de aporte del acuífero hacia quebradas o ríos que depende de dicha conexión.
- ◆ Cambio de la dirección de flujo del agua subterránea.
- ◆ Deterioro de la calidad del agua subterránea.
- ◆ Subsistencia del terreno.

Por otro lado, el agotamiento de las aguas subterráneas se puede ver desde dos perspectivas diferentes. En uno el agotamiento visto como una reducción en el volumen de agua en la zona saturada, independientemente de las consideraciones de calidad del agua. La segunda perspectiva es el agotamiento como una reducción en el volumen de agua joven en el almacenamiento (Konikow & Kendy, 2005), por otro lado (Moghaddam Nia, Khalighi, Salajegheh, Borji, & Malekian, 2018) considera que los cambios de coberturas naturales del suelo a diferentes usos como agrícola o urbanos han causado daños en la estructura del suelo y afectado la permeabilidad del suelo y por ende causado la interrupción de la recarga de agua subterránea, siendo unos efectos en el agotamiento de las aguas subterráneas no evaluados.

3.3 Marco teórico

3.3.1 Agua subterránea

Se considera agua subterránea aquella parte del agua del ciclo hidrológico que está bajo la superficie del terreno, es aquella que se encuentra bajo la superficie terrestre y ocupa los poros y las fisuras de las rocas más sólidas; representa una fracción importante de la masa de agua presente en los continentes, bajo la superficie de la Tierra, tanto en el suelo como en el subsuelo. El agua subterránea más profunda puede permanecer oculta durante miles o millones de años. No obstante, la mayor parte de los yacimientos están a poca profundidad y desempeñan un papel discreto pero constante dentro del ciclo hidrológico.

El agua subterránea se encuentra en un medio poroso denominado acuífero, los acuíferos se constituye un sistema de medio físico conformado por agua y poroso, y cuyo diámetro varía dependiendo del material que lo conforma (grava, arena, limo y arcilla), para el caso de acuíferos de porosidad primaria. El Decreto 1640 del 2012. “define un acuífero, como una unidad de roca o sedimento capaz de almacenar y transmitir agua, entendida como un sistema que involucra zonas de recarga, transición y descarga, así como la interacción con otras unidades similares, las aguas superficiales y marinas” (MADS, 2012, p.5). En la hidrología la definición de la palabra acuífero proviene del latín (aqua: agua y fero: llevar), el agua se encuentra confinada en una formación geológica, la cual puede ser rocas sedimentarias, rocas ígneas y metamórficas o sedimentos no consolidados. Los acuíferos de formación sedimentaria se pueden clasificar de la siguiente forma:

Por último, a nivel global el agua subterránea representa unas veinte veces más que el total de las aguas superficiales de todos los continentes e islas, de ahí la importancia de esta agua como reserva y como recurso de agua dulce. Además, tiene un importante papel en la naturaleza ya que es una gran reserva esencial para mantener el caudal de base de muchos ríos y la humedad del suelo en las riberas y áreas bajas.

3.3.2 Clasificación formaciones geológicas desde la hidrogeología

Las formaciones geológicas pueden clasificarse según su capacidad de almacenamiento de agua y su aptitud para dejar circular el agua en ellas. Según estas dos características (porosidad y permeabilidad) estas se clasifican como:

- ♦ Acuíferos: formaciones geológicas almacenan el agua y permiten su movimiento o flujo bajo la acción de los potenciales hidráulicos.
- ♦ Acuicluidos: formaciones geológicas que almacenan agua, pero no permiten su movimiento.
- ♦ Acuitardos: formaciones geológicas que almacenan agua tal como lo hacen los acuíferos, pero el movimiento del agua en estas es muy lento.
- ♦ Acuífugos: formaciones geológicas que no almacenan ni transmiten agua.

3.3.3 Definición de acuífero

Un acuífero es un cuerpo de rocas a través de las cuales el agua se mueve y, para lograrlo, estas rocas deberán ser: o bien permeables, es decir, deberán poseer una densidad alta de poros conectados como en el caso de rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, caliza fracturada y sin consolidar arena y grava zonas de escombros, flujos volcánicos porosas y permeables) o, altamente fracturadas como es el caso de las rocas ígneas y metamórficas (basaltos columnares, esquistos y granitos). La facilidad con que un fluido puede moverse en la roca o permeabilidad, se denomina comúnmente conductividad hidráulica (k) (Vélez Otálvaro, Pimienta Ortiz, & Quintero Vargas, 2011, p.114)

3.3.4 Tipos de acuíferos desde el punto de vista hidráulico

Los acuíferos pueden clasificarse según la posición estructural de las rocas respecto a la superficie, es decir respecto a las condiciones de presión hidrostática:

- ♦ Acuífero confinado. Se encuentra limitado por una capa confinante (acuicludo o acuífugo), tanto en su parte superior como en su base, todo el espesor del acuífero se encuentra saturado de agua, y la presión de ésta en los poros o fisuras es mayor que la atmosférica, de forma que cuando es perforado por un sondeo, asciende a su través quedando a un nivel por encima del punto en que la captación alcanza el acuífero. Cuando el nivel piezométrico se encuentra sobre la superficie del terreno el agua rebosa por la boca de la captación, formando lo que se conoce como un pozo artesiano o surgente (Figura 1).
- ♦ Acuífero libre: es una estructura geológica permeable y la cual se encuentra saturada hasta cierto nivel, el nivel de agua, por encima del cual existe una franja de terreno permeable no saturada, a través de la cual circula el agua de recarga. Un acuífero libre se caracteriza porque el agua almacenada asciende hasta el nivel que tiene en el acuífero, encontrándose la presión atmosférica.

El nivel que alcanza el agua en un pozo construido en un acuífero libre marca el nivel freático, que en este caso corresponde con el nivel piezométrico. (Figura 1).

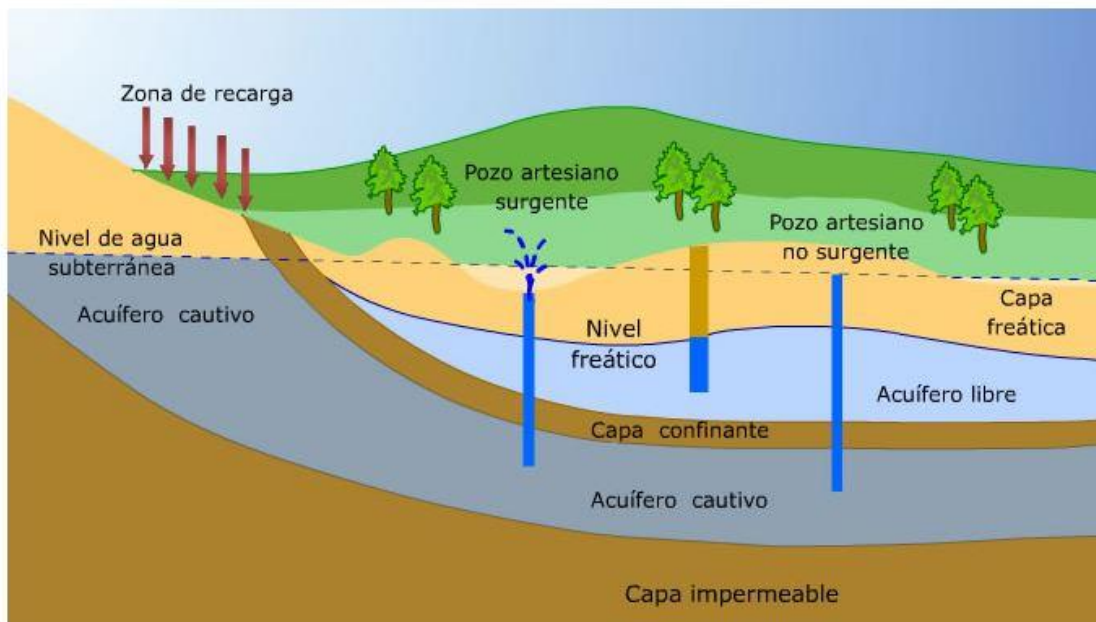


Figura 1. Acuífero confinado y libre

♦ (Tomado http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2584/html/12_aguas_subterneas.html)

- ♦ Acuífero semiconfinado: son aquellos donde el material que los rodea no son todos impermeables. Así, el paquete superior o semiconfinante lo constituyen formaciones semipermeables, que permiten el paso del agua de otros acuíferos superiores al inferior semiconfinado (Villanueva & Iglesias, 1990).
- ♦ Acuífero multicapas: es un caso particular (y frecuente) de acuífero en el cual se suceden niveles de distinta permeabilidad.

3.3.5 Tipos de acuíferos según su textura

Desde el punto de vista textural los acuíferos se dividen en dos grandes grupos: los porosos y fisúrales. Según sea la forma como se almacena y transmite el agua:

- ♦ Acuíferos fisúrales: son acuíferos en rocas ígneas y metamórficas en las cuales la permeabilidad primaria es de menor magnitud, pero puede almacenarse y transmitirse el agua a través de fracturas o diaclasas y zonas meteorizadas. A diferencia de los acuíferos porosos, su distribución

hace que los flujos internos de agua se comporten de una manera heterogénea, por direcciones preferenciales.

- ♣ Acuíferos porosos: en los acuíferos porosos el agua subterránea se encuentra embebida dentro de unos poros intercomunicados entre sí, y su textura (tamaño de grano) permite la conductividad hidráulica (permeabilidad) frente a un simple almacenamiento. Estos pueden subdividirse entre sedimentos consolidados y no consolidados
 - Acuíferos porosos consolidados. sus formaciones geológicas se componen de rocas sedimentarias consolidadas con diferente tamaño de grano (grava, limos arenas).
 - Acuíferos porosos no consolidados. acuíferos aluviales.

3.3.6 Acuíferos aluviales

Los sistemas fluviales están en constante cambios el flujo continuo de agua y el sedimento en una corriente de agua periódicamente desbordan sus orillas creando grandes llanuras de inundación y alternando procesos de deposición y erosión y que generalmente cambian su curso durante la inundación dejando atrás meandros cerrados (madreviejas). En la llanura de inundación o llanuras aluviales el río deposita arenas y grava gruesas en un lado a medida que erode la orilla opuesta de estos depósitos denominados depósitos aluviales. El aluvión es el material detrítico transportado y depositado transitoria o permanentemente por una corriente de agua, que puede ser repentina y provocar inundaciones; puede estar compuesto por arena, grava, arcilla o limo.

El acuífero aluvial incluye el agua que almacena el aluvión adyacente a la corriente principal y los acuíferos conectados hidráulicamente en sistemas de terrazas asociados a los depósitos cuaternarios aluviales en paleodrenajes; estos acuíferos se distinguen por su capacidad de almacenar grandes cantidades de aguas subterráneas incluso durante años de sequía

En Colombia el principal grupo de interés hidrogeológico lo integran los grandes depósitos de llanuras aluviales y sus sistemas de terrazas relacionadas asociadas con los grandes corrientes fluviales en especial de los ríos Magdalena Cauca Atrato Sinú Meta César). El segundo grupo lo constituyen los abanicos aluviales y los grandes depósitos de piedemonte localizados tanto en los valles interandino en los bordes llanero y amazónico)(Vélez Otálvaro et al., 2011)

3.3.7 Recarga de un acuífero

Uno de los componentes claves del modelo conceptual es la identificación de las zonas de recarga y descarga de agua subterránea. La recarga se define como un proceso de movimiento de agua hacia abajo a través de la zona saturada bajo las fuerzas de la gravedad o en una dirección determinada por las condiciones hidráulicas. En un sentido más amplio, el proceso de recarga es más complicado. Quizás uno de los factores más importantes es el tiempo de demora entre el período en que el agua meteórica entra en la zona saturada y el período de tiempo en el que se manifiesta como una fuente de agua subterránea efectivamente explotable. (Simmers, 1988a), la recarga de un acuífero se encuentra condicionada por otros factores como los geológicos y geomorfológicos, como por ejemplo un factor geológico es una falla estructural, tipo de roca, mientras que para un factor geomorfológico son el tipo de sedimento en el que se encuentra conformado la zona de recarga (arena o grava), pero también existen otras características como lo es la pendiente de terreno, uso de suelo y textura del suelo (Palacio, 2007).

La recarga de agua en un acuífero es considerada como la cantidad de agua que contribuye al aumento temporal o permanente del almacenamiento de agua de la unidad hidrogeológica, debido a la complejidad del proceso se considera que la recarga sucede en un intervalo de tiempo que puede ser de unas horas, días o incluso años. Por ser una variable que depende de varios parámetros para determinar el volumen de agua o caudal que ingresa a la unidad hidrogeológica es quizás uno de los parámetros más complejo de calcular debido que involucra múltiples factores físicos de la zona en que se origina, entre uno de ellos es el retardo que tiene el agua precipitada en pasar por un medio poroso saturado, proceso que se le conoce como infiltración y el periodo el cual se manifiesta como una fuente de agua subterránea aprovechable a este proceso se le conoce como percolación (Simmers, 1988b).

Por otro lado la recarga depende inicialmente del proceso de infiltración que se define como el resultado de la permeabilidad del suelo y de la saturación del mismo y el cual va infiltrar a una velocidad, el proceso de infiltración depende de dos componentes textura del suelo y capacidad de saturación del suelo, este último sucede cuando la textura porosa del suelo se encuentra llena de agua y no puede seguir infiltrando y comienza el proceso de escorrentía superficial, otro proceso que sucede con la infiltración es la percolación y ocurre cuando el estrato de la columna del suelo se encuentra húmedo a capacidad de campo y cuando la velocidad de infiltración es superior a la tasa de transpiración del suelo. La percolación puede estar en todas las direcciones del plano cartesiano e incluso ir en contra de la gravedad ya que se encuentra impulsado por el gradiente capilar (Seiler, K. P., & Gat, 2007). Según el tiempo en que se demora la recarga se puede clasificar de la siguiente forma:

- ◆ Corto plazo: este tipo de recarga ocurre después de un periodo seco donde el suelo no tiene agua en medio de sus poros, por lo cual gran parte del agua que llega al suelo se infiltra y percola hacia el acuífero y generalmente se origina en depósitos no consolidados.
- ◆ Recarga temporal: por lo general ocurre cuando una columna de suelo empieza a reducir la humedad facilitando el movimiento del agua por medio de los poros.
- ◆ Recarga permanente: esta recarga por lo general se encuentra dada volúmenes de agua que se almacenan en la superficie y que drenan hacia el acuífero y el fenómeno ocurre en todo el año.
- ◆ Recarga histórica: este tipo de recarga es la que ha contribuido a la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo. La recarga histórica se encuentra relacionada con el tiempo de residencia del agua en el acuífero.

Existen diferentes formas de recarga de un acuífero las cuales se pueden clasificar de la siguiente manera (Victoria & Otálvaro, 2004).

- ◆ Recarga difusa: proviene del agua lluvia y según déficit de humedad en el suelo y una vegetación de pasto hace que el agua se infiltre directamente en el acuífero.
- ◆ Recarga indirecta: producto del aporte del agua superficial de cauces permanentes o estacionales, también puede ser del aporte de los sistemas de riego agrícola.
- ◆ Flujos laterales: ocurre del aporte de otros acuíferos.
- ◆ Recarga urbana: producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado

Existen diversos métodos para la cuantificación de la recarga de agua subterránea. Tal como lo menciona (Victoria & Otálvaro, 2004), el concepto de tipo de recarga es importante para la planificación del recurso hídrico y el transporte de contaminante, debido a que determina la cantidad de agua que reciben los acuíferos, su calidad, procedencia y área donde esta se presenta. Existen varios métodos de cuantificar la recarga de agua subterránea. A continuación se mencionan los métodos más importantes planteados (Figura 2).

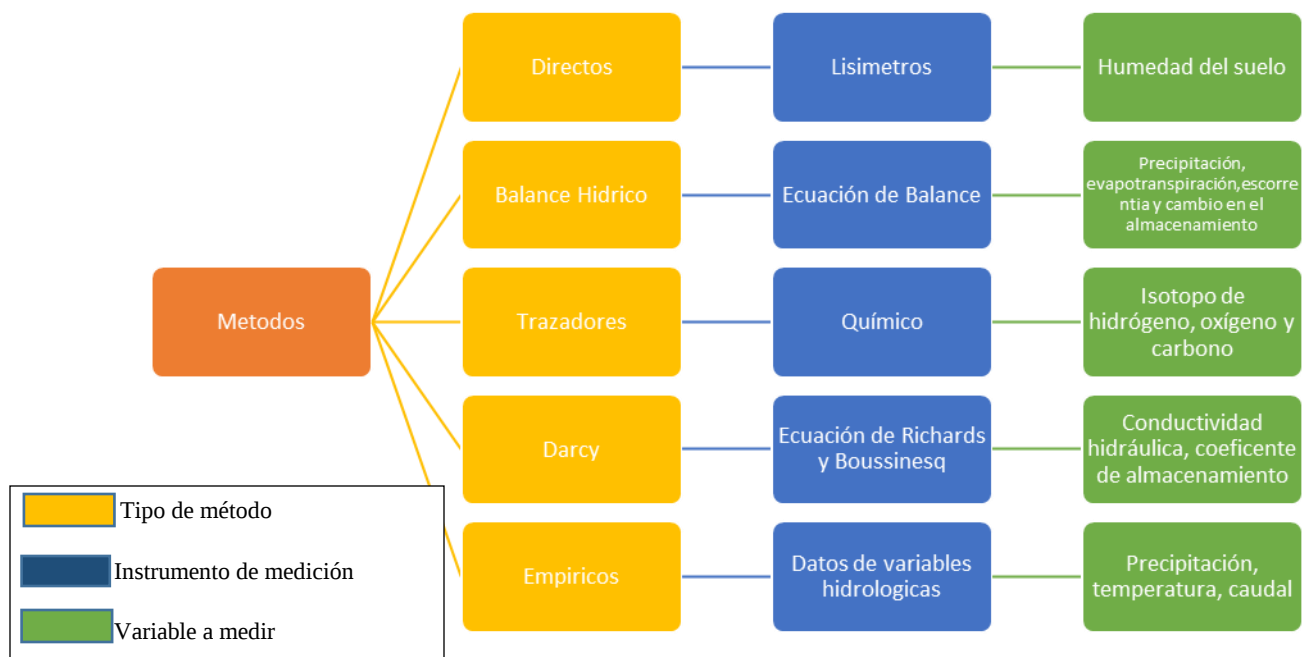


Figura 2. Métodos para la cuantificar la recarga, Tróchez, 2016

3.3.8 Porosidad y Permeabilidad del suelo

Porosidad del suelo: porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. En general, se compone de 50% materiales sólidos (45% minerales y 5% materia orgánica) y 50% de espacio poroso en el cual se distinguirán entre macro y micro poros donde agua, nutrientes, aire y gases pueden circular o retenerse. Los macro poros no retienen agua contra la fuerza de la gravedad, son responsables del drenaje, aireación del suelo y constituyen el espacio donde se forman las raíces. Los micro poros retienen agua y parte de la cual es disponible para las plantas (ONUAA, 2019)

Permeabilidad del suelo: el coeficiente de permeabilidad, se refiere a la capacidad de un material poroso, de transmitir agua y se define como el volumen de agua que se mueve a través de un medio poroso en la unidad de tiempo bajo un gradiente hidráulico y a través de la unidad de sección transversal perpendicular a la dirección de flujo. Tiene las dimensiones (L/T). Depende del tamaño y la forma de los intersticios, del grado de su interconexión y de las propiedades físicas del fluido. Si los conductos que comunican los poros son pequeños, el flujo del agua de uno a otro se ve dificultado y la conductividad hidráulica es baja. En un sedimento más oes una característica del medio poroso y depende de la porosidad eficaz (es la cantidad de agua por unidad de volumen que retiene el acuífero). Una definición es la que se hace a continuación:

3.3.9 Modelo conceptual de un acuífero

Para conocer la dinámica de un acuífero, es necesario la construcción de un modelo conceptual para esquematizar las condiciones hidrogeológicas reales, simplificar el problema de campo. y organizar los datos de manera que el sistema pueda ser analizado de manera efectiva (Betancur, Mejia, & Palacio, 2009).

Los modelos hidrogeológicos conceptuales son representaciones en dos o tres dimensiones de las condiciones estáticas y dinámicas de sistemas hidrogeológicos. Esta representación incluye la geometría de los acuíferos, delimitación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con sus posibilidades de almacenar y transmitir agua, características hidráulicas de los acuíferos, posición de los niveles piezométricos, condiciones del flujo de las aguas subterráneas y su relación con los componentes del ciclo hidrológico, características hidroquímicas y eventualmente isotópicas y delimitación de zonas de recarga, tránsito y descarga. En términos generales, sintetiza las condiciones básicas del estado y dinámica de las aguas subterráneas en el subsuelo y sus relaciones con los cuerpos de agua superficial y los aportes atmosféricos. Se realiza con base en el análisis e interpretación de información geológica, hidrológica, hidráulica, hidroquímica e isotópica y permite tener una visión del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos de un área dada a la escala deseada (IDEAM, 2013)

3.3.10 Modelación Numérica de Acuíferos

La Implementación de la modelación hidrogeológica, cualquiera que sea su propósito, explotación o control de la contaminación, se constituye una herramienta fundamental para toma de decisión, también es de gran utilidad ya que ayuda a economizar tanto en tiempo como en costos en la obtención de los parámetros físicos del acuífero.

Es posible obtener la recarga mediante modelación numérica de los acuíferos ya que estos se presentan como una alternativa a la comprensión de la dinámica del agua en un estrato poroso. Para la modelación numérica se ejecutan los modelos matemáticos mediante elementos finitos y o diferencias finitas. Ambos métodos se utilizan para la solución de problemas de flujo unidimensional, flujos estables e inestables en estratos saturados, y la diferencia de ambos métodos se encuentra en la estructuración de la

espacialización del modelo: mientras que el de diferencia finita se resuelve por medio de bloques el de elementos finitos se resuelve por medio de nodos

El método de diferencias finitas

Es una técnica de aproximación numérica que ha sido empleado para resolver ecuaciones diferenciales en los problemas con valores de frontera. Debido a que las ecuaciones diferenciales parciales se encuentran con frecuencia en problemas de flujo de las aguas subterráneas, el esquema de diferencias finitas para la ecuación de difusión unidimensional se introduce como una formulación básica para la discretización en estas

Las condiciones iniciales y de frontera, especifican las condiciones de flujo en todos los puntos dentro del dominio en un cierto tiempo inicial, es decir, t_0 . En general, hay tres tipos de condiciones borde diferencial (parcial)

- ♦ Condición de Dirichlet: la condición de contorno de primer grado en la que los valores de las variables se definen en las fronteras del dominio.
- ♦ Condición Neumann: la condición de contorno de segundo grado en la que los valores de los derivados en la dirección normal a la frontera solamente se especifican.
- ♦ Condición Robin: la condición de contorno de tercer grado es una combinación de las dos anteriores.

La mayor parte de las condiciones de contorno se encuentran en flujo de agua subterránea son condiciones de Dirichlet o Neumann.

Método de elementos finitos

Se utiliza por lo general en acuíferos no homogéneos y anisotrópicos con formas complejas en sus condiciones de contorno. El método de los elementos finitos (FEM) es bastante flexible y potente para hacer frente a tales situaciones, este método posee sus ventajas cuando se divide una porción del dominio de flujo en elementos más pequeños para estudiar los patrones de dirección de flujo de agua subterránea en detalle.

La implementación de la modelación hidrogeológica, cualquiera que sea su propósito, explotación o control de la contaminación, se constituye una herramienta fundamental para toma de decisión, también es de gran utilidad ya que ayuda a economizar tanto en tiempo como en costos en la obtención de los parámetros físicos del acuífero. Un ejemplo de un modelo numérico es el MODFLOW (Hydrogeologic, 2011), es un modelo tridimensional de aguas subterráneas en diferencias finitas que simula los flujos estacionarios y no estacionarios en configuraciones irregulares, en las cuales los acuíferos pueden ser confinados y no confinados. Para el caso práctico la ecuación más general para flujo transitorio en tres dimensiones para un acuífero confinado en un medio heterogéneo y anisotrópico es:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(K_x \frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(K_y \frac{\delta h}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(K_z \frac{\delta h}{\delta z} \right) - Q = S_s \frac{\delta h}{\delta t}$$

Donde:

- ♦ h carga hidráulica, (L)
- ♦ K_x, K_y, K_z componentes de la conductividad hidráulica en las direcciones x, y, z (L/T)
- ♦ T_x, T_y, T_z componentes de la transividad hidráulica en las direcciones x, y, z , para acuíferos confinados $Kh = T(x, y, z)$, (L/T²);
- ♦ Q fuente o sumidero local por unidad de volumen, (1/T);
- ♦ S_s coeficiente de almacenamiento específico, (L-1);
- ♦ x, y, z coordenadas espaciales, (L)
- ♦ t tiempo, (T).

3.4 Variabilidad Climática.

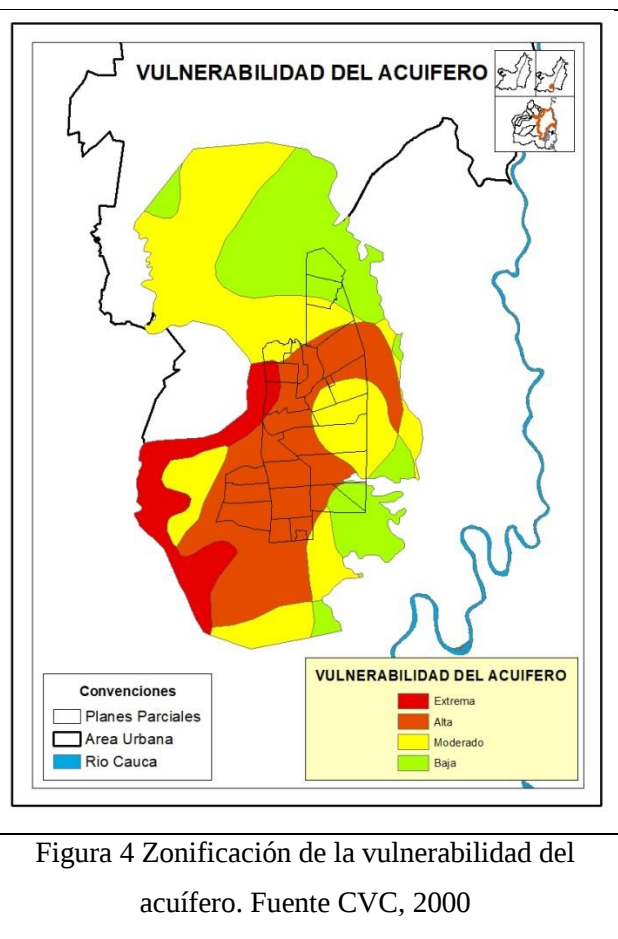
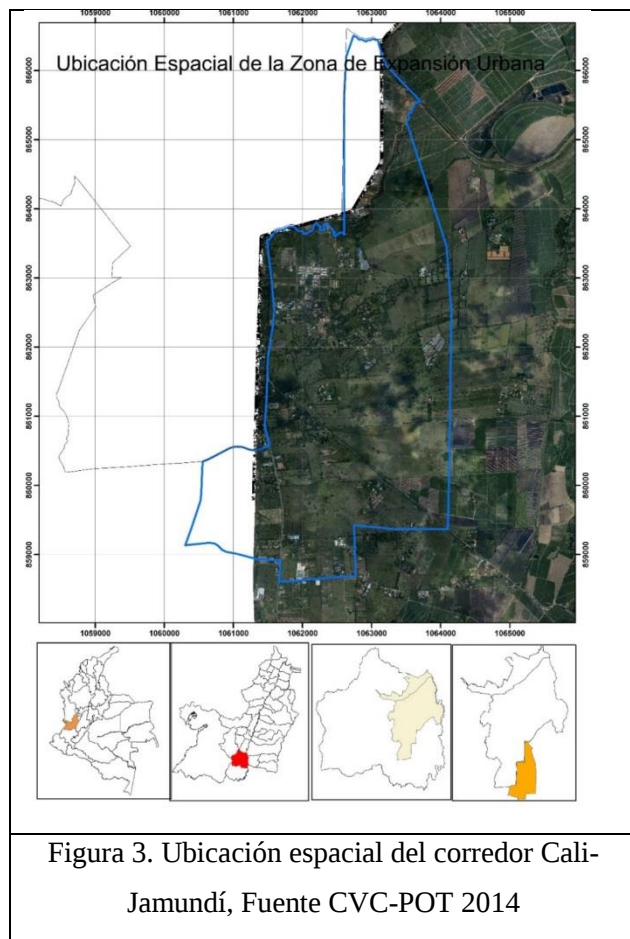
La Variabilidad Climática se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos de tiempo relativamente cortos. La normal del clima representa el valor promedio de una serie continua de mediciones de una variable climatológica durante un período de por lo menos 30 años. A la diferencia entre el valor registrado de la variable y su promedio se le conoce como anomalía (Bocanegra, M., Edgar, J., & Caicedo, 2000). Existe una variabilidad climática cuando los patrones anuales del comportamiento físico se alejan del valor climatológico esperado; es decir, se tiene una variabilidad interanual de las variables. En general, el comportamiento de las variables atmosféricas, oceánicas y de la superficie terrestre es diferente cada año; sin embargo, sólo cuando se observan valores extremos que se alejan mucho del valor climático es cuando la variabilidad climática es importante. Actualmente se ha identificado al evento de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) como un fenómeno de escala planetaria que se cree es la causa principal de la variabilidad climática observada en distintas regiones del mundo. Es muy importante tener presente un análisis de la variabilidad climática, debido a que una variación de las

precipitaciones en zonas húmedas y se materializan en diferentes recargas sobretodo en acuíferos aluviales.

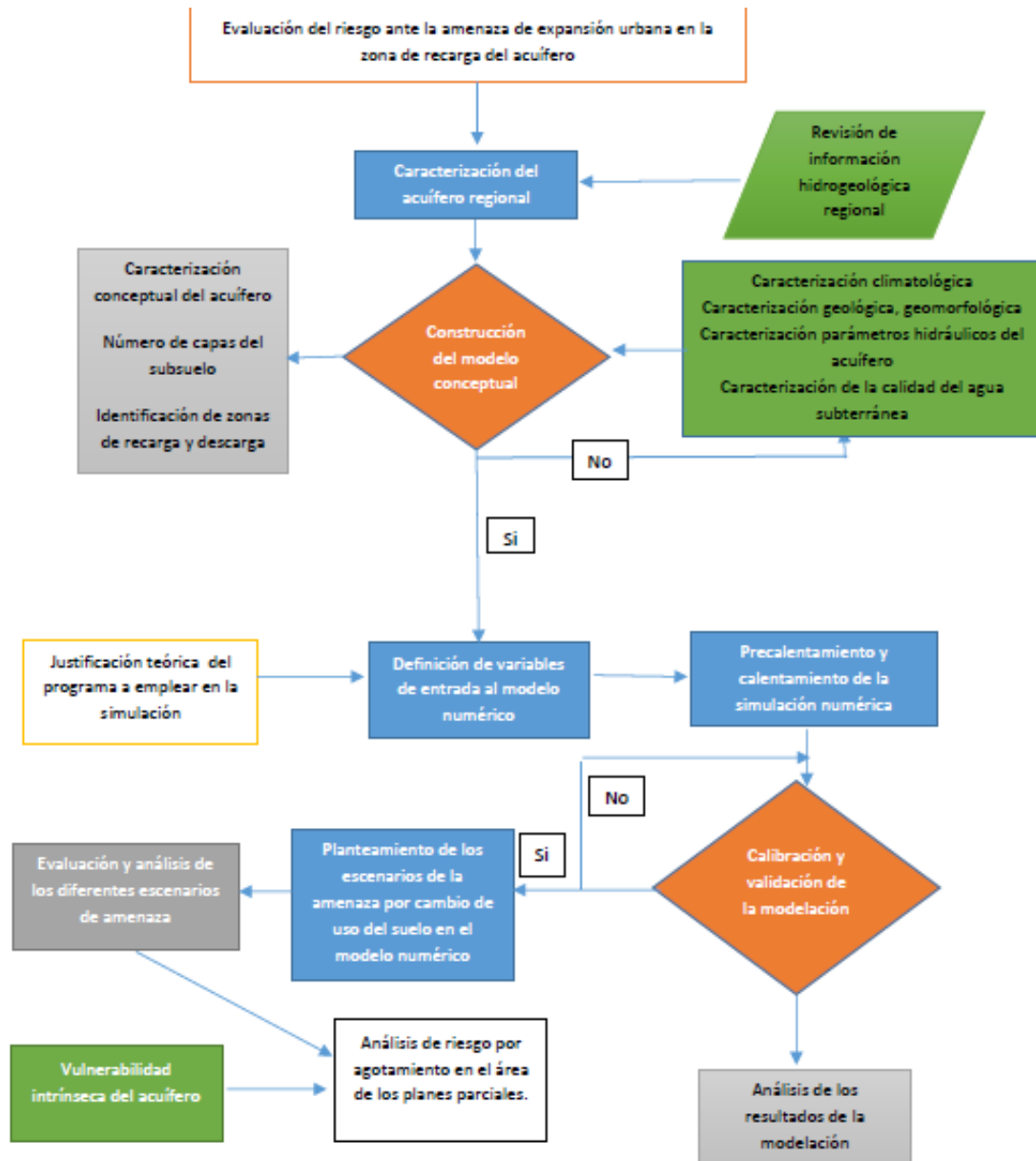
4. Descripción y localización de zona de estudio

El área de expansión Corredor Cali – Jamundí Figura 3, se encuentra localizada al sur de la ciudad y corresponde a un área de 1629 hectáreas, en el contado oriental de la vía férrea y calles 25 y 36. El corredor de carácter regional comunica a Cali con Jamundí de manera inmediata y con los municipios del sur del país, El Plan de Ordenamiento Territorial (POT) –Acuerdo N° 069 de 2000– declaró como única área de expansión y éste se delimita por las carreras 48 y 50 al norte; las carreras 134, 141 y 143 al sur; las calles 18, 25, 42 y 48 al occidente; y las calles 48, 60, 61 y el borde del Cinturón Ecológico al oriente. (Cristina & Valencia, 2014)

En la actualidad la zona proyectada de expansión urbana en el municipio de Santiago de Cali se encuentra dentro del área de recarga del acuífero del departamento del Valle del Cauca, por la cual reúne ciertas condiciones hidrogeológicas, que la convierte en una zona vulnerable a la contaminación tal como se ha identificado por parte de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC. En la Figura 4, es posible que los cambios de uso del suelo que plantea el desarrollo urbanístico parcial o total en el área de estudio pueda afectar de manera drástica el comportamiento hidráulico del sistema acuífero, en cuanto a la capacidad de almacenar agua en los estratos porosos.



5. Metodología



Realizar la modelación de flujo de agua subterránea de la zona de estudio para determinar la dinámica del acuífero

- ♦ *Determinar el contexto regional y local del acuífero en la zona de estudio*

A partir de información secundaria, número de estratos permeables, zonas permeables, parámetros hidrogeológicos, recarga hídrica e importancia de su aprovechamiento del recurso para el departamento. A partir de la información se determinará la escala de trabajo, la conformación del acuífero en la zona de estudio, con la construcción de las columnas litológica, describiendo tipo conformación de material sedimentario del área de análisis,

comportamiento de la precipitación neta de la zona, de igual forma se calculará las variables hidráulicas del acuífero, con los resultados del modelo se calcularán los balances hidrogeológicos por plan parcial a partir del modelo numérico.

- ♦ *Construir un modelo litológico del acuífero de la zona de estudio*

Con los insumos anteriores consolidados y validados se realizarán las correlaciones litológicas, y posterior a ello la construcción del modelo conceptual del acuífero a evaluar, la cual ayudará a identificar las posibles áreas permeables dentro de la zona de análisis. También esta fase se caracterizará las dimensiones de rejilla de entrada al modelo numérico, en las tres direcciones del plano cartesiano (x , y , z), la caracterización (x , y) servirá para determinar si una cuadrícula tendrá las dimensiones de una manzana construida o si una cuadrícula tendrá las dimensiones de un conjunto residencial, por último, la profundidad (z) definirá el número de espesores que se utilizará para el modelo numérico. Por último, se determinarán las condiciones de frontera del modelo numérico que será generado a partir del análisis de los límites físicos del acuífero.

- ♦ *Modelación Numérica Hidrogeológica*

A partir de la información del modelo conceptual del acuífero, se realizará una modelación hidrogeológica con las condiciones actuales de la zona de estudio, para esto se debe tener en cuenta las diferentes variables de entrada que utiliza el software Visual Modflow, las cuales serán insumo para la calibración y validación de las condiciones iniciales, también en esta fase se observará los niveles freáticos, indicado la profundidad en la que se encuentra la tabla de agua y determinando la posible vulnerabilidad a la que se encuentra el acuífero a la intervención antrópica.

Evaluar diferentes escenarios de generación de ocupación urbana para determinar la amenaza que se podría generar hacia el acuífero de la zona de estudio.

- ♦ *Planes Parciales.*

Se revisará la información de los diferentes planes parciales propuesto dentro de la zona de estudio, identificado cuales son las áreas a construir y tipo de construcción que se realizará dentro las áreas, también se deben de identificar las vías y zonas verdes.

- ♦ *Determinar el modelo de ocupación teniendo en cuenta como la variable de la amenaza hacia el acuífero.*

Determinar los elementos estructurales de cada uno de los planes parciales que se desarrollarán en la zona de estudio y que puedan afectar la dinámica natural del acuífero, una

vez identificado dichos elementos estructurales se pasará a la evaluación por medio modelación numérica ayudando a determinar los impactos que tengan cada uno de ellos.

- ♣ *Número de Escenarios de Modelación de la amenaza.*

Se determinarán los escenarios de modelación la amenaza a partir de los resultados obtenido en la modelación numérica del área de análisis y de acuerdo a la prioridad de los diferentes planes parciales. Para ello se realizará una matriz de decisión escogiendo los escenarios más probables y críticos en la zona de estudios.

Proponer unas pautas de ocupación que puedan utilizar para la mitigación del riesgo por agotamiento reduciendo la amenaza al que está sometido el acuífero en la zona de expansión urbana.

- ♣ *Reducir el riesgo a través de la amenaza*

Una vez realizado los escenarios de modelación de la amenaza, se pretende plantear una zonificación de la ocupación urbana, para que dicho desarrollo urbanístico tenga el menor impacto negativo en el agotamiento del recurso hídrico.

- ♣ *Determinar pautas de desarrollo sustentable en el acuífero.*

A partir de los insumos generados de la modelación y de los diferentes escenarios de riesgo que se tendrán de la zona de estudio, se plantearán pautas de conservación y sustentabilidad ambiental de los recursos hídrico del punto de vista de la planificación y ordenamiento urbano de la zona de estudio a evaluar.

6. Cálculos y resultados del modelo numérico

6.1 Línea base

6.1.1 Caracterización del acuífero regional del Valle del Cauca

De acuerdo con el estudio de la reglamentación integral participativa (CVC, 2012), el sistema acuífero del valle aluvial del río Cauca, hacia el piedemonte de las cordilleras Occidental y Central se localizan los conos aluviales que se caracterizan por tener sedimentos de en todas las gradaciones desde muy gruesa como cantos y bloques y que van decreciendo en la medida se aproxima hacia la parte plana de llanura aluvial del río Cauca, constituida por depósitos del propio río como arcillas Estos sedimentos que se encuentran en el subsuelo han sido transportados y depositados tanto por el río Cauca y sus afluentes

durante miles de años en la zona plana del departamento del Valle del Cauca y logrando conformar un relleno sedimentario con depósitos recientes cuaternarios de una área aproximada de 6900 km². Este depósito se encuentra dentro de la gran “Fosa del Cauca” formada por movimientos tectónicos hace millones de años; al sur esta fosa tiene unos 40 km de ancho y más de 1000 m de profundidad en el corregimiento de Rozo, municipio de Palmira, con sedimentos aluviales recientes y aluviales compactados y semi compactados de las formaciones del Terciario. Al norte el depósito es más estrecho y de menor profundidad y se aprovechan, también, acuíferos en sedimentos del Terciario de las formaciones La Paila y Zarzal principalmente.

En la Figura 5, se presenta la localización general del sistema acuífero en el departamento del Valle del Cauca, como relleno aluvial reciente presenta tres niveles de sedimentos (superior, intermedio e inferior), con características hidrogeológicas muy bien definidas, pero hacia los conos aluviales y conos de deyección se pierde esta diferenciación y se presenta una secuencia alterna de grandes capas permeables con algunas intercalaciones de capas semipermeables e impermeables de diferente espesor y granulometría

El nivel superior (Unidad A) en los estudios hidrogeológicos isotópicos e hidrogeoquímicos regionales definen el nivel superior del sistema acuífero del cuaternario; con una profundidad máxima de 150 m y mínima de 60 m en algunas zonas próximas al río Cauca, (espesor promedio de 120 m) con un 35% a 40% de capas acuíferas (45 m en promedio). Los acuíferos de esta unidad van de libres a semiconfinados, con capacidades específicas entre 3 y 10 l/s/m, con una reserva de agua en este nivel superior del depósito aluvial de 10000 millones de m³ en todo el valle geográfico del río Cauca.

El nivel intermedio (Unidad B) entre los 120 - 200 m de profundidad son unidades litológicas arcillosas aunque es posible encontrar limos, lentes de arenas y gravas finas de poco interés hidrogeológico.

El nivel inferior (Unidad C) aún no está bien definida; sólo se conoce parcialmente la localización del techo de este nivel que coincide con el límite inferior del nivel intermedio. El volumen total de agua almacenada en todo el sistema acuífero, hasta 400 m de profundidad conocida, se estima de alrededor de 40000 x10⁶ m³

Por otro lado, la recarga natural anual promedia que recibe este sistema acuífero es de aproximadamente 325 mm que equivale un 20% de la precipitación promedia anual de la cuenca (1550 mm), para un volumen anual de recarga de 3500 x 10⁶ m³ que se puede considerar como el máximo volumen de agua

aprovechable para garantizar la sostenibilidad del recurso respecto a cantidad. De igual forma el volumen extracción del aprovechamiento del recurso hídrico en los últimos 10 años oscila entre $(400 \text{ y } 600) \times 10^6 \text{ m}^3$ que representan entre el 11% y el 18 % de la recarga total anual, que garantiza a nivel regional, mantener el sistema acuífero en equilibrio

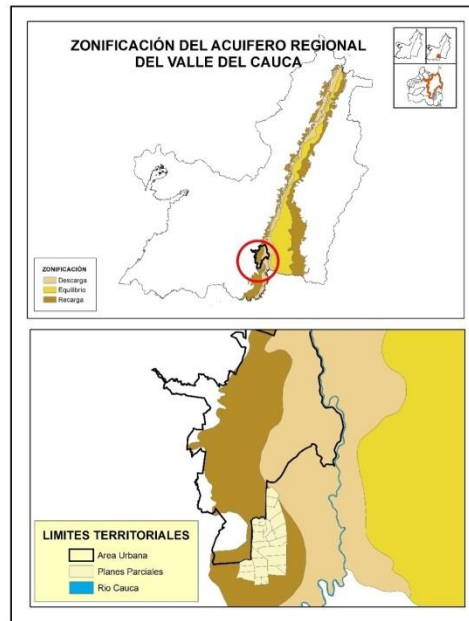


Figura 5. Zonificación del acuífero del Valle del Cauca Fuente CVC

6.1.2 Caracterización geológica y geomorfológica del área de estudio

En el área delimitada para realizar el análisis hidrogeológico es de 7664 ha, y con el análisis geológico y geomorfológico que se realizó de las áreas de drenaje se encuentra que predominan dos unidades geológicas y geomorfológicas:

- ♦ Unidades geológicas: un área aproximada de 5384.9 ha que equivalen al 70.3% del cono aluvial del río Pance, y un 29.7% de cono aluvial del río Meléndez con un área aproximada de 2279 ha, La diferencia entre estas dos unidades geológicas radica en el origen de los materiales mientras que en la cuenca del río Pance el aporte de canto y grava es mayor dado al origen geológico y estructural que la conforma, en la cuenca del río Meléndez el aporte de material a la zona plana es limos y arcillas
- ♦ Unidades geomorfológicas: abanicos subcrecientes de piedemonte en depósitos superficiales clásticos hidrogénicos con un área total 5873.2 ha, aproximadamente el 76.4% del área total, se caracteriza por encontrarse entre la transición del piedemonte aluvial de los conos y la zona plana

del valle geográfico, mientras que la parte alta de la zona análisis en menor proporción se encuentra abanicos de piedemonte en depósitos superficiales clásticos hidrogravigénicos e hidrogénicos con un área de 1790.8 ha, equivalentes a al 23.3%, del total que son abanicos hidrogravigenicos se encuentran muy realizados con los depósitos de las avenidas torrenciales de los ríos circundantes en la zona.

- ♦ Unidades de suelos: en el área se encuentran las consociaciones: Comfandi y Tortugas, con un porcentaje 45.64% y 24.19% respectivamente

En la Figura 6, se identifica las unidades geológicas y las unidades geomorfológicas presentes en el área de análisis para la modelación numérica

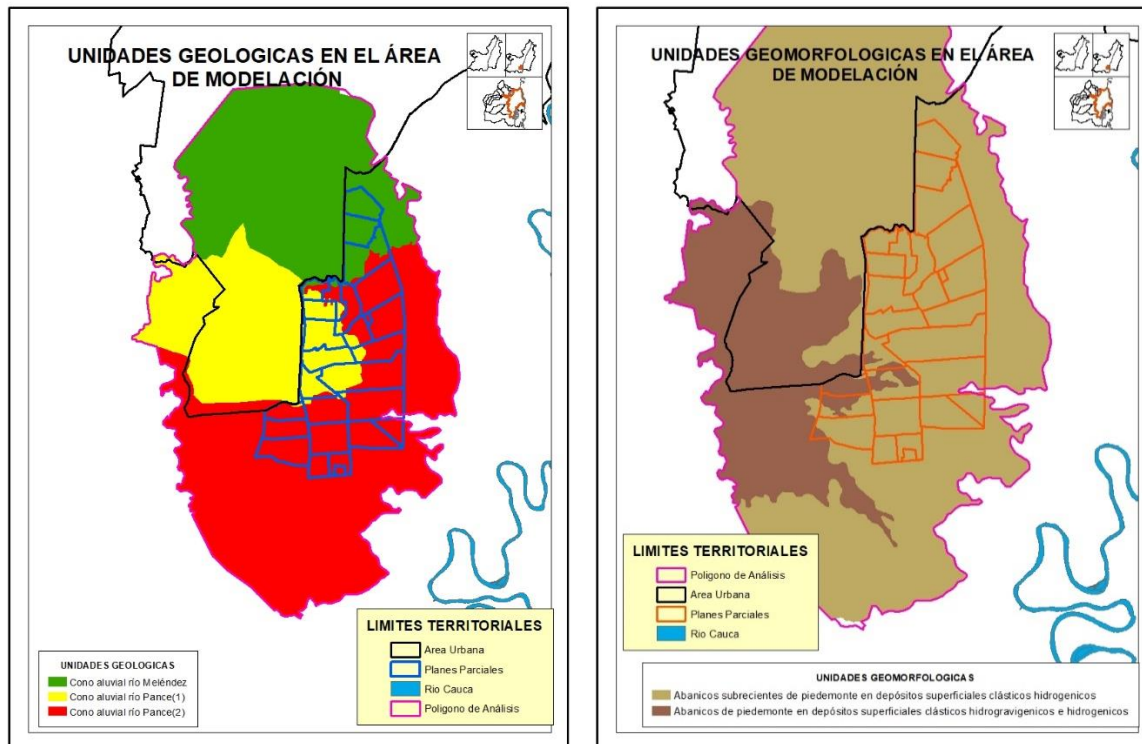


Figura 6 Unidades geológicas (Izq.), Unidades geomorfológicas (Der) en el área de expansión análisis

Fuente CVC

6.1.3 Análisis de la precipitación efectiva

El Soil Conservation Service de los Estados Unidos de América (SCS) (Mishra, SK, & Singh, 2013) , desarrolló el método número de CN SCS para calcular la intercepción, la detención superficial y la infiltración. El número de curva varía en un rango de 1 a 100, existiendo una función de las siguientes

propiedades productoras de escorrentía de la hoya hidrográfica: (I) tipo de suelo hidrológico, (II) utilización y tratamiento del suelo, (III) condiciones de la superficie del terreno, y (IV) condición de humedad antecedente del suelo (Monsalve Sáenz, 1999). De acuerdo con el método descrito, la precipitación efectiva o de escorrentía se estima de la siguiente forma:

$$Pe = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S}$$

Ecuación 1 Precipitación Efectiva.

S = Retención potencial máxima, mm

P = Precipitación total, mm

Pe = Precipitación efectiva, mm

0.2 S = Pérdidas iniciales = 20%

0.8 S = Infiltración durante la ESD = 80%

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \text{ [pulg.]}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \text{ [mm]}$$

Resultados

A continuación, se muestra la precipitación efectiva anual y mensual multianual obtenida para cada una de las áreas de drenaje analizada Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. Precipitación efectiva anual y mensual multianual.

Área Drenaje	Precipitación Efectiva [mm]												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Río Lili	77	71	111	184	141	48	30	26	25	113	131	125	999
Río Meléndez	104	98	144	234	184	63	34	34	44	164	185	172	1065
Río Pance	107	94	149	241	175	62	35	33	45	179	204	173	1516
Zona baja río Jamundí	68	68	95	163	133	48	30	20	30	125	129	108	1030
Zona baja ríos L-M-C	54	52	71	142	113	36	26	19	19	83	97	79	773

Fuente Propia

La precipitación efectiva tiene un régimen bimodal, con dos períodos húmedos en los meses marzo-abril-mayo y octubre-noviembre-diciembre; y dos períodos menos lluviosos en los meses enero-febrero y junio-julio-agosto-septiembre. Se observa que el área de drenaje con mayor precipitación efectiva es la

cuenca del río Pance, la cual se encuentra influenciada por el comportamiento climatológico del sistema montañoso denominado Farallones de Cali. El área de drenaje con los menores valores de precipitación efectiva corresponde a la zona baja de los ríos Lili-Meléndez-Cañaveralejo, en la zona plana de la cabecera municipal de la ciudad de Cali. A continuación, se determina la precipitación efectiva empleando la ecuación 1 en la zona de análisis

Tabla 2. Precipitación efectiva en el área de la zona de expansión

Precipitación Efectiva Multianual [mm]												
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
59	63	85	148	123	44	28	20	30	103	117	98	900

Fuente Propia

6.1.4 Topografía del área de análisis

De acuerdo con el Modelo Digital de Terreno-MDT, a escala 1:2000, el área de modelación numérica presenta elevaciones que varían dese 1168 hasta 975 msnm. El MDT (Figura 7), se identifica el rango de elevación mostrando que hacia la parte nororiental de la zona de análisis posee una menor elevación con respecto a la zona suroccidental, es decir que posiblemente los depósitos de canto y grava se encuentran hacia esta zona.

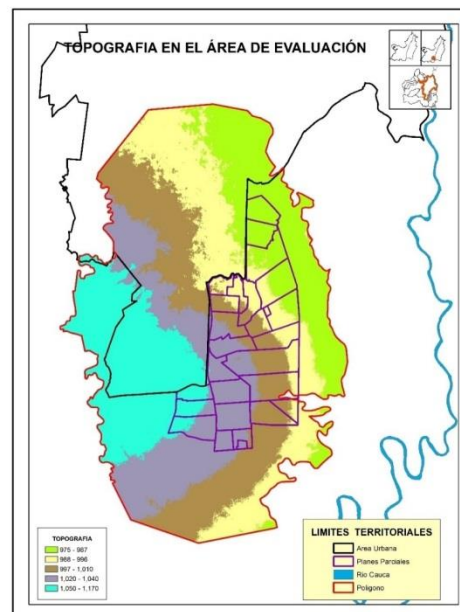


Figura 7. Topografía de la zona de modelación Fuente CVC

6.2 Modelo conceptual y modelación numérica

A partir del análisis de la caracterización anterior del área de interés se construyen las correlaciones estratigráficas, se determina la dirección de flujo con la información de las mediciones de los niveles freáticos de los pozos de aprovechamiento de agua subterránea de la unidad hidrogeológica A.

6.2.1 Correlaciones estratigráficas zona de expansión urbana.

Las correlaciones son elaboradas a partir de la información de las columnas litoestratigráficas y de la cota de elevación de terreno llevada a partir del MDT de la zona de análisis (Figura 8). Se tuvieron en cuenta que la mayoría de los trazos abarcaran el área de propuesta como zona de expansión urbana obteniendo un mayor detalle en cuanto a la dinámica del depósito de los sedimentos la elaboración de las correlaciones están en sentido Suroccidente-Nororiente y Occidente-Oriente como lo muestra la siguiente figura.

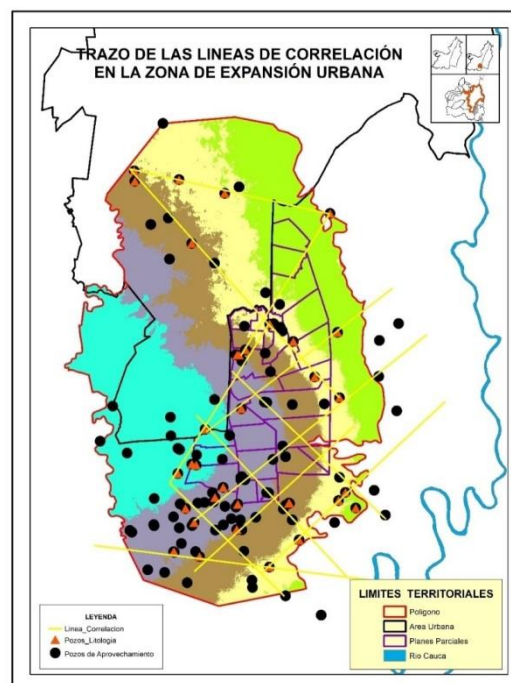


Figura 8. Especialización de las cortes para las correlaciones litológicas

La zona de análisis cuenta con un total de 120 pozos de aprovechamiento de agua subterránea de los cuales 35 pozos poseen información de su litología) Ver Tabla 3. De acuerdo, con la litología de cada uno de los pozos que se utilizaron para la elaboración de las correlaciones y con análisis del material que se encuentran de cada una de las columnas litológicas, se observa que el material que predomina son: arenas, gravas y en menor proporción las arcillas. Este último material se encuentra en los primeros metros y su espesor puede variar entre 1 metro y 12 metros profundidad de acuerdo a la ubicación.

Tabla 3. Pozos con información litológica Fuente CVC

Id	Código	Este	Norte	Profundidad	Elevación
0	vc-104	1060018.70	857336.24	36	1013.28
1	vc-110	1064807.42	858498.29	56	984.68
2	vc-112	1058979.82	867110.58	61	999.46
3	vc-113	1064327.32	863127.21	62	982.63
4	vc-116	1064380.00	861403.38	91	989.53
5	vc-117	1063161.77	862885.26	56	991.39
6	vc-124	1063727.46	861953.58	93	993.43
7	vc-126	1063043.42	858629.37	64	1001.33
8	vc-128	1060144.82	867150.53	51	993.03
9	vc-13	1061697.17	858598.98	30	1016.52
10	vc-130	1064537.44	858913.30	62.5	987.56
11	vc-132	1063312.38	857660.36	141	991.25
12	vc-134	1060543.39	858115.49	32.6	1022.39
13	vc-136	1061790.71	861115.99	37	1028.64
14	vc-137	1058959.83	867380.59	46	995.55
15	vc-195	1061348.81	866787.47	48	990.17
16	vc-377	1060112.45	859407.51	37	1049.45
17	vc-39	1062537.57	863349.27	46.5	991.54
18	vc-390	1060829.51	860570.48	40	1050.65
19	vc-652	1061309.44	859040.46	65	1028.36
20	vc-664	1064353.43	858696.31	65.9	989.56
21	vc-666	1061733.51	862528.84	60	1007.51
22	vc-677	1062528.63	856944.96	127	993.00
23	vc-682	1060595.75	859626.69	59	1041.93

24	vc-688	1063061.42	858622.37	144	1000.99
25	vc-69	1061679.61	862530.45	40	1007.13
26	vc-719	1061094.00	858779.00	100	1025.15
27	vc-722	1061899.61	862670.43	160	1003.78
28	vc-726	1060479.74	865470.51	86	1002.92
29	vc-761	1060682.41	857218.83	39.6	1009.41
30	vc-824	1060313.08	858488.65	68	1025.94
31	vc-827	1061667.49	857935.82	23	1008.82
32	vc-834	1060003.79	857347.31	69.7	1014.76
33	vc-839	1060479.00	859655.00	29	1045.45
34	vc-689	1064129.79	866260.34	290	980.64

En total se realizaron 12 trazos de correlaciones en las que se tomaron en cuenta los siguientes pozos
Tabla 4.

Tabla 4. Información de las correlaciones

Id	Nombr e	Distancia (m)	Pozos	Sentido
1	A-A	5413.15	Vc-137, Vc-128, Vc-195 y Vc-689	Occidente-Oriente
2	B-B	2962.45	Vc-104, Vc-761 y Vc-677	Noroccidente-Suroriente
3	C-C	4076.53	Vc-761, Vc-827, Vc-126, Vc-130	Sur-Norte
4	D-D	4273.35	Vc-377, Vc-134, Vc-677 y Vc-658	Occidente-Oriente
5	E-E	4628.03	Vc-377, Vc-390, Vc-666 y Vc-39	Sur-Norte
6	F-F	8196.27	Vc-137, Vc-726, Vc-39, Vc-117, Vc-124, Vc-116	Occidente-Oriente
7	G-G	4032.73	Vc-390, Vc-688 y Vc-132	Occidente-Oriente
8	H-H	3520.85	Vc-138, Vc-130	Occidente-Oriente
9	I-I	5017.01	Vc-134, Vc-652 y Vc-116	Sur-Norte
10	J-J	4348.00	Vc-390, Vc-136, Vc-117 y Vc-113	Sur-Norte
11	K-K	4414.04	Vc-666, Vc-39 y Vc-689	Sur-Norte
12	L-L	3085.01	Vc-677, Vc-132 y Vc-130	Sur-Norte

6.2.2 Modelo estratigráfico del acuífero.

El modelo estratigráfico busca representar de forma tridimensional cómo ha sido el comportamiento de los depósitos de cada uno de los materiales encontrados en el subsuelo de una forma simplificada, para ello se construye a partir de los datos básicos recopilados de las columnas litológicas del área evaluar de cada una de las fichas de los pozos de producción de agua subterránea y que cuenta con este tipo de información, para este proceso se revisaron 35 pozos los cuales presentaban columnas estratigráficas. Lo cual permitió definir los espesores de cada uno de los materiales encontrados y generar un modelo en 3D de la zona de estudio. A partir de la caracterización de la geología, geomorfología y de las correlaciones estratigráficas del área de análisis, se considera que debido a la dinámica de los depósitos aluviales de ambas cuencas río Lili y Pance, se divide en 4 subzonas, las cuales se pueden observar en la Figura 9. La diferencia de cada una de las subzonas radica en el espesor de la arcilla en sus primeros metros definido de la siguiente manera:

- ♦ Cono aluvial río Meléndez: espesor promedio de arcilla 25 metros, espesor promedio de material permeable (arena-grava, arena) 14 metros.
- ♦ Cono aluvial río Pance Qca1 (Rpan), parte alta: un solo material identificado (cantos y gravas) 40 metros de profundidad.
- ♦ Cono aluvial río Pance Qca2 (Rpan), esta subzona se divide en 2:
 - Subzona Nororiental: espesor de la arcilla 14 metros, espesor de la grava 25 metros
 - Subzona Suroriental: espesor de la arcilla 8 metros, espesor de grava-arena 31 metros.

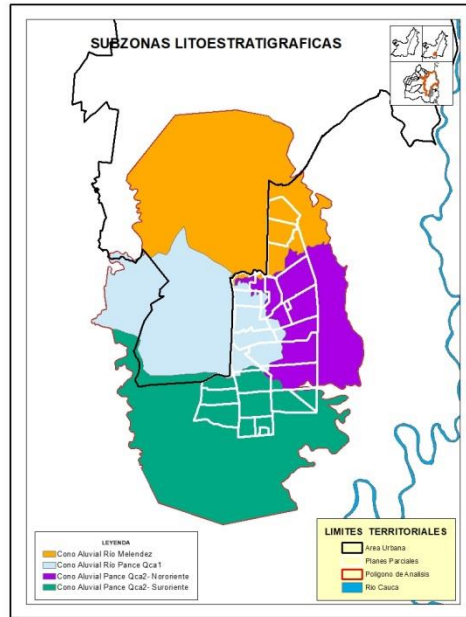


Figura 9. Subzonas Litoestratigráfica

De igual manera, con la información existente, fue posible realizar una serie de cortes a través del área de estudio y generar mapas de elevación de los materiales que limitan las unidades del modelo estratigráfico definido. En la (Figura 10), se muestra la diferenciación de estratos permeables e semipermeables, en él se puede observar que en la zona de expansión urbana hacia el oriente de ella empieza a mostrar los depósitos de sedimentos de arcilla y hacia el occidente de ella este depósito no se alcanza a identificar, probablemente estos depósitos de arcilla que se encuentra en esta zona sea de origen de los sedimentos del río Cauca fruto de desbordamiento durante cientos de millones de años.

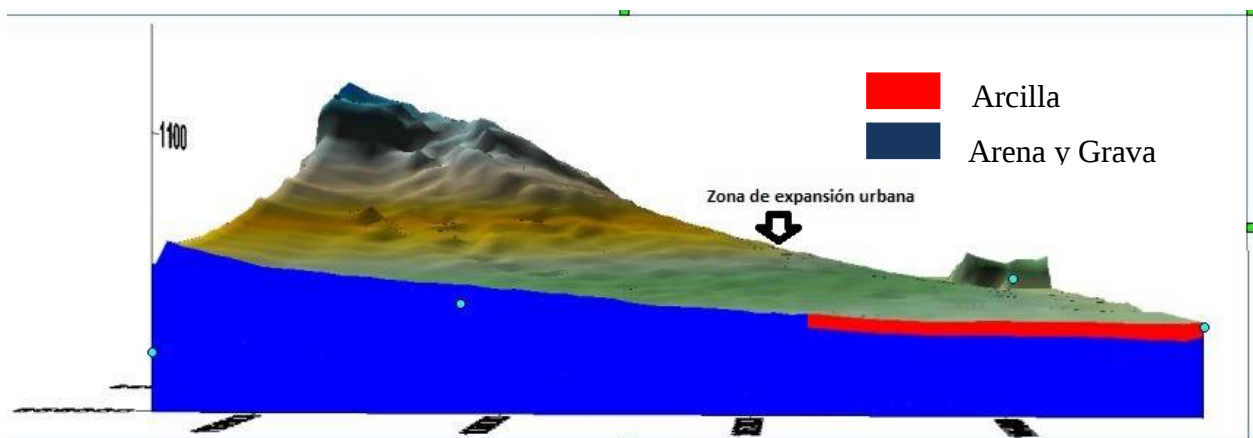


Figura 10. Modelo Estratigráfico al Sur de la zona de expansión

Para realizar el procedimiento de identificación se agruparon las unidades litológicas en acuíferas y no acuíferas; distinguiendo dentro de las unidades acuíferas los estratos de Arena y Gravas tomando los materiales compuestos por un porcentaje mayor al 50% de Arena. El otro grupo identificado corresponde a las unidades no acuíferas, entre las que se identificaron materiales como Arcillas limosas y Arcillas. En general se puede decir que en la zona de estudio se presenta una estratificación del subsuelo, en donde predominan niveles granulares de tipo cuaternario con matrices arenosas. Una vez identificadas las unidades litológicas presentes en la zona de estudio, se define la metodología de trabajo, proyectando un modelo dos capas, que representan la unidad A, B y C, las diferentes unidades se encuentra formadas por mallas (superficie de elevación) limitando los materiales geológicos de la zona. En la (Figura 11) se identifica el número de capas empleadas en el modelo.

- ✦ Unidad A. Corresponde a las unidades de suelos presente en el área de estudio, y la cual se encuentra delimitada entre la cota de terreno y un metro de profundidad.
- ✦ Unidad B. Esta unidad se encuentra por debajo de la unidad de suelo y varía aproximadamente entre 8 y 25 metros de profundidad.
- ✦ Unidad C. Esta unidad se encuentra por debajo del lente arcilloso y tiene una profundidad de 40 y su espesor es variable dependiendo donde se encuentra el lecho arcilloso.

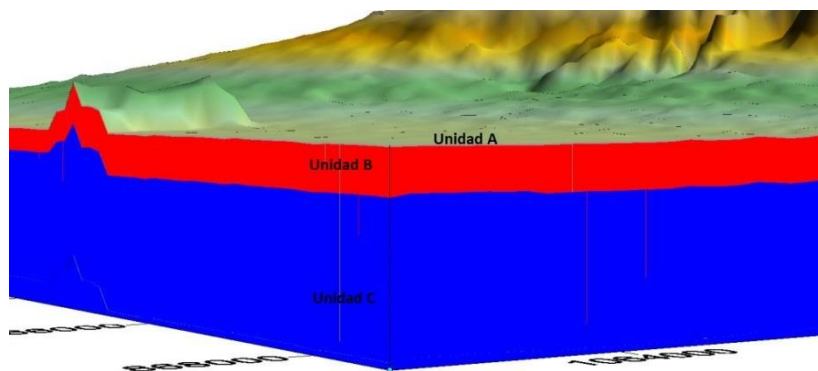


Figura 11. Número de capas empleadas en el modelo litoestratigráfico, sentido Sur-Norte

A continuación se muestra en la (Figura 12), el corte horizontal por toda la zona de estudio, encontrando que hacia el área de expansión urbana existe una pequeña capa de material arcilloso en los primeros metros y que aumenta hacia la zona plana o zona de depósito de material fino, el resto de material que se puede identificar es un material permeable, el cual es predominante a lo largo de este corte horizontal.

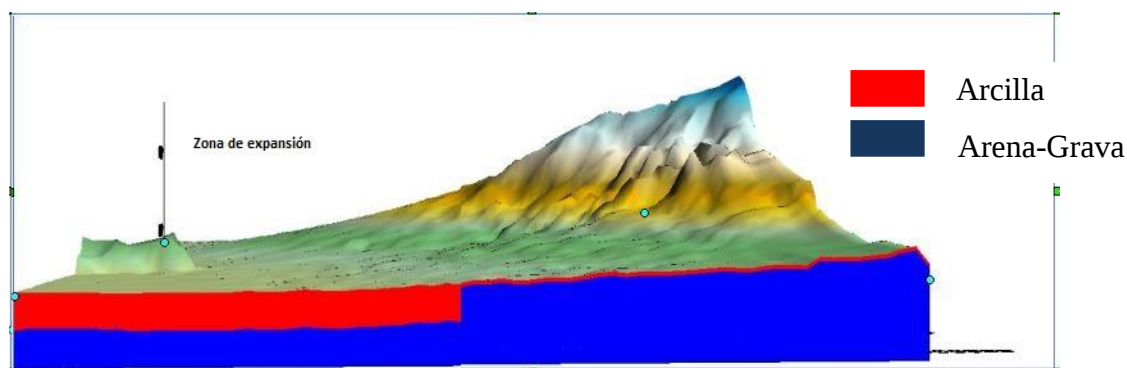


Figura 12. Modelo 3D corte horizontal, sentido occidente-orientado extremo norte

6.2.3 Líneas piezométricas de agua subterránea en el área de estudio

Las líneas piezométricas como la representación de la geometría de la superficie de la lámina de agua que posee el acuífero. El estudio de ellas permite obtener información base sobre el movimiento y comportamiento de agua, identificación de zonas de recarga, tránsito y descarga, identificación de cambios de la litología a partir de los espesores permeables e impermeables, identificación de acuíferos libres o confinados y sobre explotación del recurso hídrico entre otros.

Para determinar el comportamiento de las líneas piezométricas en la zona de estudio se emplearon los métodos de interpolación IDW, y kriging

Se identifica que la dirección de flujo es de los conos aluviales hacia el río Cauca, para el desarrollo del análisis de la información espacial de los niveles freáticos se empleó el método de interpolación Kriging, para genera una cuadrícula precisa de sus datos adaptándose a un conjunto de datos especificando el modelo de variograma apropiado. dentro del código numérico del Surfer (GOLDEN SOFTWARE, 2019). Kriging puede ser un interpolador exacto o un suavizador dependiendo de los parámetros especificados. El método de interpolación por el programa incorpora la anisotropía y las tendencias subyacentes de una manera eficiente y natural.

Datos utilizados

Inicialmente se tomaron los datos crudos de la lectura de los niveles freáticos de la zona de estudio comprendidos entre los años 2009-2 al 2013-2, el segundo paso es depurar la base de datos de las lecturas sin datos, profundidades sin dato, el tercer paso se toma las profundidades menores o iguales a 60 metros Tabla 5, por último se excluyen valores atípicos que se encuentra por encima y por debajo del conglomerado de datos, por último se interpolan los datos por el método de kriging ordinario.

Tabla 5 Valor medio de los niveles freáticos en la zona de estudio (2009-2-2013-2) Fuente CVC

Código	Este	Norte	Elevación (msnm)	Profundidad del Pozo	Nivel de agua	Nivel Piezométrico
vc-104	1060018.70	857336.24	1013.28	36.00	1.78	1011.50
vc-110	1064807.42	858498.29	984.68	56.00	2.64	982.04
vc-113	1064327.32	863127.21	982.63	62.00	3.06	979.57
vc-117	1063161.77	862885.26	991.39	56.00	8.84	982.55
vc-126	1063043.42	858629.37	1001.33	64.00	15.64	985.69
vc-13	1061697.17	858598.98	1016.52	30.00	0.54	1015.98
vc-130	1064537.44	858913.30	987.56	62.50	5.80	981.76
vc-136	1061790.71	861115.99	1028.64	37.00	2.18	1026.46
vc-230	1060608.09	859899.62	1048.53	15.00	2.30	1046.23
vc-377	1060112.45	859407.51	1049.45	37.00	10.12	1039.33
vc-39	1062537.57	863349.27	991.54	46.50	3.46	988.08
vc-476	1059479.39	858061.54	1028.37	43.00	1.60	1026.77
vc-640	1060115.48	860074.52	1068.63	26.00	0.93	1067.70
vc-652	1061309.44	859040.46	1028.36	65.00	6.27	1022.09
vc-666	1061733.51	862528.84	1007.51	60.00	2.78	1004.73
vc-682	1060595.75	859626.69	1041.93	59.00	4.83	1037.10
vc-69	1061679.61	862530.45	1007.13	40.00	2.79	1004.34
vc-70	1061797.60	862377.44	1010.23	36.00	2.75	1007.48
vc-718	1061288.56	859786.22	1035.27	12.00	0.98	1034.29
vc-749	1064379.30	859306.18	988.90	42.00	5.82	983.08
vc-756	1062555.64	862091.86	1004.70	30.00	1.25	1003.45
vc-761	1060682.41	857218.83	1009.41	39.60	0.23	1009.18
vc-801	1062168.12	858256.37	1008.70	16.00	0.91	1007.79
vc-804	1059860.80	866141.08	999.74	15.00	3.97	995.77
vc-816	1062879.49	860130.38	1010.81	10.00	1.36	1009.45
vc-820	1063130.41	858187.75	998.87	20.00	8.12	990.75
vc-821	1062958.16	858576.76	1002.78	12.00	3.58	999.20
vc-822	1062910.71	858516.50	1002.97	12.00	3.72	999.25
vc-823	1062899.72	858474.46	1001.85	8.00	0.37	1001.48
vc-824	1060313.08	858488.65	1025.94	68.00	2.58	1023.36
vc-825	1062957.13	859851.30	1008.52	32.00	2.72	1005.80
vc-826	1061803.31	857927.57	1009.09	15.00	1.22	1007.87
vc-827	1061667.49	857935.82	1008.82	23.00	2.02	1006.80
vc-828	1061774.78	859304.42	1024.35	18.00	2.34	1022.01
vc-829	1061772.59	859253.09	1025.00	18.00	2.14	1022.86
vc-830	1061882.04	859246.48	1023.70	15.00	2.62	1021.08
vc-831	1061049.66	858657.31	1024.00	23.60	0.56	1023.44

vc-832	1061643.95	858523.44	1017.00	12.00	0.82	1016.18
vc-833	1058064.10	860258.06	1076.39	15.00	2.00	1074.39
vc-834	1060003.79	857347.31	1014.76	69.70	16.48	998.28
vc-836	1060488.20	858039.70	1019.87	23.00	0.85	1019.02
vc-839	1060479.00	859655.00	1045.45	29.00	5.84	1039.61
vc-840	1058775.40	859947.19	1074.20	19.00	5.90	1068.30
vc-841	1060171.06	858609.59	1028.89	12.46	0.78	1028.11
vc-842	1060152.62	857975.70	1022.64	17.60	7.06	1015.58
vc-843	1059998.38	858266.99	1028.94	46.00	7.26	1021.68
vc-844	1061853.32	857360.19	1001.80	15.62	2.25	999.55
vc-845	1061024.89	858903.13	1028.02	20.00	1.60	1026.42
vc-847	1060359.05	856532.42	1006.33	52.40	2.39	1003.94
vc-849	1060205.60	857565.67	1017.23	24.00	4.00	1013.23
vc-850	1061359.49	858543.15	1016.42	20.20	4.62	1011.80
vc-851	1059484.39	858035.54	1028.33	10.00	5.50	1022.83
vc-855	1062814.39	863264.42	992.72	14.40	3.12	989.60
vc-856	1061313.14	858056.21	1013.71	19.50	2.60	1011.11
vc-857	1061104.91	857918.76	1013.73	19.40	2.27	1011.46
vc-858	1061872.00	863291.00	996.08	28.00	8.60	987.48
vc-859	1060639.00	858628.00	1025.87	64.10	7.76	1018.11

El Anexo A1, detalla el análisis realizado del comportamiento de los niveles freáticos entre el período (2009-1 a 2013-2), donde el gradiente promedio es de aproximadamente 0.018 m/m y se observa que el área de recarga para el análisis es local, de igual forma muestra que el área de recarga local aporta caudal base al río Pance que discurre hacia el Noroccidente de la zona de estudio, también se observa para este periodo de análisis que los ríos Lili y Meléndez su caudal no depende del intercambio de aguas subterránea, dado a que las líneas de flujo así lo demuestra. A continuación se calcula el promedio máximo y mínimo de los niveles freáticos Figura 13 y Figura 14, el cálculo ayudará a determinar si el comportamiento de las líneas de flujo de agua subterránea tiende a tener el mismo comportamiento que del periodo analizado.

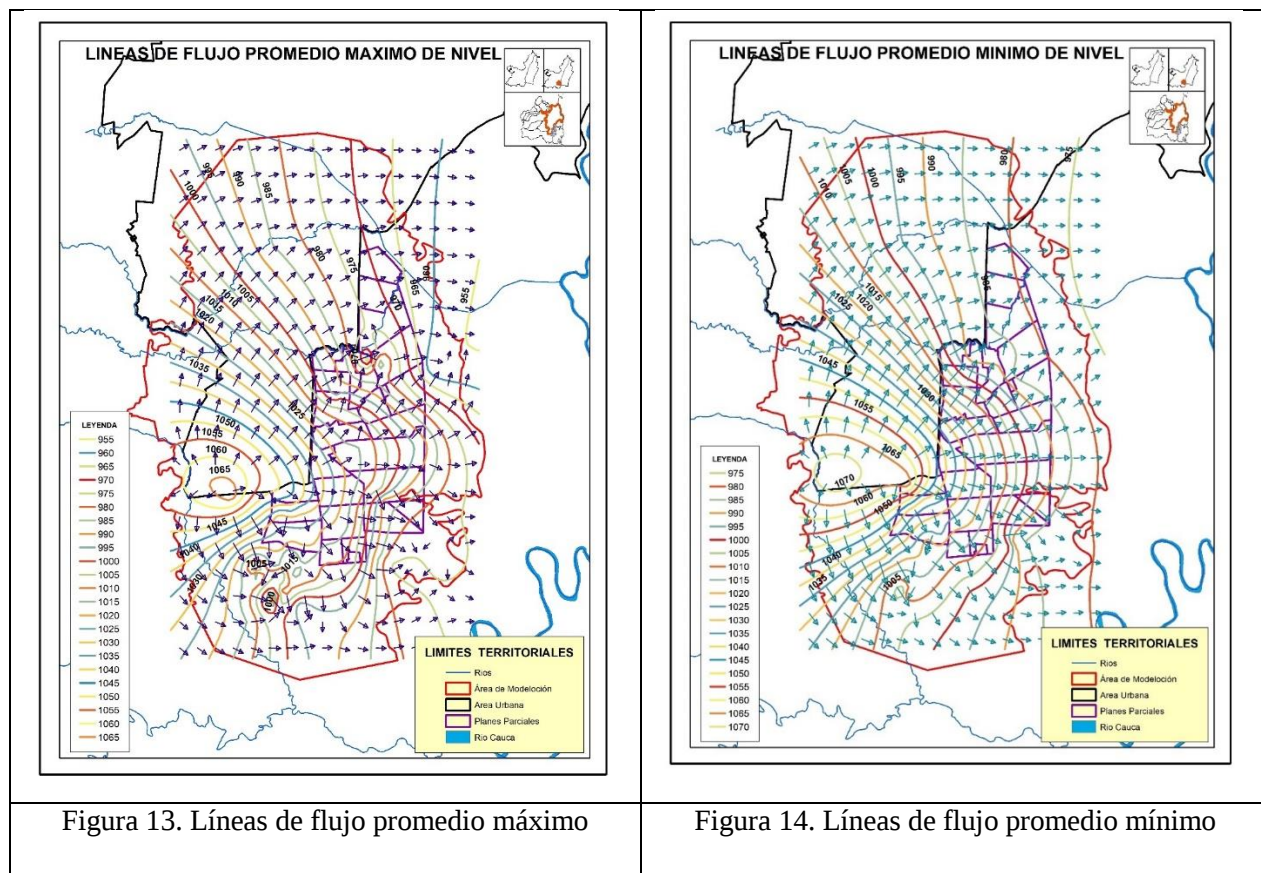


Figura 13. Líneas de flujo promedio máximo

Figura 14. Líneas de flujo promedio mínimo

En ambas figuras la diferencia de niveles es de 5 m, su comportamiento en cuanto la ubicación de la zona de recargar es muy parecido a los periodos de análisis, en dicho comportamiento se observa que el río Pance recibe los aportes de agua de la zona de recarga, convirtiéndose en un río ganador, mientras que los ríos Lili y Meléndez, no reciben aportes de agua subterránea, también se observa que la parte central de la zona de expansión urbana para ambos análisis es de zona de recarga, mientras que el sector Noroccidental ya es de zona de transición por el espaciamiento de la líneas de flujo.

6.2.4 Modelación numérica

La modelación numérica parte del insumo generado del modelo litológico y el cual es construido a partir de las correlaciones de los materiales que se encuentra en el subsuelo en el área de análisis, en dichas correlaciones se puede identificar en el general dos capas de materiales definidos de la siguiente manera:

- ♦ Capa 1 material: limo-arcilloso a limo-arenoso
- ♦ Capa 2 materiales: arenoso a grava gruesa.

De igual manera para determinar el comportamiento del acuífero en la zona de estudio se tuvo en cuenta lo siguiente:

1. Un modelo numérico de dos capas
2. Un modelo numérico de tres capas

La propuesta anterior es el resultado del análisis de las diferentes columnas estratigráficas de la zona de estudio, en donde algunas columnas litológicas se encuentran identificada una capa muy delgada de suelo, mientras que otras columnas se diferencia dos tipos de materiales (arcilla y arena o grava). Por último, dentro del análisis del comportamiento conceptual del acuífero se realizaron las líneas isopiezas, para determinar la dirección del flujo del acuífero, encontrando que para la zona de estudio la dirección es de occidente a oriente y se acopla al comportamiento del flujo regional del acuífero.

Para la implementación del modelo se tomaron las lecturas de los niveles estáticos de 51 pozos de aprovechamiento de agua subterránea, los cuales corresponde a la medición del primer semestre del año 2013 y que se encuentran localizados en el área de estudio. En la Tabla 6 hace referencia a la ubicación espacial de los puntos de la toma de los niveles estáticos, debido a que son pozos de aprovechamiento de agua subterránea la calidad del dato se encuentra sujeta a las fluctuaciones de la demanda del recurso hídrico para este periodo, adicional a lo anterior se tomaron la lectura de los pozos con profundidades menores o iguales a 60 m. La Figura 15, muestra la espacialización de los pozos tomados en cuenta para la modelación. A continuación, se presenta el análisis de los parámetros hidráulicos de la zona de estudio a partir de la información litológica, las condiciones de frontera del modelo numérico y los resultados de la modelación numérica para ambos modelos.

Tabla 6 Localización de los pozos de aprovechamiento de agua subterránea (lectura 2012-1) Fuente CVC

Código	Este	Norte	Elevación	Nivel de agua	Nivel Piezométrico
vc-104	1060018.70	857336.24	1013.28	1.90	1011.38
vc-110	1064807.42	858498.29	984.68	6.52	978.16
vc-113	1064327.32	863127.21	982.63	11.39	971.24
vc-13	1061697.17	858598.98	1016.52	0.54	1015.98
vc-130	1064537.44	858913.30	987.56	9.64	977.92
vc-230	1060608.09	859899.62	1048.53	2.30	1046.23
vc-377	1060112.45	859407.51	1049.45	10.92	1038.53
vc-39	1062537.57	863349.27	991.54	13.12	978.42
vc-476	1059479.39	858061.54	1028.37	4.03	1024.34

vc-640	1060115.48	860074.52	1068.63	1.13	1067.50
vc-652	1061309.44	859040.46	1028.36	8.12	1020.24
vc-666	1061733.51	862528.84	1007.51	11.46	996.05
vc-671	1062803.67	863864.39	988.70	11.24	977.46
vc-69	1061679.61	862530.45	1007.13	7.66	999.47
vc-70	1061797.60	862377.44	1010.23	5.60	1004.63
vc-718	1061288.56	859786.22	1035.27	1.11	1034.16
vc-749	1064379.30	859306.18	988.90	13.21	975.69
vc-756	1062555.64	862091.86	1004.70	4.25	1000.45
vc-761	1060682.41	857218.83	1009.41	1.69	1007.72
vc-801	1062168.12	858256.37	1008.70	1.34	1007.36
vc-804	1059860.80	866141.08	999.74	4.08	995.66
vc-816	1062879.49	860130.38	1010.81	2.95	1007.86
vc-820	1063130.41	858187.75	998.87	24.30	974.57
vc-822	1062910.71	858516.50	1002.97	12.66	990.31
vc-823	1062899.72	858474.46	1001.85	15.96	985.89
vc-824	1060313.08	858488.65	1025.94	5.47	1020.47
vc-825	1062957.13	859851.30	1008.52	10.22	998.30
vc-826	1061803.31	857927.57	1009.09	1.22	1007.87
vc-827	1061667.49	857935.82	1008.82	2.31	1006.51
vc-828	1061774.78	859304.42	1024.35	2.43	1021.92
vc-829	1061772.59	859253.09	1025.00	2.76	1022.24
vc-830	1061882.04	859246.48	1023.70	2.95	1020.75
vc-831	1061049.66	858657.31	1024.00	0.56	1023.44
vc-832	1061643.95	858523.44	1017.00	0.87	1016.13
vc-833	1058064.10	860258.06	1076.39	2.00	1074.39
vc-834	1060003.79	857347.31	1014.76	17.20	997.56
vc-836	1060488.20	858039.70	1019.87	0.85	1019.02
vc-839	1060479.00	859655.00	1045.45	5.84	1039.61
vc-841	1060171.06	858609.59	1028.89	0.78	1028.11
vc-842	1060152.62	857975.70	1022.64	7.06	1015.58
vc-843	1059998.38	858266.99	1028.94	7.26	1021.68
vc-844	1061853.32	857360.19	1001.80	2.47	999.33
vc-845	1061024.89	858903.13	1028.02	1.60	1026.42
vc-847	1060359.05	856532.42	1006.33	2.39	1003.94

vc-849	1060205.60	857565.67	1017.23	4.00	1013.23
vc-850	1061359.49	858543.15	1016.42	4.62	1011.80
vc-851	1059484.39	858035.54	1028.33	5.50	1022.83
vc-855	1062814.39	863264.42	992.72	3.12	989.60
vc-856	1061313.14	858056.21	1013.71	2.60	1011.11
vc-857	1061104.91	857918.76	1013.73	2.27	1011.46

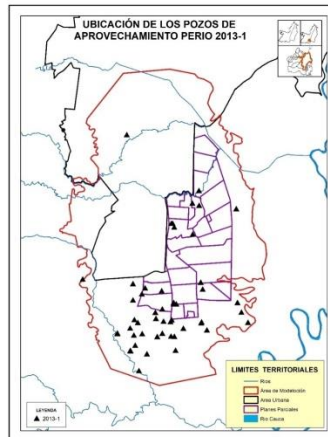


Figura 15. Ubicación de los Pozos en la Zona de Estudio (lectura de niveles 2013-1)

A continuación, se define a partir del análisis de la información secundaria las condiciones hidrogeológicas del área de análisis

6.2.5 Límites del Sistema

La zona de estudio cuenta con un área aproximada de 7644 Ha, los límites de orientación se encuentran de la siguiente forma: Norte por el área urbana del municipio de Cali, hacia el Occidente con el piedemonte de la cordillera Occidental, al Oriente con el río Cauca y al Sur con la zona rural del municipio de Cali. La Figura 16 muestra los límites del área de la modelación. Es de aclarar la delimitación del dominio obedece a un ambiente geológico del área de estudio, ya que cuando se realizó la caracterización de dicho componente se encuentra que existen dos conos aluviales en la zona, tal como se describió y en el análisis de las correlaciones muestra un grado de homogeneidad en los depósitos de los conos aluviales de las cuencas hidrográficas del río Pance y Meléndez.

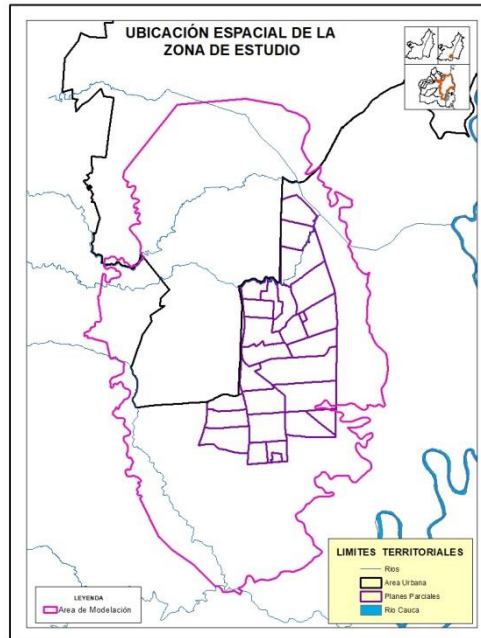


Figura 16. Límites del área de modelación numérica

6.2.6 Dimensiones

Se realizaron dos modelos hidrogeológicos de dos capas y de tres capas ambos con igual dimensión de grilla (100 filas* 100 columnas) en un área aproximada 7644 Ha Figura 17, cada celda posee una superficie de 10668 m² (84 m x 127 m)

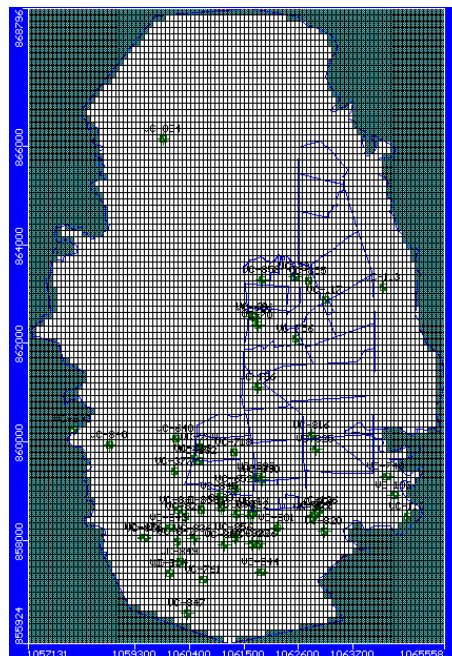


Figura 17. Discretización de la malla del Modelo

Teniendo un espesor variable en función del modelo empleado: para la modelación de dos capas se asume una profundidad para ambos modelos de 50 metros a partir del análisis de la información de las columnas litológicas, donde se observa que hasta esta profundidad de los depósitos de los materiales tienen la siguiente intercalación

1. Primera capa arcilla
2. Segunda capa arena- grava

La diferencia con el modelo de 3 capas es la incorporación de la unidad de suelo como primera capa es decir que el modelo queda conformado de la siguiente manera:

1. Primera capa suelo.
2. Segunda capa arcilla
3. Tercera capa arena-grava.

La Figura 18 se identifica el número de capas para cada modelo

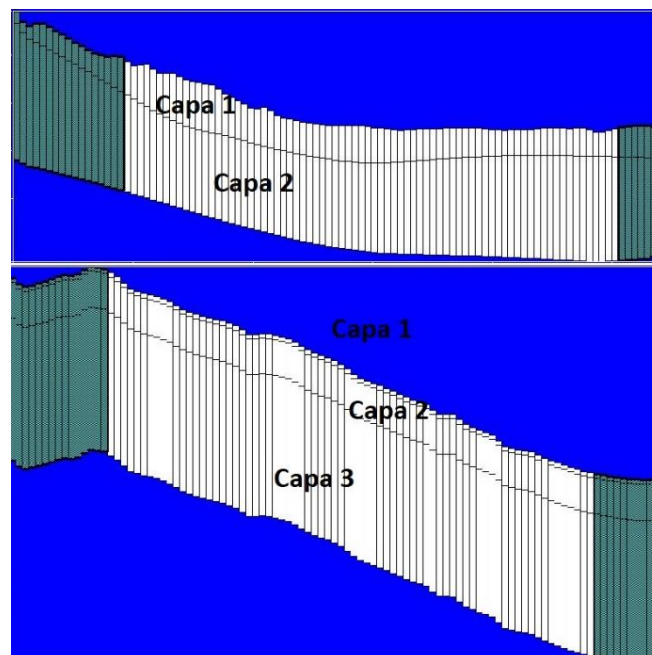


Figura 18. Identificación de dos y tres capas del modelo

6.2.7 Condiciones de frontera del modelo

A Partir de los resultados de los análisis de las líneas de flujo de agua subterránea y de las condiciones físicas del área de estudio (ríos y depósitos de conos aluviales) se determinan las siguientes condiciones de frontera:

- ♦ Al occidente la condición de cabeza constante: de acuerdo con el análisis de periodo de las líneas de piezométricas, se encuentra que hacia el occidente de la zona del área de análisis la línea más representativa es la 1045 msnm, teniendo una variación en su desplazamiento hacia el oriente de aproximadamente de 40 metros cuando a nivel regional se presenta épocas secas.
- ♦ Al oriente del área de modelación: con el contacto del depósito aluvial del río Cauca, se determina que la condición de frontera es de cabeza contante con un valor de 980 msnm, para ella sucede el mismo fenómeno que la anterior condición tiende a tener un desplazamiento hacia el oriente donde ella se ubica de aproximadamente 70 metros, es decir que la condición dependiendo si época de verano o de lluvia se encuentra en el cono aluvial del río Pance y Meléndez o se encuentra en los depósitos del río Cauca, ubicándose hacia el occidente del humedal el Estero.
- ♦ Al Sur de la zona de estudio a pesar de que el área de análisis intercepta dos ríos como el Lili y Meléndez y el canal interceptor Sur, de acuerdo con los resultados de las líneas piezométricas es posible que dichos cuerpos hídricos se encuentran desconectados del acuífero, dado a que no muestran en el análisis una variación significativa de si son ganadores o perdedores. Posiblemente se encuentren desconectados por dos factores:
 - Tipo de depósitos que contiene la cuenca hidrográfica los cuales son producto de la generación de suelos residuales teniendo así una alta textura arcillosa y lo cual no facilita ese intercambio entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales.
 - Intervención humana, la ciudad ha tenido un amplio desarrollo hacia esta zona lo cual modificado los cauces de las fuentes hídricas superficiales y posiblemente el intercambio que se pueda generar ya mencionado.
- ♦ Para la condición de River (río Pance): se determina esta condición debido al análisis de las líneas piezométricas, en donde se observa que el río Pance tiene un comportamiento de río ganador en esta zona, posiblemente se deba a las condiciones de lecho del río en el área y al paso de una falla estructural en sentido Sur-Norte identificada por la cartografía de la CVC. La Figura 19 muestra los parámetros de entrada que se debe tener en cuenta para la condición de frontera

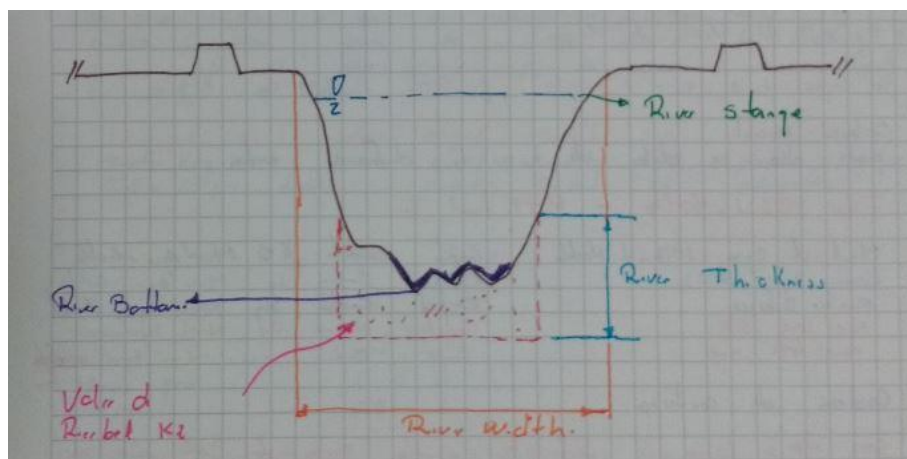


Figura 19. Parámetros de entrada en la condición de River

La Figura 20 presenta la ubicación de las condiciones de frontera escogidas para la evaluación hidrogeológica local de cada modelo (dos capas y tres capas) y la Tabla 7 muestra los valores asignados para cada una de las condiciones de frontera

Tabla 7. Valores y Tipo de condiciones de frontera para el modelo acuífero propuesto

Condiciones de Frontera del Modelo			
Tipo	Ubicación	Dirección	Valor lectura niveles agua subterránea (m.s.n.m)
Cabeza Constante	Occidente	Sur-Norte	1045
Cabeza constante	Oriente	Sur-Norte	980
Rio Pance	Condición de Rio Pance		
	River	Aguas arriba	Aguas abajo
	Nivel de Agua	1030	980
	Profundidad	1028	979
	Profundidad de lecho	4	4.5
	Conductancia	40 (m/d)	35 (m/d)
	Ancho	20	18
Libre	Norte		

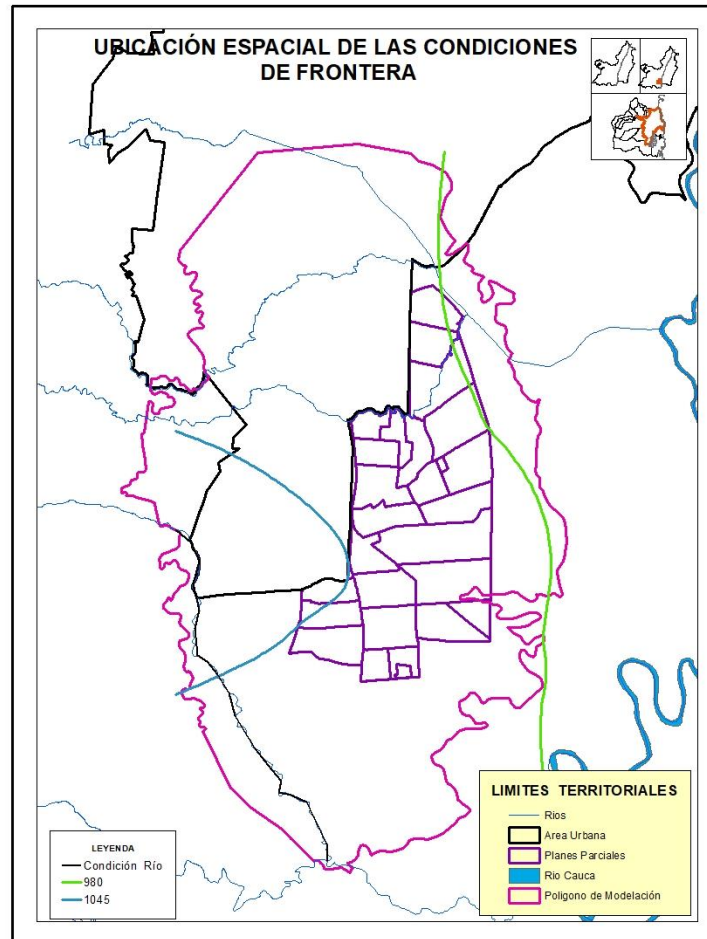


Figura 20. Ubicación geográfica de las condiciones de frontera evaluación hidrogeológica regional
Patrones de variabilidad espacial de los parámetros

Una vez realizado el análisis de los materiales descritos en cada una de las columnas litoestratigráfica y las diferentes corridas de la modelación hidrogeológica se lograron determinar los parámetros hidráulicos del acuífero en la zona de estudio, los cuales para ambos modelos se procede a justar dichos parámetros. En la Tabla 8, muestra los valores establecidos de los modelos (inicial y final), encontrado que para el modelo de dos capas se ajusta con 4 valores de conductividad hidráulica es decir que existen 4 tipo de materiales asociados a cada conductividad hidráulica, mientras que para el modelo que incorpora una capa adicional que vendría siendo la unidad de suelo se encuentra que ajusta con 5 valores de conductividad hidráulica. La validación del ajuste de cada uno de los modelos se realiza a partir de los valores observados y calculados de los niveles freáticos.

Tabla 8 Matriz de ordenamiento de parámetros de calibración

Valores iniciales y finales de la modelación							
Capa		Conductividad hidráulica antes de la calibración (m/d)	Conductividad hidráulica después de la calibración (m/d)	S _s (1/m)	S _Y (m/m)	Por Eff	Por Tot
Modelo dos Capas							
1	Z1	0.0003	0.5	0.01	0.3	0.5	0.27
2	Z2	20	5				
	Z3	20	15				
	Z4	20	10				
Modelo tres Capas							
1	Z1	0.0003	0.5	0.01	0.3	0.5	0.27
2	Z2	0.002	3	0.01	0.3	0.5	0.27
3	Z3	10	5	0.04	0.3	0.1	0.25
	Z4	10	15				
	Z5	10	10				

**Z: Zonas identificadas. **S_s: Almacenamiento específico **S_y: Almacenamiento de campo ** Por Eff: Porosidad eficaz ** Por Tot: Porosidad total

En la Figura 21, se muestra los valores de conductividad hidráulica para el modelo de dos capas y de tres capas: para el primer modelo los valores se encuentran distribuidos de acuerdo a la identificación a partir de los resultados obtenidos en las corridas pre inicial del modelo matemático en cuanto la observación de los niveles observados y calculados. Se resalta que para este modelo de dos capas la distribución de los materiales permeables varía dependiendo de qué tan alejado se encuentran el cono aluvial del río Pance y su cambio de pendiente con la parte aluvial del relleno de sedimentos del río Cauca. Para el modelo de tres capas se encuentra que la conductividad hidráulica de la primera es la misma conductividad de la primera capa del modelo de dos capas. Sin embargo, la segunda capa es más permeable que la primera capa pasando a ser un material arenoso.

Como la zona de modelación hace parte del cono aluvial del río Pance y en una menor área del cono aluvial del río Meléndez-Lili, y de acuerdo al análisis de las diferentes correlaciones estratigráficas se encuentra que el área tiene un comportamiento en la parte alta de un material arenoso, donde su conductividad se encuentra alrededor de los 5 m/día, mientras que en la parte intermedia de la misma zona los materiales aumentan en su conductividad hidráulica pasando a una grava gruesa de 15 m/día, mientras que ya en la zona baja del cono aluvial con el relleno sedimentario del río Cauca se encuentra que los materiales en esta área el valor que mejor se ajusta es de una conductividad de una grava mediana a fina con un valor de 10 m/día.

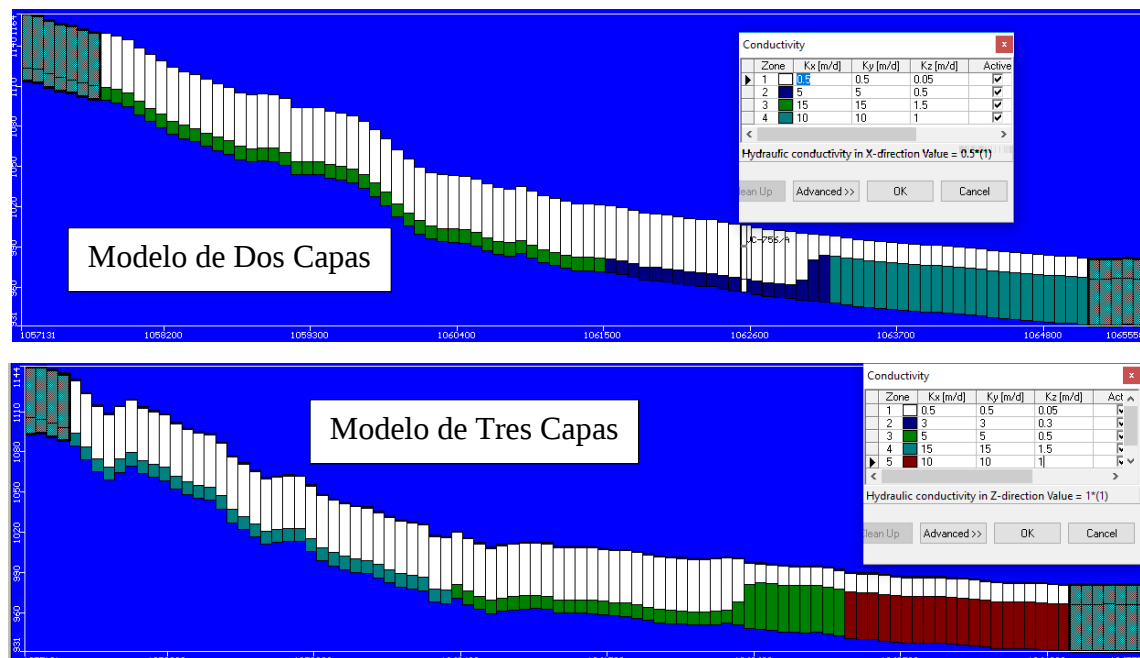


Figura 21. Valores de Conductividad hidráulica

Ajuste al modelo matemático

Los ajustes del modelo numérico se realizan a partir del análisis de la información secundaria, a pesar de ello los resultados de la modelación se ajustan a las condiciones reales del acuífero, como lo es la definición de la geometría del acuífero a modelar, el tipo de material que encuentra distribuido espacialmente en el subsuelo, las condiciones de frontera las cuales fueron extraídas para el modelo de los resultados obtenido con las líneas de flujo de agua subterránea entre el periodo comprendido (2009-2013-2)

Calibración del modelo

La calibración del modelo se realizó ajustando los niveles calculados con los niveles medidos periódicamente y comparados con los niveles calculados a partir de la modelación numérica en cada uno de los pozos, en el caso del modelo matemático de la zona de expansión. Urbana existen parámetros que se asumieron a partir de una revisión bibliográfica (Smith Domenico, 1998). Debido a la escasez o poca medición de este parámetro en campo, como por ejemplo los valores de la conductividad hidráulica de los pozos de aprovechamiento de agua subterránea, aun así, con estas series de limitaciones los resultados obtenidos la calibración de ambos modelos de dos capas y tres capas se ajusta entre los niveles observados y calculados.

Resultados de la calibración de los modelos de dos y tres capas

Como se ha mencionado el modelo dos capas posee 4 zonas de conductividad hidráulica lo cual es resultado del comportamiento inicial de los datos observados y calculados por el modelo. En la Figura 22, se observa la distribución espacial de las conductividades hidráulicas de la zona de estudio y la calibración del modelo se realizó en régimen estacionario para el período correspondiente al año 2013 primer semestre, se tiene 40 de los 50 pozos de aprovechamiento que inicialmente se tenía, con la calibración se tiene un error estimado de 0.71 y un coeficiente de correlación entre los datos observados y calculados de 0.94, y por último el error normalizado (RMS) de 9.7%.

El modelo tres capas posee dos conductividades hidráulicas que se encuentran distribuidas en toda el área activa de cada una de las capas tal como lo muestra la calibración del modelo se realizó en régimen estacionario para el período 2013 Figura 23. Se utilizaron 40 pozos de aprovechamiento de los 50 iniciales, se obtiene un error estimado de 0.64, el coeficiente de correlación entre los datos observados y calculados es de 0.95 y un error normalizado (RMS) de 7.7%.

A continuación, se presentan los resultados de la calibración de los modelos de dos y tres capas.

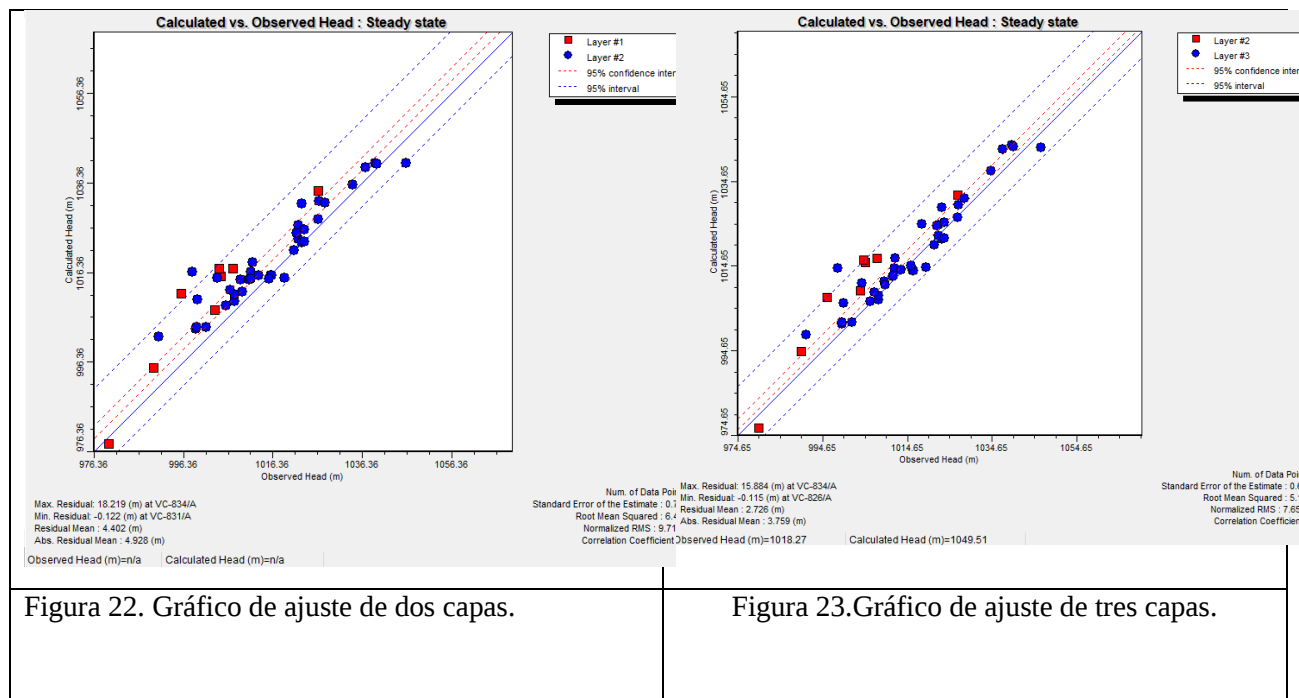


Figura 22. Gráfico de ajuste de dos capas.

Figura 23. Gráfico de ajuste de tres capas.

6.2.7.1 Análisis de resultado modelo dos capas.

El resultado de la modelación numérica del *modelo de dos capas* presenta la dirección de flujo en sentido Occidente-Oriente, de acuerdo con las líneas de flujo la zona de recarga se ubica al Occidente de la zona de expansión urbana, por fuera del área proyectada para urbanizar, por otro lado se observa que los resultados del modelo tienen el mismo comportamiento del análisis piezométrico realizado para el periodo (2009-2-2013-2), en dicho análisis también el área de recarga sitúa por fuera de la zona de proyección urbana, simultáneamente se observa que existe una concentración de líneas de flujo hacia la parte Sur y Centro del área los planes parciales, igual a los resultados obtenidos en la modelación numérica. Figura 24, por otro lado en los resultados del ampos se encuentra que el río Pance recibe aportes del acuífero, es decir que un río ganador, además hacia la parte Norte de la zona de expansión urbana los resultados muestran una zona de transición dentro del área de análisis, es decir que en esta zona la velocidad del flujo disminuye junto con su gradiente hidráulico. Por último, los resultados muestran una zona al Occidente del área de estudio con ausencia de nivel de agua, o celdas secas, esto se debe a que los niveles de agua subterránea por ser un área se encuentran por debajo de los 40 metros de profundidad.

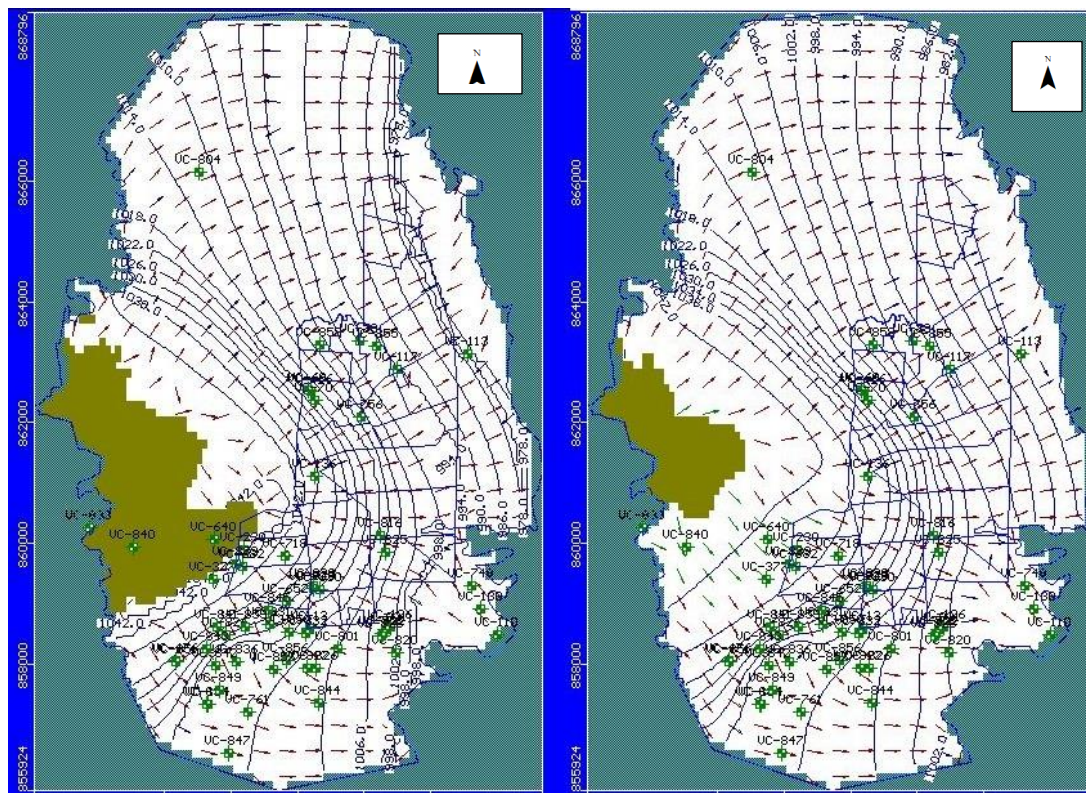


Figura 24. Modelo de dos capas.

a. Primera capa 20 metros

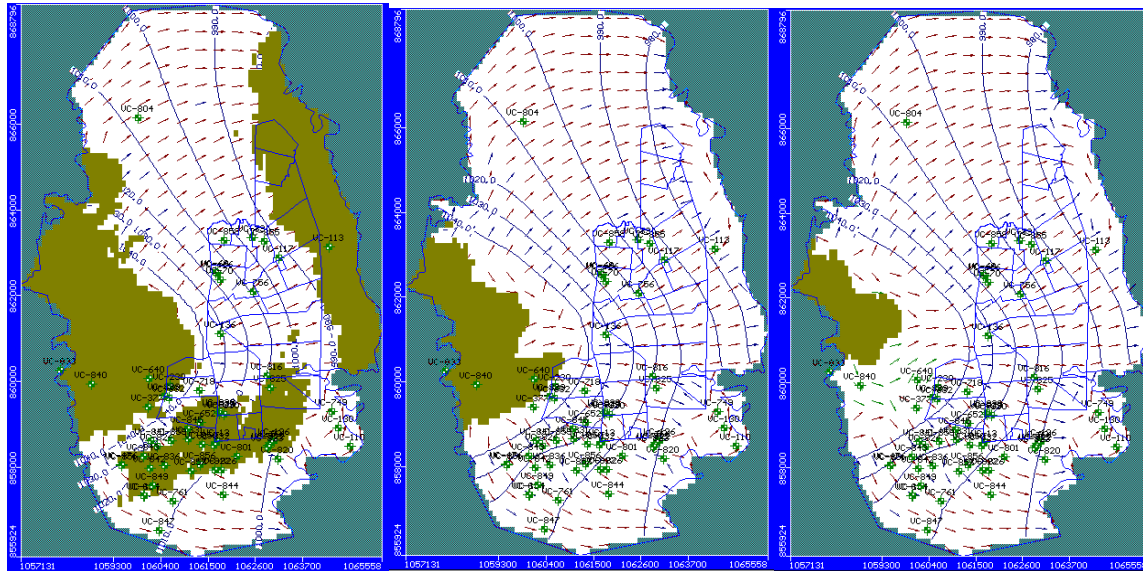
b. Segunda capa 25 metros.

6.2.7.2 Análisis de resultado modelo tres capas.

El modelo tres capas presenta la misma dirección de flujo que la anterior modelación, a diferencia de la modelación anterior este modelo muestra celdas secas en gran parte de la zona Occidental del área de expansión urbana de la primera capa, es decir que hacia esta zona el nivel de agua subterránea se encuentra por debajo del 1 m de profundidad, para las capas 2 y 3, el comportamiento de celdas secas es similar al anterior modelo, sin embargo en los resultados de calibración matemática el modelo de tres capas se ajusta más a la realidad que el modelo de dos capas, sin que lo anterior signifique que ambos modelos se encuentran calibrados.

La dirección de flujo para la capa 2 y 3 muestra que la zona de recarga se encuentra en el extremo Occidental del área de expansión urbana abarcando los planes parciales 6,8 y 10, también existe una zona de transición de flujo la cual ocurre hacia el extremo centro Nororiental de la zona de expansión urbana y se extiende hasta los límites Occidentales de lo que es el relleno sedimentario del río Cauca, del mismo

modo que en el modelo de dos capas también el río Pance muestra en esta modelación que se encuentra recibiendo flujo de agua subterránea en la zona de estudio, y los ríos Lili y Meléndez no muestra un comportamiento que reciben flujo base del acuífero, es decir que en esta zona se encuentra desconectados del acuífero en la Figura 25 se muestra de la dirección de flujo, la zona de recarga y descarga de agua subterránea tanto para la primera capa (Unidad de Suelo) Figura 25 a, Figura 25 b segunda capa (estrato arcilloso) y Figura 25 c para la tercera capa (depósitos no consolidados de arena y grava)



26a

26 b

26 c

Figura 25 Mapa de dirección de flujo de tres capas.

7. Evaluación de los diferentes escenarios

7.1 Evaluación de los diferentes escenarios de amenaza de ocupación urbana.

Los cambios de uso del suelo:

Derivados de la expansión y extensión de actividades antrópicas que generan impactos negativos en la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos, y contribuyen significativamente en los procesos de cambio climático a nivel regional (Sahagún-sánchez & Reyes-hernández, 2018).

En ese orden de ideas un cambio de uso del suelo en el área de expansión urbana generaría un impacto negativo en sobre la zona de recarga del acuífero del municipio de Santiago de Cali, afectando así el recurso hídrico subterráneo en cantidad y calidad, además de poner en riesgo el abastecimiento a futuro de la ciudad.

A nivel mundial, las estrategias más efectivas para mitigar y prevenir los efectos derivados de amenazas por cambio en el uso de suelo, así como la deforestación, se fundamentan en el establecimiento de Áreas Naturales Protegidas (ANP) (Sahagún-sánchez & Reyes-hernández, 2018).

Sin embargo en este caso no se podría contemplar el área de recarga del acuífero del municipio como un ANP, dado al modelo de desarrollo económico que prima sobre el desarrollo ambiental y social, además se debe tener en cuenta un crecimiento demográfico y de inmigración que tiene la ciudad hoy en día. Lo que traduce en contemplar nuevas áreas a urbanizar y posiblemente no se tenga valorado los servicios ecosistémicos que ofrecen estas áreas.

A nivel mundial se ha identificado en diversos estudios que la actividad humana y especial la urbanización afecta la calidad y la cantidad de agua subterránea, dichos efectos se reflejan en cuanto a la afectación del balance hídrico, además de nuevas fuentes de contaminación. Las urbanizaciones traen de por sí una disminución de la extracción del agua subterránea (Velis, Conti, & Biermann, 2017), posiblemente los cambios en el balance hídrico pueden traer una pérdida general en su renovación de agua joven en la unidad geológica de almacenamiento. Sin embargo, es posible que en la línea de tiempo

el nivel de agua subterránea aumente en el área de urbanización debido a la posible disminución de aprovechamiento del recurso en el área, a un constante volumen de recarga y a las posibles fugas que pueda genera tuberías subterráneas y canales abiertos, siendo este último mecanismo antrópicos de recarga del acuífero local. Lo anterior puede significar que la cantidad de agua subterránea pueda aumentar en el área de expansión, sin que esto signifique que la calidad del recurso sea optima tanto para consumo humano como los ecosistemas que depende de ella. De igual forma los cambios en los niveles de agua subterránea traen de por sí estos impactos de la urbanización también pueden extenderse a decenas de miles de kilómetros de la nueva área a urbanizar.

En el departamento del Valle del Cauca, el aprovechamiento de las aguas subterránea en un 90% se encuentra destinado a la agricultura y solo en un 3% se emplea para abastecimiento público (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC, 2017). Recientemente las aguas subterráneas en el departamento han tenido una importancia para el consumo humano de los centros poblados, tales como Vijes, La Victoria, Candelaria, entre otro dado que los caudales de oferta hídrica superficial que han disminuido y por ende su calidad para consumo humano, lo anterior se debe a factores como: variabilidad climática, el uso inadecuado del suelo y vertimientos a las fuentes superficiales. Por tal motivo es necesario para la preservación de las aguas subterránea desarrollar una gestión del recurso con una planificación del uso del suelo (Velis et al., 2017)

La zona de expansión urbana es concebida desde el Plan de Ordenamiento Territorial-POT del municipio de Santiago de Cali, como una estrategia para contribuir a la disminución del déficit habitacional y es donde se encuentra proyectado el crecimiento de la ciudad de Santiago de Cali con un área 1.632,5 Ha. En la actualidad hay adoptados por parte municipio los planes parciales hacia el Norte de la zona de expansión cercanos al río Lili para uso de vivienda y conjuntos de apartamentos con un área construida al año 2012 de 239 Ha, y dejando a esa fecha un área por construir de 1393,5 Ha.

Para la vigencia del nuevo POT-2014 , el crecimiento de la población se estima en 200 mil habitantes, para darle solución a estos habitantes se necesitarán 55 mil viviendas y que representa un construida de 760 Ha de suelo, y a la fecha los planes parciales adoptados es el Plan Parcial Vegas de COMFANDI es el único plan parcial aprobado en zona de expansión que propone unidades de Vivienda de Interés Prioritario- VIP con un 61% que equivale a (2093), el resto en Viviendas de Interés Social-VIS (1357), adicionalmente un 3% de su área construida en otros usos como parques (POT, 2014)

A continuación, se describen los escenarios de modelación numérica de las intervenciones que se puedan realizar en el área de expansión urbana, dichas intervenciones se encuentran enfocadas al cambio del uso del suelo en que se encuentran los planes parciales, por coberturas duras, se tomará el cambio de cobertura como la amenaza de un área de recarga que puede ser sensible al agotamiento hídrico del acuífero en sus primeros metros. Por otro lado, la modelación de los escenarios tiene como objetivo observar del riesgo por agotamiento del acuífero en sus primeros metros. Los escenarios de amenaza que se modelaron fueron los siguientes:

1. Impermeabilización del suelo en su primer metro
2. Impermeabilización del suelo en los dos primeros metros
3. Impermeabilización del suelo en los tres primeros metros

Para observar el cambio de las coberturas en el suelo en el área de expansión urbana, se realizó un cambio en la conductividad hidráulica para cada uno de los escenarios propuestos de evaluación, de igual forma para la evaluación de cada uno de los escenarios es necesario el refinamiento de la malla del modelo, dado que las dimensiones de la malla inicialmente son de una superficie de 10668 m² (84 m x 127 m), pasa a un refinamiento en el área de expansión urbana de 1705 m² (40.6m x 42 m) Figura 26. A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios.

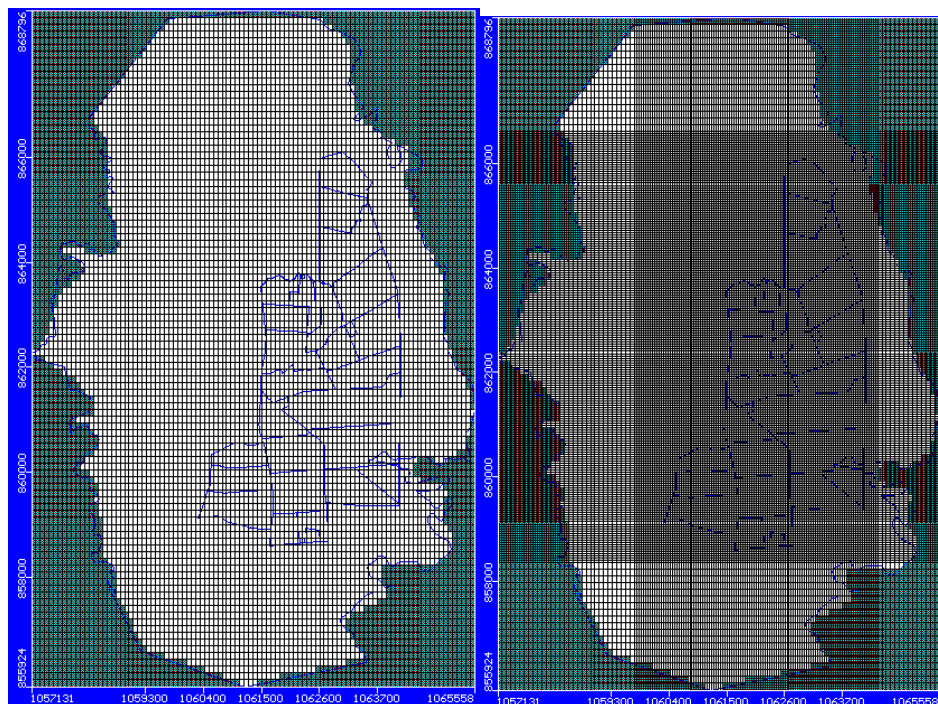


Figura 26. Refinamiento de la malla para los escenarios.

Para observar los efectos de la amenaza de expansión urbana por impermeabilización del suelo es necesario generar zonas de balance de agua para cada uno de los planes parciales y por cada escenario de amenaza de urbanización que se tuvo en cuenta para determinar el riesgo por agotamiento en que se encuentra sometido el acuífero en la zona de recarga, finalmente compararlos entre el escenario sin intervención y escenario intervenido, en total se tienen 25 zonas de balance de agua por cada una de las capas y para los modelos de los escenarios se obtuvo 75 zonas de balance de agua Figura 27. Se debe tener en cuenta que el programa numérico genera la zona balance de agua entre la entrada y la salida de cada uno de los límites de las zonas determinadas, que para este caso del estudio son los planes parciales, es decir que el programa calcula el caudal o volumen de transferencia en cada uno de los ejes cartesianos.

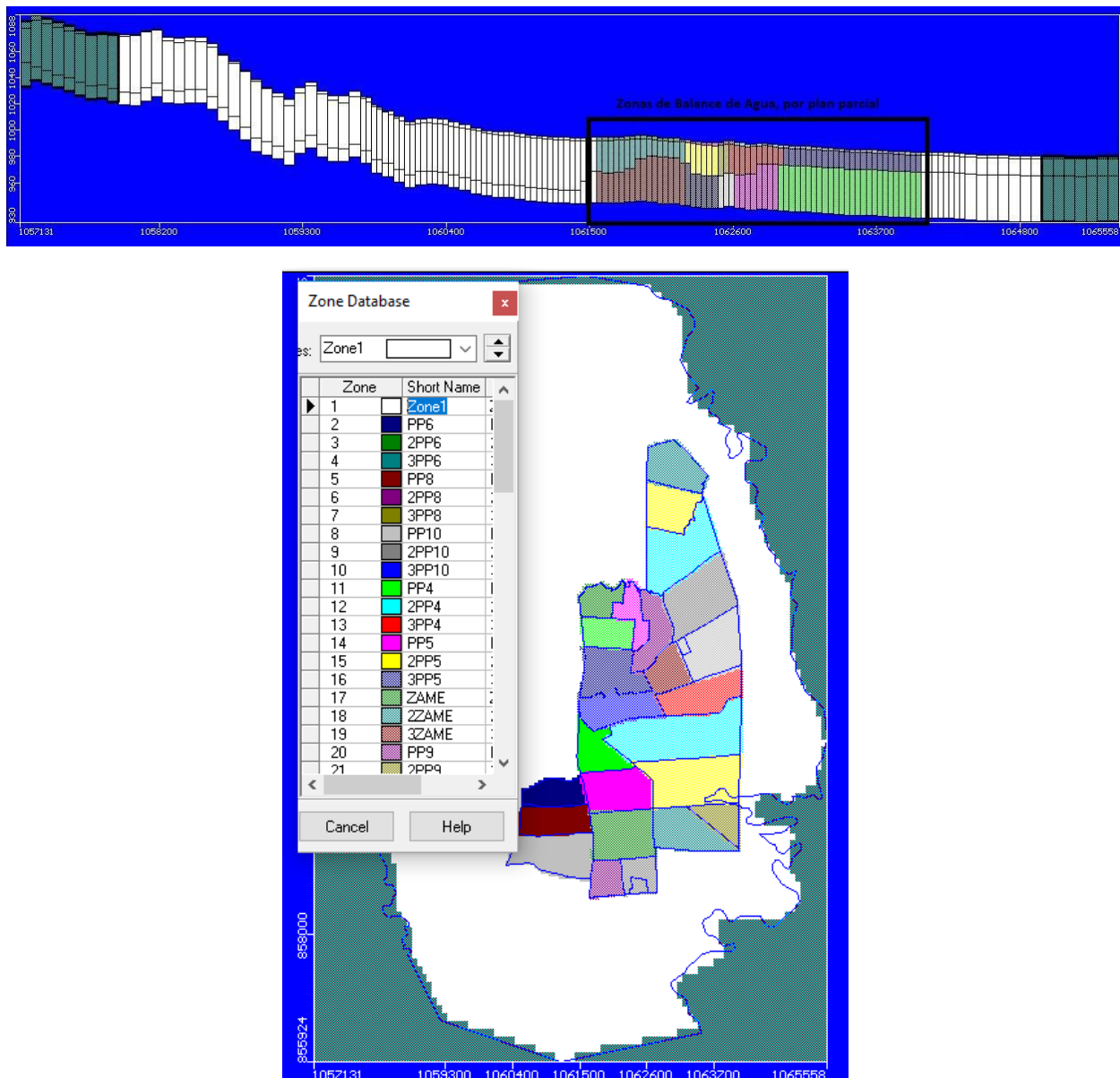


Figura 27. Zonas de balance en el modelo numérico.

Dado que, dentro la revisión bibliográfica que se realizó no se encontró por parte de los autores consultados valores o rangos de estimación por agotamiento de acuífero, los cuales defina en una escala numérica o conceptual que tanto se podría estar afectado un acuífero por una intervención antrópica como lo es cambio de uso del suelo, en su volumen de almacenamiento o caudal que pasa en la zona de recarga. En ese orden de ideas para el estudio se definirán los rangos teniendo en cuenta el caudal de entrada que entra pasa por cada una de las delimitaciones a los Planes Parciales Figura 28.

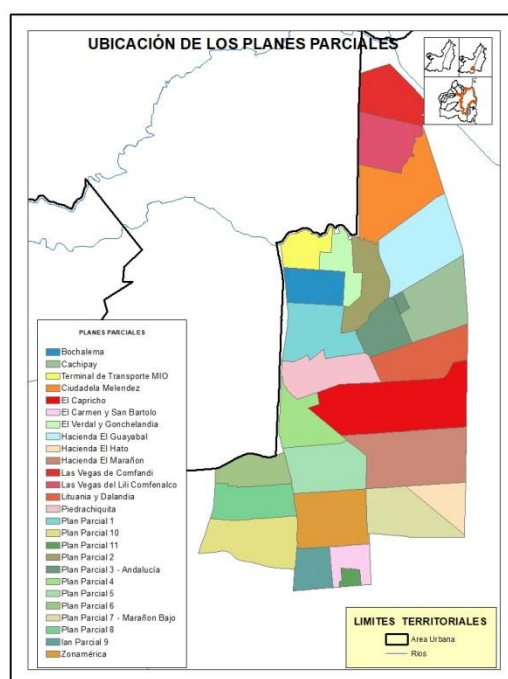


Figura 28 Ubicación espacial de cada uno de los planes parciales

Para ello se plantea desde la investigación definir de la escala de agotamiento del caudal en el área de expansión urbana por cada uno de los planes parciales y que dependerá de la relación expresada en porcentaje de los caudales entrada y salida para cada plan parcial, teniendo en cuenta que una disminución del caudal mayor al 70%, se estará afectado las reservas jóvenes de agua subterránea, a continuación, se relaciona la escala del agotamiento que se tuvieron en cuenta:

- ◆ Mayor al 70% Agotamiento Alto
- ◆ Entre 30-70% Agotamiento Medio
- ◆ Menor al 30% Agotamiento Bajo.

7.1 Impermeabilización del suelo en su primer metro.

Para este escenario se anexa al modelo numérico una capa de un metro de profundidad con respecto a la cota de terreno, además se cambia las condiciones de conductividad hidráulica para la primera capa pasando de un material Limoso a una Arcilla Figura 29.

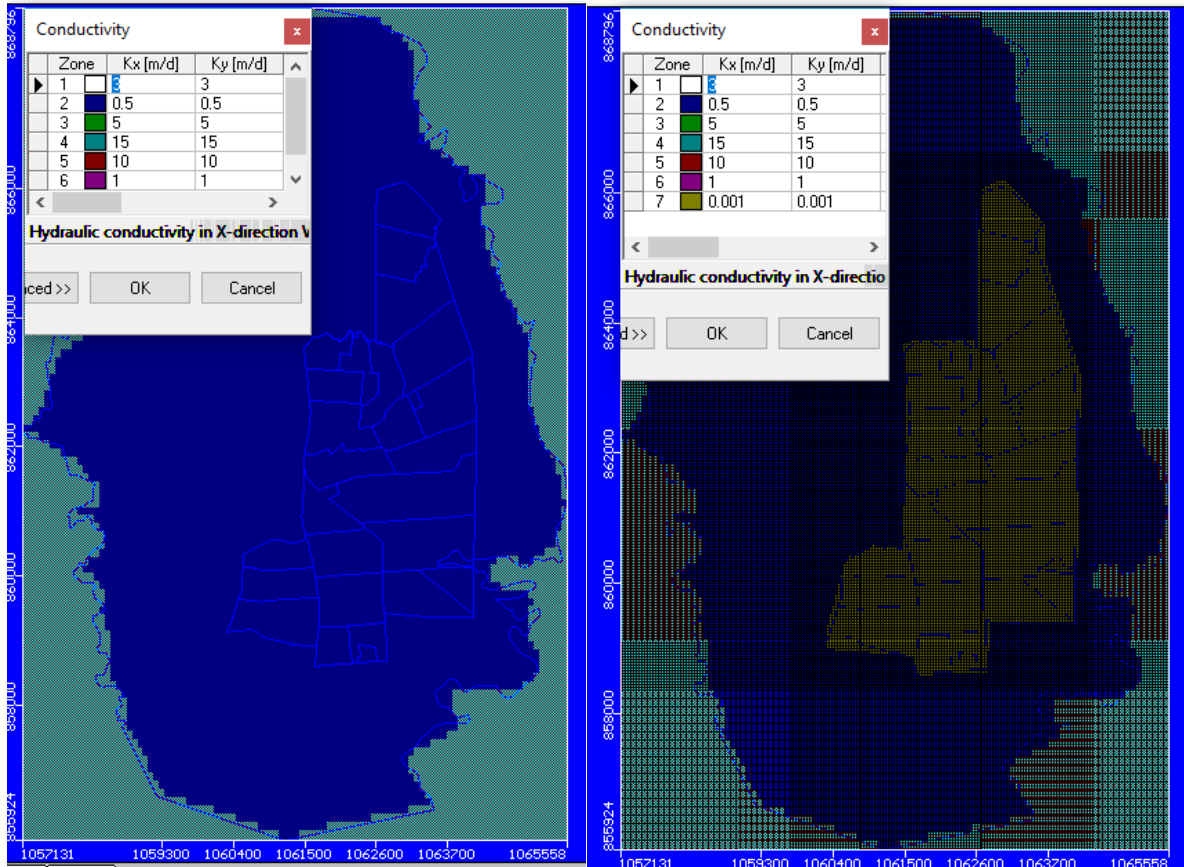
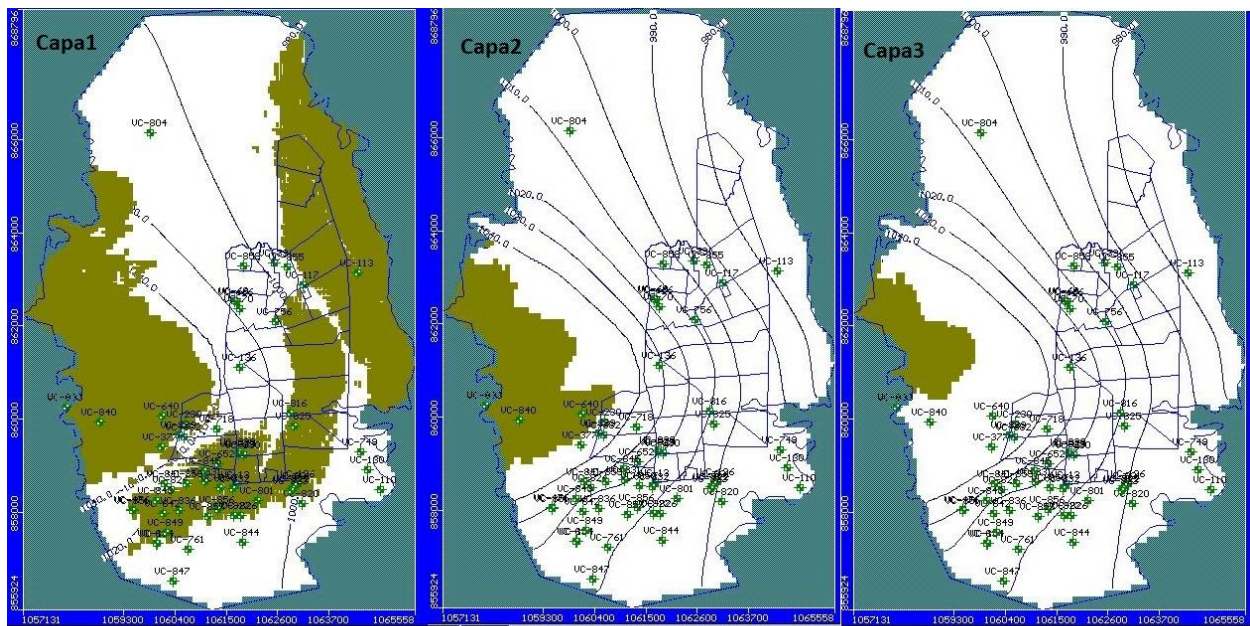
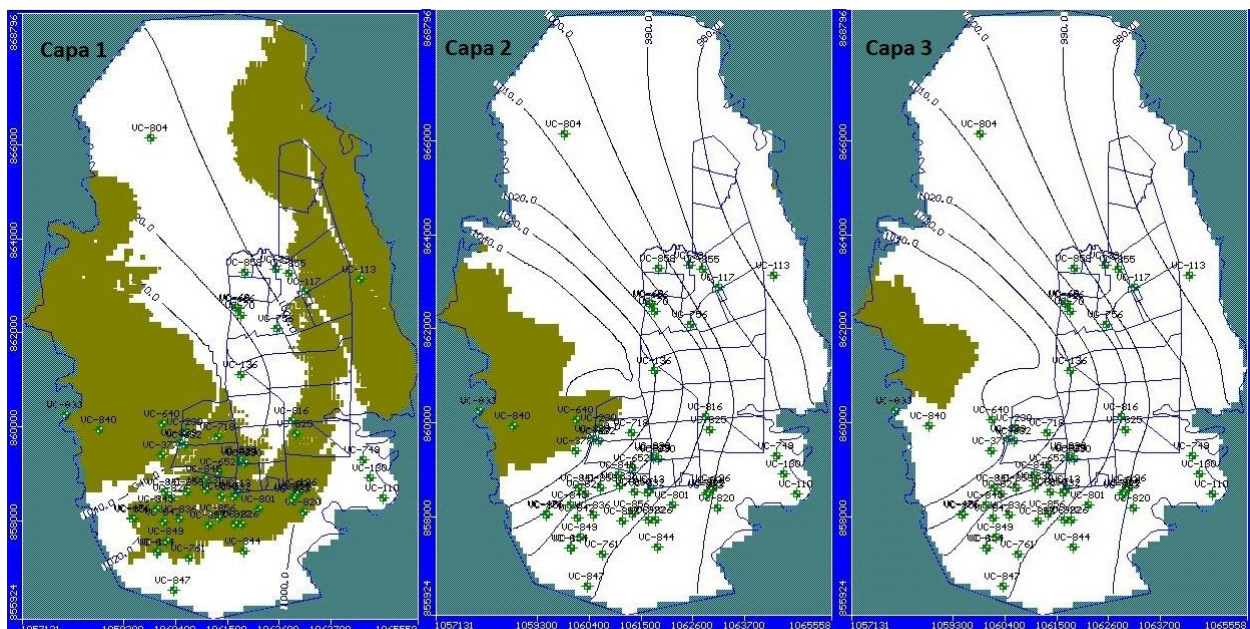


Figura 29. Cambio de la conductividad hidráulica en la primera capa.

Los resultados de la modelación presentan una dirección de flujo de Occidente a Oriente, es decir que cambio de uso del suelo no afectará la dirección de su flujo. Sin embargo, se observa en los resultados que existe una redistribución de áreas de celdas secas entre las condiciones naturales y las condiciones de intervención Figura 30. De igual forma, se observa en cuanto al comportamiento del flujo en la segunda y tercera entre la comparación de sin escenario y con escenario que también existe un reacomodamiento de las líneas de flujo con la impermeabilización del suelo las cuales tiende al Nororiente y luego hacia Oriente.



Modelación sin escenario de impermeabilización



Modelación con escenario de impermeabilización

Figura 30. Dirección de flujo y comportamiento de celdas secas para el primer escenario.

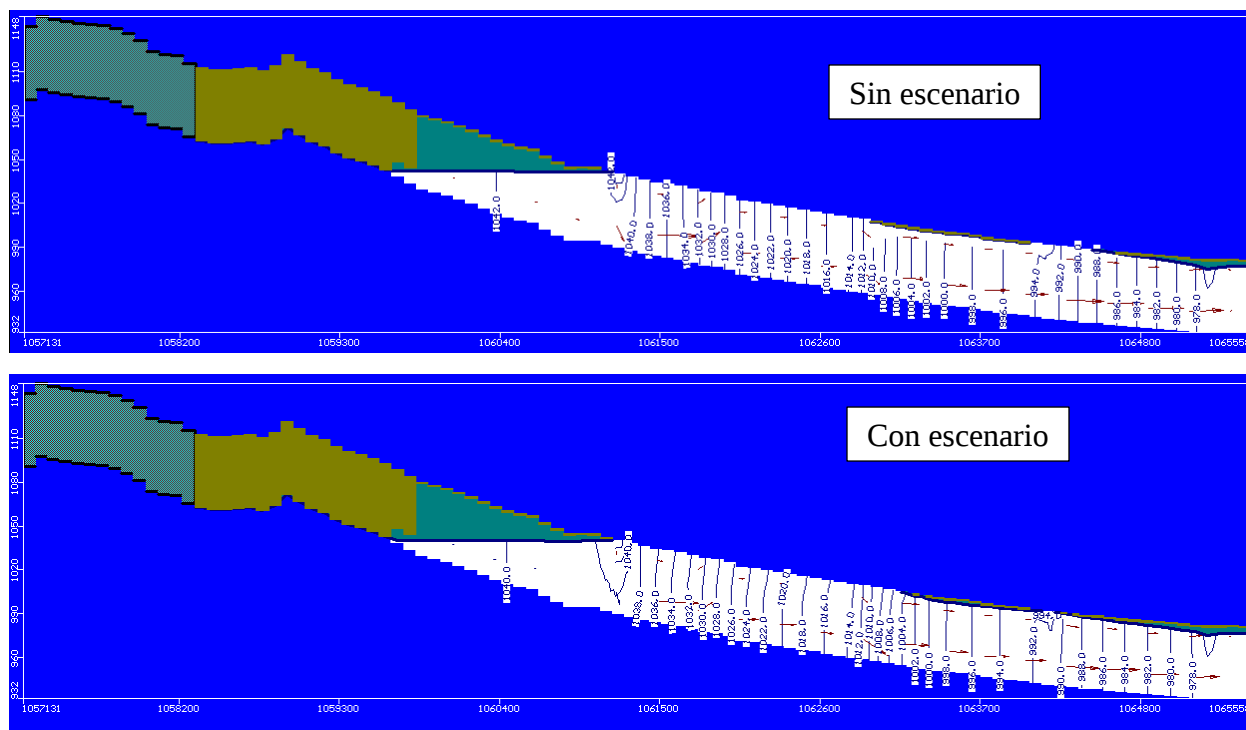
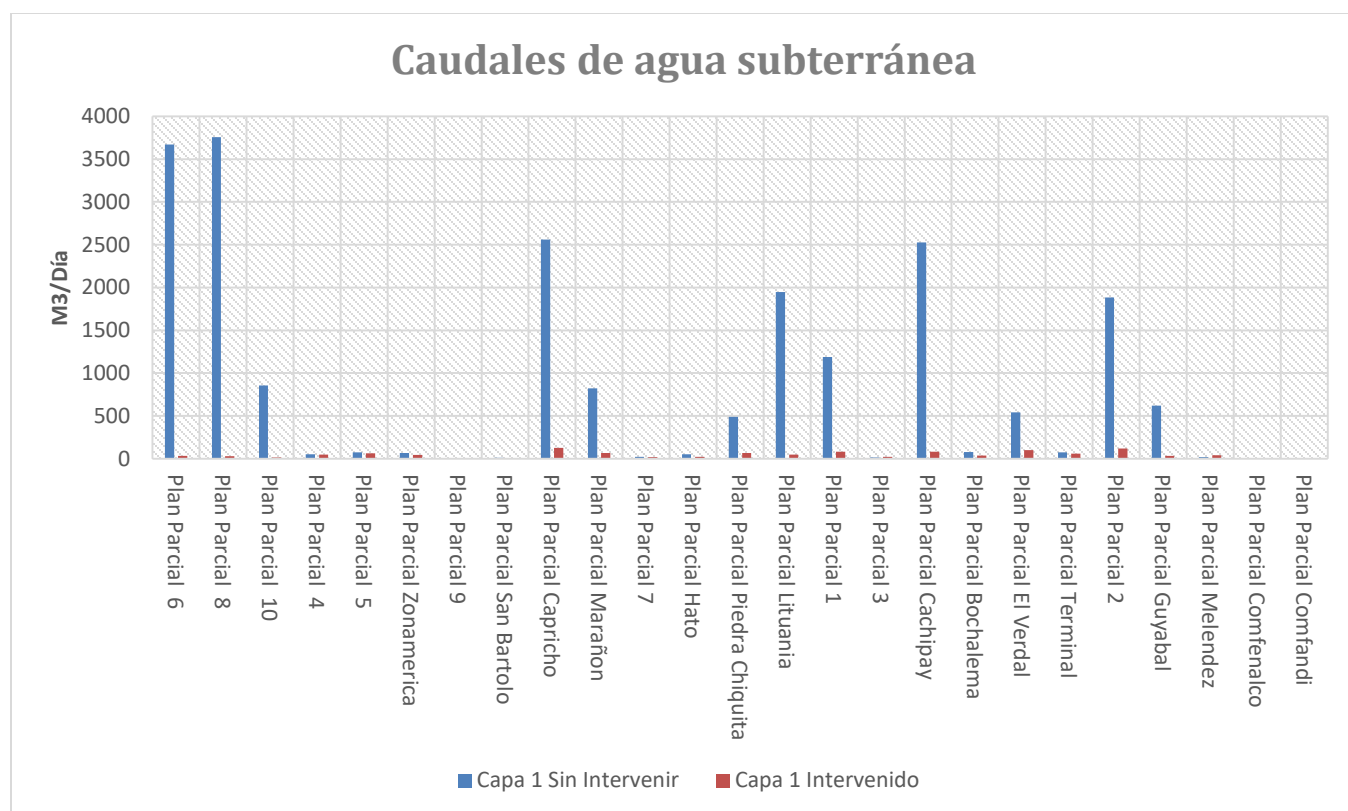


Figura 31. Corte transversal del comportamiento de las líneas de flujo

Como se observa en la Figura 31, el comportamiento de las líneas tiende a tener una mayor concentración con el escenario de impermeabilización, lo anterior se debe al aumento de los niveles piezométricos que genera la estructura lo que traduce como inundaciones en los niveles más bajos por la posible presión hidrostática que ejerce la estructura sobre la capa primera capa. Por otro lado, se realiza el balance de agua la simulación numérica sin escenario y con escenario, los resultados se presentan a continuación en la: Gráfica 1, Gráfica 2 y Gráfica 3, cada una de ella es resultado obtenido de la Capa1, Capa2 y Capa3:

Para la Grafica 1, de acuerdo con la comparación del balance de agua de entrada y salida de cada uno de los planes parciales teniendo en cuenta el escenario natural y con intervención del 100% del área de la zona urbana del municipio, se encuentra que existe una afectación de la disminución de los caudales de entrada al acuífero en cada uno de los planes parciales, dicha información es extraída de las zonas de balance de agua que general el modelo numérico, donde él compara en caudal o volumen de entrada de agua subterránea de cada uno de los ejes cartesianos generando una diferencia de almacenamiento y traspaso de volumen o caudal por celda de cómputo. Como se observa en la gráfica las zonas sensibles al riesgo por agotamiento del recurso hídrico son las zonas donde se ubica los Planes Parciales6, 8, 1,2 Lituania, Capricho y Cahipay,



Gráfica 1. Flujo de entrada y salida para cada uno de los planes parciales.

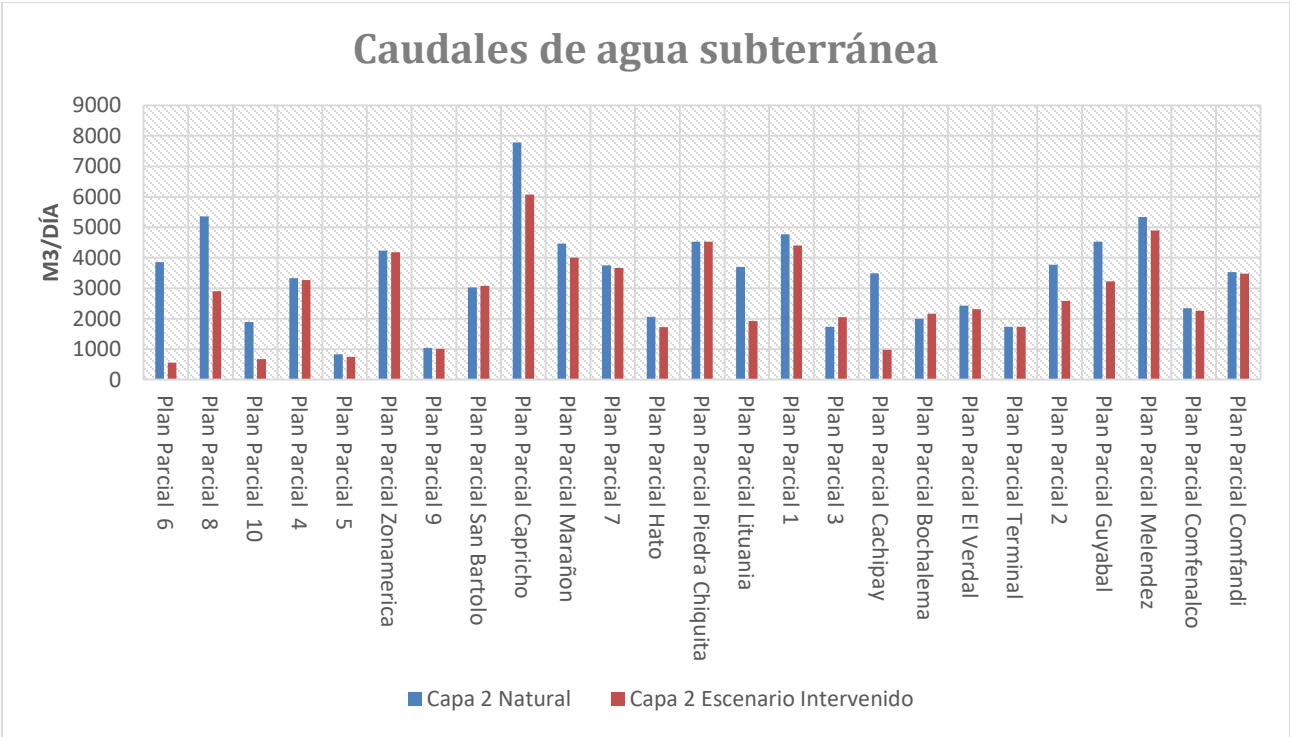
A continuación en la Tabla 9, se relaciona el porcentaje de agotamiento que se tiene para primera capa de intervención, como se observa en la tabla los Planes Parciales-PP, que encuentran hacia el Suroccidente del área de expansión urbana son lo que poseen mayor afectación a cuanto al recurso hídrico una vez se lleve a cabo el proceso de urbanización.

Tabla 9 Porcentaje de agotamiento en la primera capa

Plan Parcial	Porcentaje de Afectación	Escala
Plan Parcial 8	99.26	Alto
Plan Parcial 6	99.11	Alto
Plan Parcial 10	98.53	Alto
Plan Parcial Lituania	97.64	Alto
Plan Parcial Cachipay	96.79	Alto
Plan Parcial Capricho	95.11	Alto
Plan Parcial Guayabal	94.54	Alto
Plan Parcial 2	93.70	Alto
Plan Parcial 1	93.05	Alto

Plan Parcial Marañón	91.98	Alto
Plan Parcial Piedra Chiquita	86.21	Alto
Plan Parcial El Verdal	81.26	Alto
Plan Parcial Hato	56.62	Medio
Plan Parcial Bochalema	51.27	Medio
Plan Parcial San Bartolo	50.80	Medio
Plan Parcial Zonamerica	33.07	Medio
Plan Parcial Comfenalco	31.57	Medio
Plan Parcial Terminal	23.90	Bajo
Plan Parcial 5	14.78	Bajo
Plan Parcial 7	13.07	Bajo
Plan Parcial 4	12.88	Bajo
Plan Parcial 9	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial 3	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial Meléndez	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial Comfandi	0.00	No Hay Afectación

Para la segunda capa en la Gráfica 2, se observa una estabilización de los caudales en las zonas de balance del escenario con intervención, comparado con el escenario natural, sin embargo para los Planes Parciales 6, 8 y Cachipay sigue mostrando una afectación frente al recurso hídrico subterráneo. De igual forma en la Tabla 10, se muestra la relación de afectación para la segunda capa, solo el Plan Parcial 6 sigue teniendo una afectación en relación al agotamiento expresado en porcentaje de caudal entre el escenario natural a un caudal de un escenario intervenido.



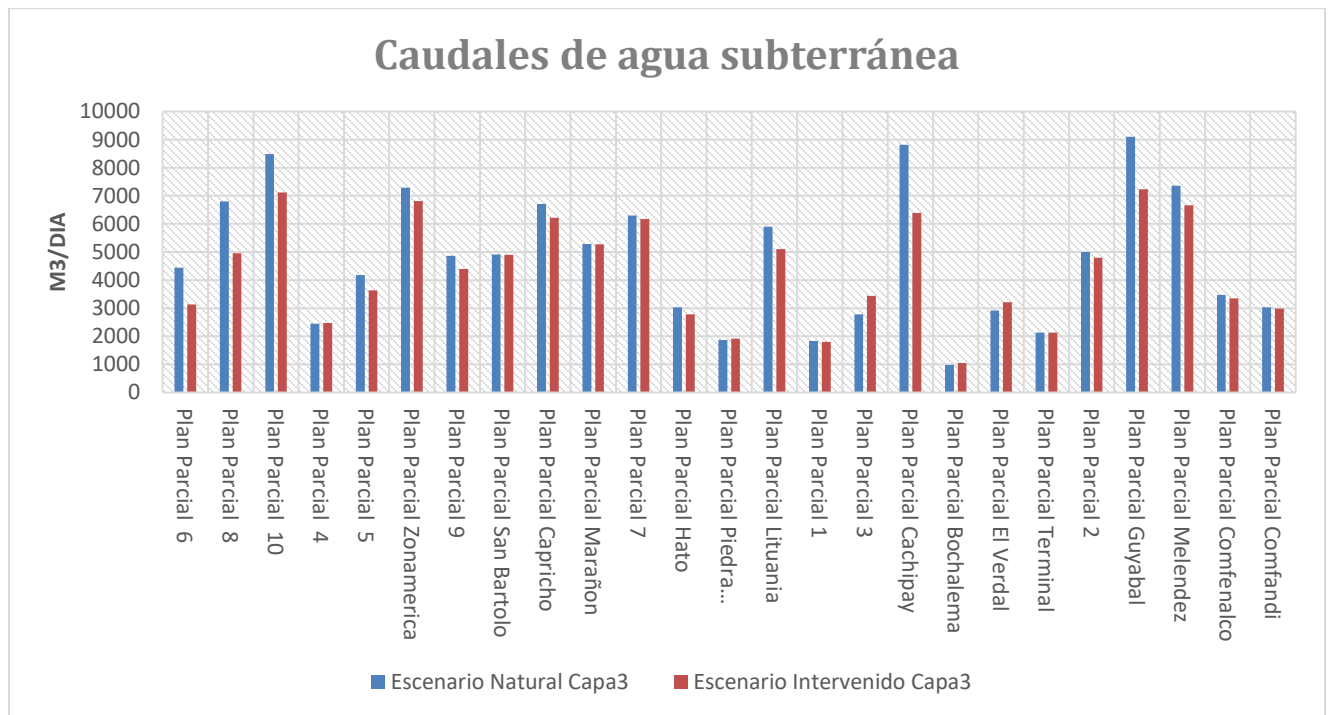
Gráfica 2. Flujo de entrada y salida para cada uno de los planes parciales en la segunda capa.

Tabla 10 Porcentaje de agotamiento en la segunda capa

Plan Parcial	Porcentaje de Afectación	Escala
Plan Parcial 6	85.54	Alto
Plan Parcial Cachipay	71.81	Medio
Plan Parcial 10	64.35	Medio
Plan Parcial Lituania	48.03	Medio
Plan Parcial 8	45.84	Medio
Plan Parcial 2	31.39	Medio
Plan Parcial Guyabal	28.77	Bajo
Plan Parcial Capricho	22.01	Bajo
Plan Parcial Hato	16.40	Bajo
Plan Parcial 5	10.66	Bajo
Plan Parcial Maraón	10.17	Bajo
Plan Parcial Meléndez	8.22	Bajo
Plan Parcial 1	7.65	Bajo
Plan Parcial El Verdal	4.83	Bajo

Plan Parcial Comfenalco	3.49	Bajo
Plan Parcial 7	2.29	Bajo
Plan Parcial 9	2.22	Bajo
Plan Parcial 4	1.96	Bajo
Plan Parcial Comfandi	1.34	Bajo
Plan Parcial Zonamerica	1.25	Bajo
Plan Parcial Terminal	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial Piedra Chiquita	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial San Bartolo	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial Bochalema	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial 3	0.00	No Hay Afectación

Por ultimo para la tercera capa que es a partir de los 25 metros de profundidad respecto a la cota de terreno se observa en la Gráfica 3 que no existe una diferencia entre los caudales de entrada y salida del modelo, es decir que la dinámica del flujo de agua para esta capa no se ve afectada por el cambio de uso del suelo, sin embargo en la Tabla 11, muestra que la afectación se encuentra por en la escala baja.



Gráfica 3. Flujo de entrada y salida para cada uno de los planes parciales en la tercera capa.

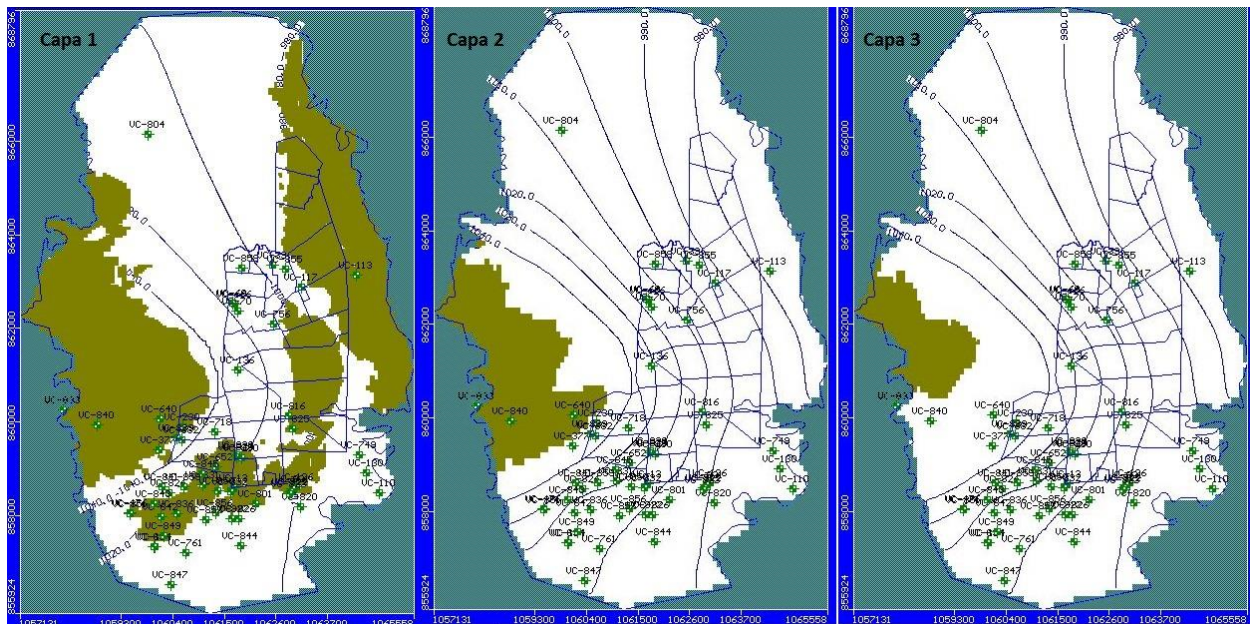
Tabla 11 Porcentaje de agotamiento en la tercera capa

Plan Parcial	Porcentaje de Afectación	Escala
Plan Parcial 6	29.42	Bajo
Plan Parcial Cachipay	27.54	Bajo
Plan Parcial 8	27.10	Bajo
Plan Parcial Guyabal	20.59	Bajo
Plan Parcial 10	16.11	Bajo
Plan Parcial Lituania	13.54	Bajo
Plan Parcial 5	10.00	Bajo
Plan Parcial 9	1.50	Bajo
Plan Parcial Meléndez	7.30	Bajo
Plan Parcial Hato	8.49	Bajo
Plan Parcial Capricho	7.22	Bajo
Plan Parcial Zonamerica	1.20	Bajo
Plan Parcial 2	4.13	Bajo
Plan Parcial Comfenalco	3.48	Bajo
Plan Parcial 7	1.89	Bajo
Plan Parcial 1	1.77	Bajo
Plan Parcial Comfandi	1.37	Bajo
Plan Parcial San Bartolo	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial Terminal	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial Maraón	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial 4	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial Piedra Chiquita	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial Bochalema	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial El Verdal	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial 3	0.00	No hay Afectación

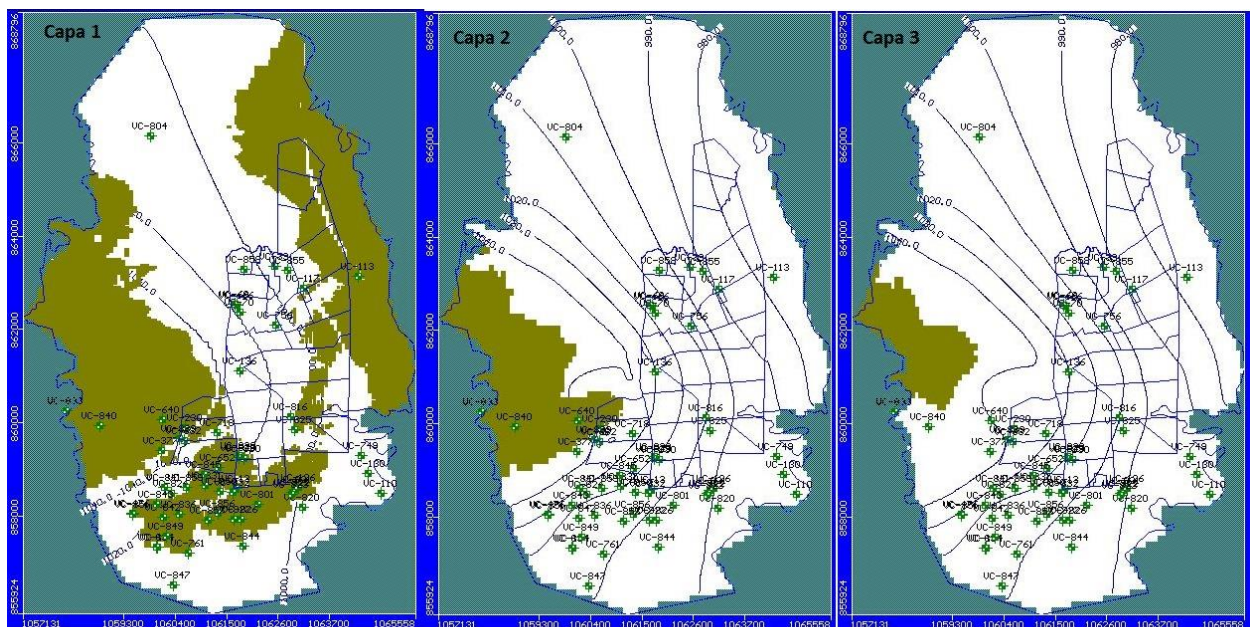
7.2. Impermeabilización del suelo en su segundo metro.

Al comparar los resultados de la modelación numérica en que se adiciona una capa de 2 metros con respecto a la cota de terreno de sin escenario y con escenario, se observa en la Figura 32, que el

comportamiento de las líneas equipotenciales con escenario hacia parte de los planes parciales del Suroccidente tiene a redirigirse hacia esta zona, caso contrario lo que se observa sin escenario, donde el comportamiento de las líneas equipotenciales tiende el mismo de manera de regional, es decir que hacia esta zona posiblemente tenga una concentración de las líneas de flujo



Modelación sin escenario de impermeabilización de dos metros



Modelación con el escenario de impermeabilización dos metros

Figura 32.Comportamiento de las líneas de flujo y distribución de celdas secas

En la Figura 33, muestra un corte transversal en el área de modelación en él se puede identificar las líneas de flujo en el que el escenario de impermeabilización tiende hacia el Occidente en cuanto a su concentración es decir que hacia las zonas donde ubica la impermeabilización tiende una concentración de la piezometría. El comportamiento de este escenario comparado con el escenario anterior de modelación es idéntico.

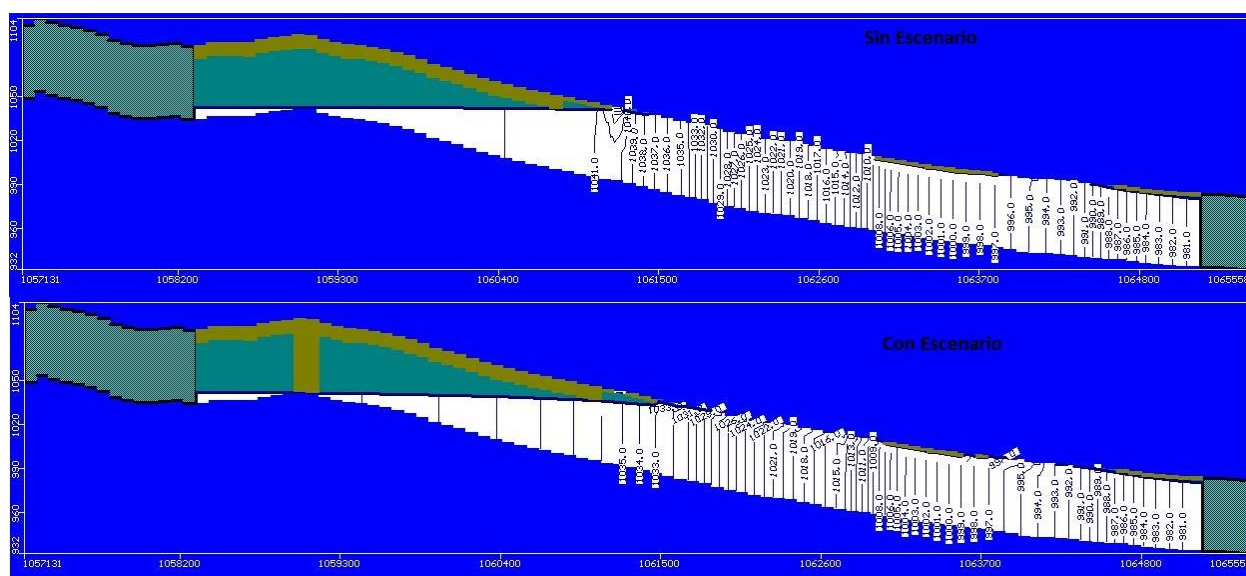
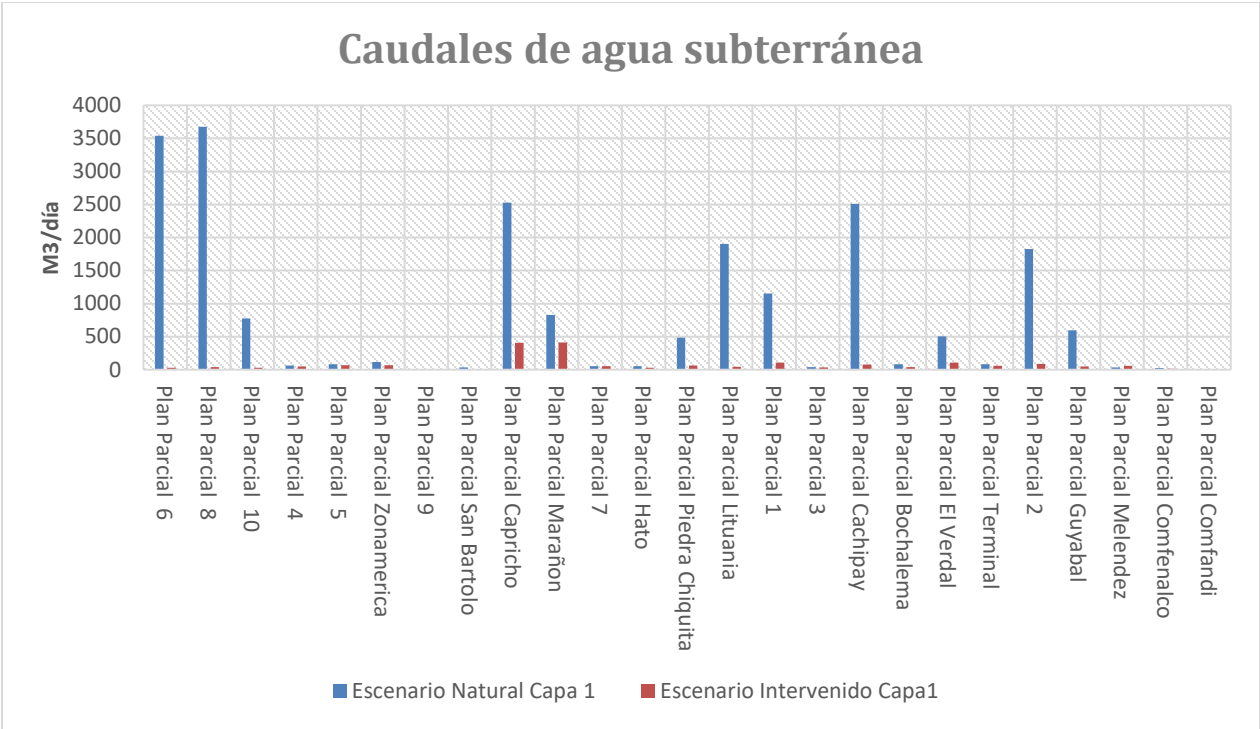


Figura 33. Corte transversal del comportamiento de las líneas de flujo

En cuanto al análisis de balance de agua entre la modelación numérica sin y con escenario se presenta a continuación en la Gráfica 4, Gráfica 5 y Gráfica 6 se encuentra lo siguiente:

Para la Gráfica 4 de acuerdo con la comparación del balance de agua de entrada y salida de cada uno de los planes parciales teniendo en cuenta el escenario natural y con intervención del 100% del área de la zona de urbana del municipio, existe una afectación de la disminución de los caudales de entrada al acuífero en cada uno de los planes parciales. Como se observa las zonas sensibles al a la disminución del caudal por agotamiento se encuentra en la mayoría de los planes parciales y especial los que se encuentran al Suroccidente del área de expansión.



Gráfica 4. Flujo de entrada y salida para cada uno de los planes parciales escenario 2.

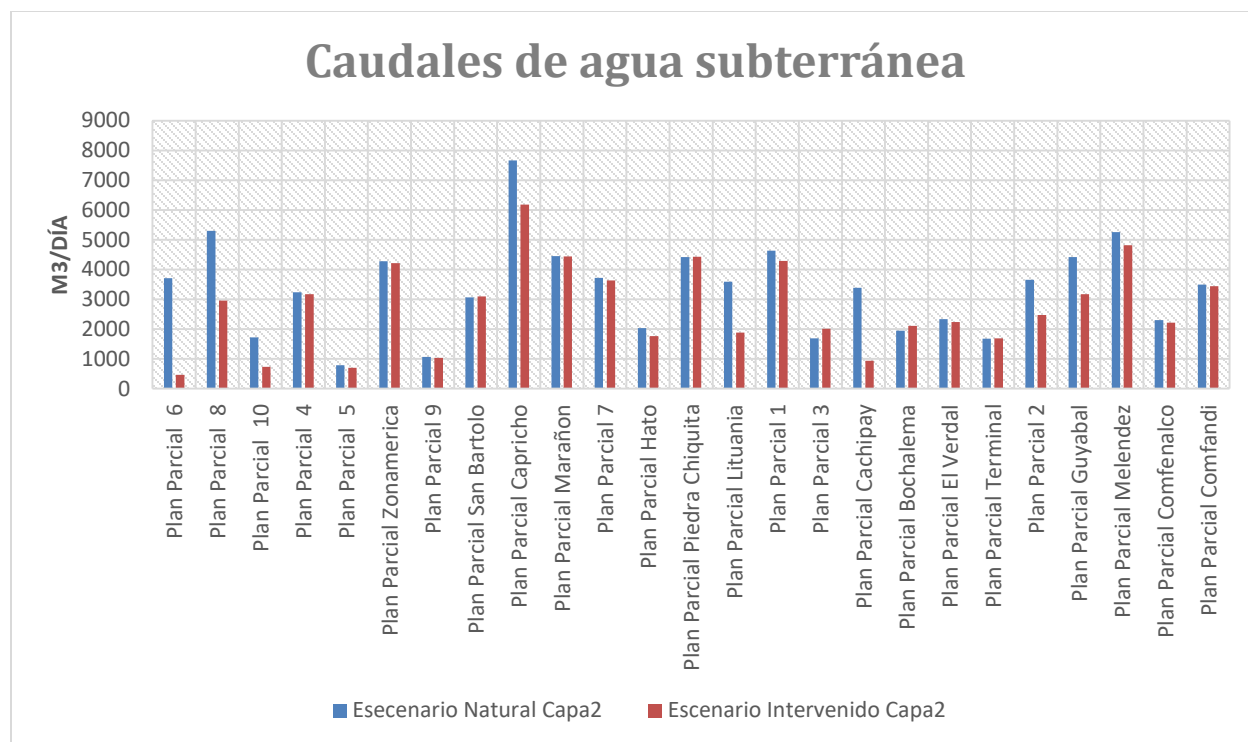
La Tabla 12, muestra que las mayores afectaciones cuanto al porcentaje de afectación se encuentran distribuidos en la zona de los Planes Parciales, mientras que los Planes Parciales 6, 8 y 10 se encuentran hacia Suroccidente y se ubican hacia el Sur del cono aluvial del río Pance, los Planes Parciales Lituania, Cachipay, Plan Parcial 2 se encuentra en el extremo Oriental de la zona de expansión cercanos al contacto con depósito del aluvial del río Cauca.

Tabla 12 Porcentaje de agotamiento del escenario dos capa uno

Plan Parcial	Porcentaje de Afectación	Escala
Plan Parcial 6	99.22	Alto
Plan Parcial 8	98.90	Alto
Plan Parcial Lituania	97.81	Alto
Plan Parcial Cachipay	96.82	Alto
Plan Parcial 10	96.12	Alto
Plan Parcial 2	95.33	Alto
Plan Parcial Guyabal	91.60	Alto
Plan Parcial 1	90.85	Alto

Plan Parcial Piedra Chiquita	86.79	Alto
Plan Parcial Capricho	83.94	Alto
Plan Parcial El Verdal	78.97	Alto
Plan Parcial San Bartolo	62.64	Medio
Plan Parcial Bochalema	54.67	Medio
Plan Parcial Maraón	50.38	Medio
Plan Parcial Comfenalco	46.90	Medio
Plan Parcial Hato	44.40	Medio
Plan Parcial Comfandi	42.27	Medio
Plan Parcial Zonamerica	38.50	Medio
Plan Parcial Meléndez	30.56	Medio
Plan Parcial 4	23.52	Bajo
Plan Parcial 5	17.94	Bajo
Plan Parcial 9	15.47	Bajo
Plan Parcial 7	3.70	Bajo
Plan Parcial Terminal	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial 3	0.00	No hay Afectación

Para la segunda capa del modelo numérico se observa que la dinámica del balance de entrada y salida del flujo de agua subterránea en cuanto a caudal en los planes parciales se estabiliza en la mayoría de ellos. Gráfica 5 solo para los planes parciales 6 y Cachipay sigue presentado una relación en cuanto a la comparación de escenario natural, con el intervenido en la Tabla 13, muestra que los Planes parciales al Nororiente del área de estudio como lo es Terminal, Piedra Chiquita no tendrían una afectación ante posible urbanización en esa área.



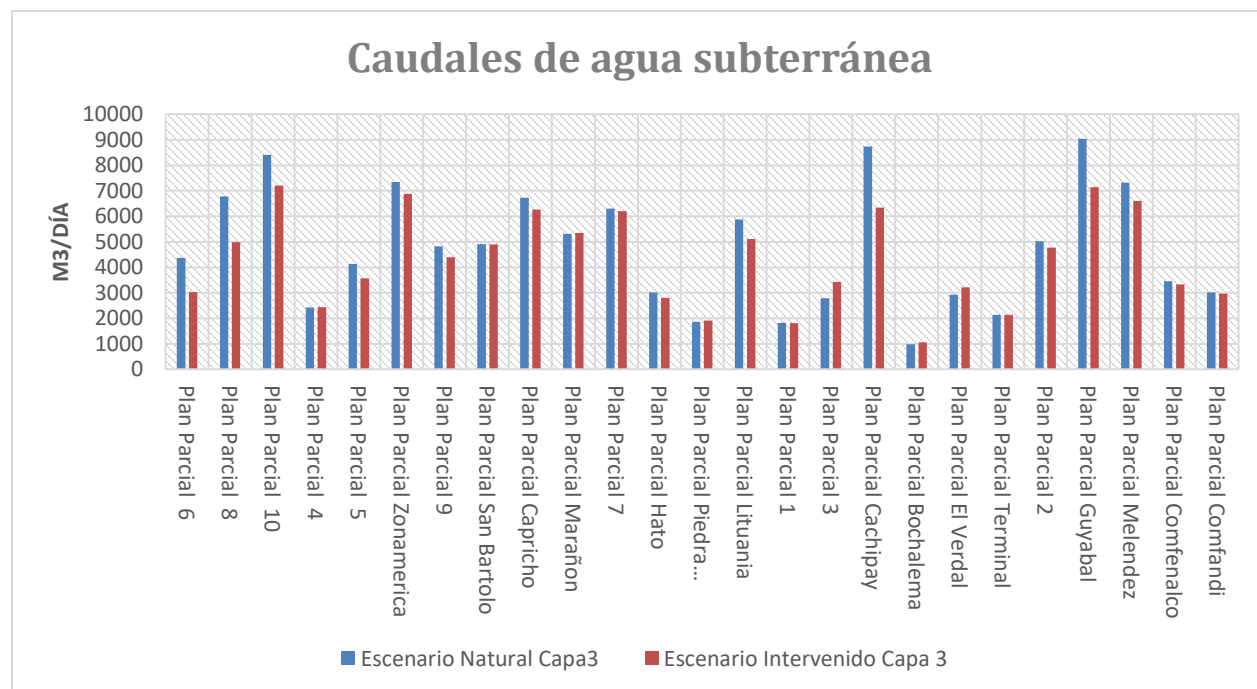
Gráfica 5 Flujo de entrada y salida para la segunda capa planes parciales escenario 2

Tabla 13 Porcentaje de agotamiento del escenario dos capa dos

Plan Parcial	Porcentaje de Afectación	Escala
Plan Parcial 6	87.33	Alto
Plan Parcial Cachipay	72.18	Alto
Plan Parcial 10	57.51	Medio
Plan Parcial Lituania	47.50	Medio
Plan Parcial 8	44.22	Medio
Plan Parcial 2	32.21	Medio
Plan Parcial Guyabal	28.32	Bajo
Plan Parcial Capricho	19.40	Bajo
Plan Parcial Hato	13.21	Bajo
Plan Parcial 5	9.87	Bajo
Plan Parcial Meléndez	8.41	Bajo
Plan Parcial 1	7.50	Bajo
Plan Parcial El Verdal	3.97	Bajo
Plan Parcial Comfenalco	3.67	Bajo

Plan Parcial 9	2.37	Bajo
Plan Parcial 7	2.24	Bajo
Plan Parcial 4	1.98	Bajo
Plan Parcial Zonamerica	1.60	Bajo
Plan Parcial Comfandi	1.43	Bajo
Plan Parcial Maraón	0.31	Bajo
Plan Parcial Terminal	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial Piedra Chiquita	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial San Bartolo	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial Bochalema	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial 3	0.00	No hay Afectación

Por ultimo para la tercera capa que es a partir de los 25 metros de profundidad respecto a la cota de terreno, se observa en la Gráfica 6 que no existe una diferencia entre los caudales de entrada y salida del modelo, es decir que la dinámica del flujo de agua para esta capa no se ve afectada por el cambio de uso del suelo. A demás en la Tabla 14 la escala de afectación bajan significativamente en cada uno de los planes parciales, sin embargo el Plan Parcial 6, es el único que tiene una escala media en su límite inferior, para los demás planes poseen escala baja y ya no tienen afectación por la intervención de la impermeabilización de los dos metros profundidad.



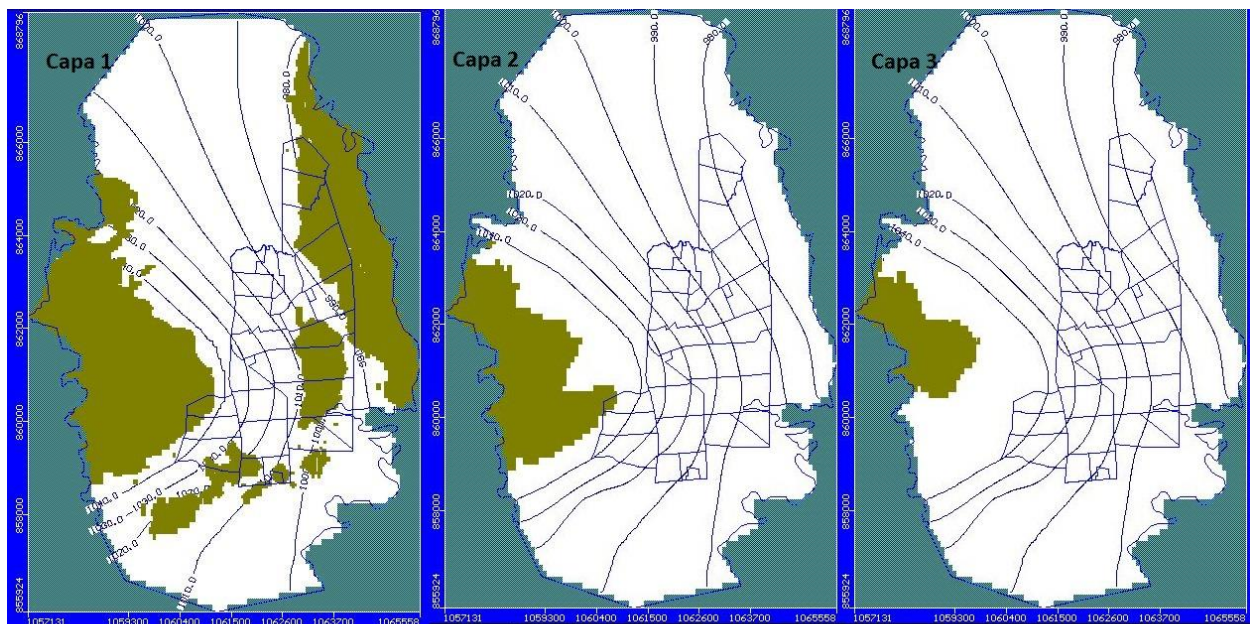
Gráfica 6. Flujo de entrada y salida para cada uno de los planes parciales en la tercera capa escenario 2.

Tabla 14 Porcentaje de agotamiento escenario dos capa tres

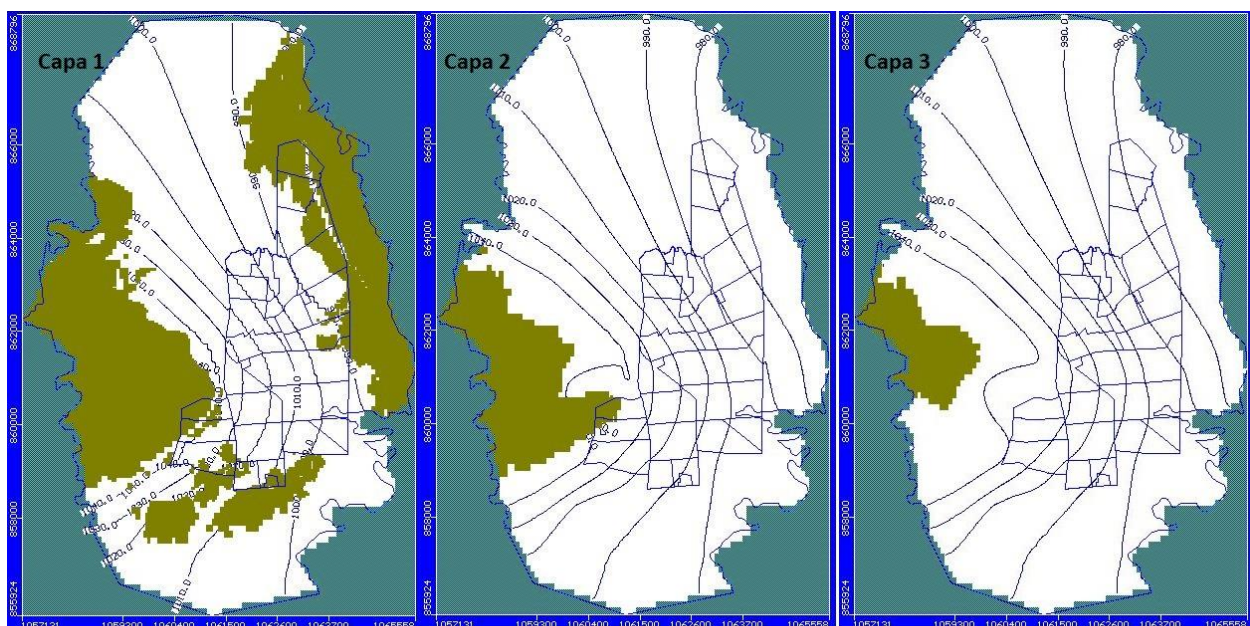
Plan Parcial	Porcentaje de Afectación	Escala
Plan Parcial 6	30.77	Medio
Plan Parcial Cachipay	27.50	Bajo
Plan Parcial 8	26.49	Bajo
Plan Parcial Guyabal	20.93	Bajo
Plan Parcial 10	14.44	Bajo
Plan Parcial 5	13.64	Bajo
Plan Parcial Lituania	12.95	Bajo
Plan Parcial Meléndez	9.76	Bajo
Plan Parcial 9	9.05	Bajo
Plan Parcial Hato	7.14	Bajo
Plan Parcial Capricho	6.84	Bajo
Plan Parcial Zonamerica	6.40	Bajo
Plan Parcial 2	5.00	Bajo
Plan Parcial Comfenalco	3.61	Bajo
Plan Parcial 7	1.69	Bajo
Plan Parcial Comfandi	1.39	Bajo
Plan Parcial 1	1.24	Bajo
Plan Parcial San Bartolo	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial Terminal	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial 4	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial Marañón	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial Piedra Chiquita	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial Bochalema	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial El Verdal	0.00	No hay Afectación
Plan Parcial 3	0.00	No hay Afectación

7.3 Impermeabilización del suelo en su tercer metro.

Los resultados de la piezometría para este escenario, son iguales los escenarios anteriores, sin embargo en la comparación de celdas secas a nivel de la modelación numérica se encuentra que el área disminuye en los resultados sin intervención a con intervención Figura 34, la disminución de las celdas secas en el escenario de impermeabilización se deba concentración de las líneas de flujo, que hace que aumente el nivel de agua en estas zonas.



Modelación sin escenario de impermeabilización de tres metros

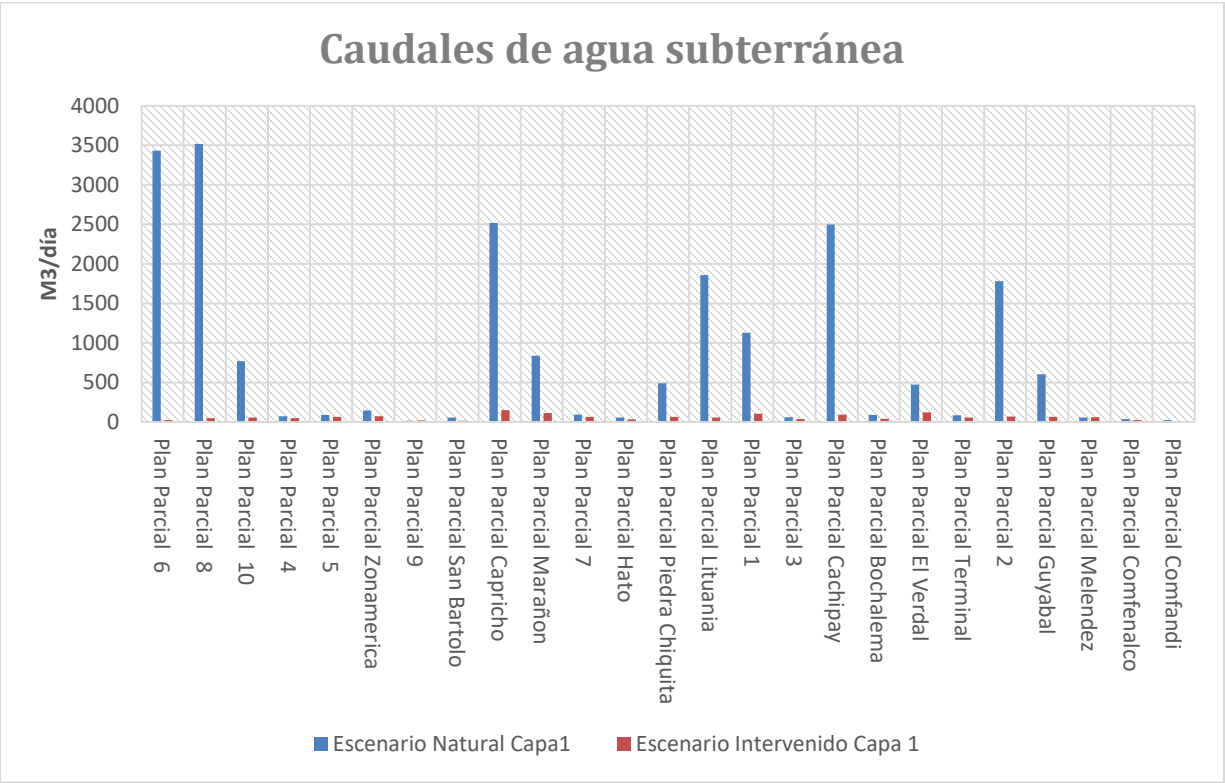


Modelación con escenario de impermeabilización de tres metros

Figura 34.Comportamiento de las líneas de flujo y de celdas secas para el tercer escenario.

En cuanto al balance de agua para cada uno de los planes parciales entre el escenario natural y el de intervención se observa en la Gráfica 7, Gráfica 8 y Gráfica 9:

En la Gráfica 7, que corresponde a la comparación del balance entre el escenario natural y de intervención hasta una profundidad de 3 metros, las afectaciones de la impermeabilización persisten y comparados con los escenarios de amenaza de impermeabilización, se observa que la reducción de caudal para los planes parciales es mayor, lo anterior se debe a que la intervención al acuífero es mayor ya que se está cambiando el área y la profundidad. De igual forma en la Tabla 15, se muestra la escala de afectación que se tiene por cada Plan Parcial, encontrado que el 52% su impermeabilización tendría una agotamiento alto en cuanto al recurso hídrico, solo 8% de los planes no tendría afectación que son el Plan Parcial 9 que ubicándose al Nororiente del área después del Plan Parcial 10, el cual tiene un porcentaje de afectación alta y el Plan Parcial Meléndez que se encuentra al Suroriente, para este plan se ubica del cono aluvial del río Lili, caracterizando por poseer un espesor mayor a 10 metros de arcilla, convirtiéndose en una protección al acuífero y que su niveles de agua hacia esta zona se encuentra por debajo de los tres metros de profundidad.

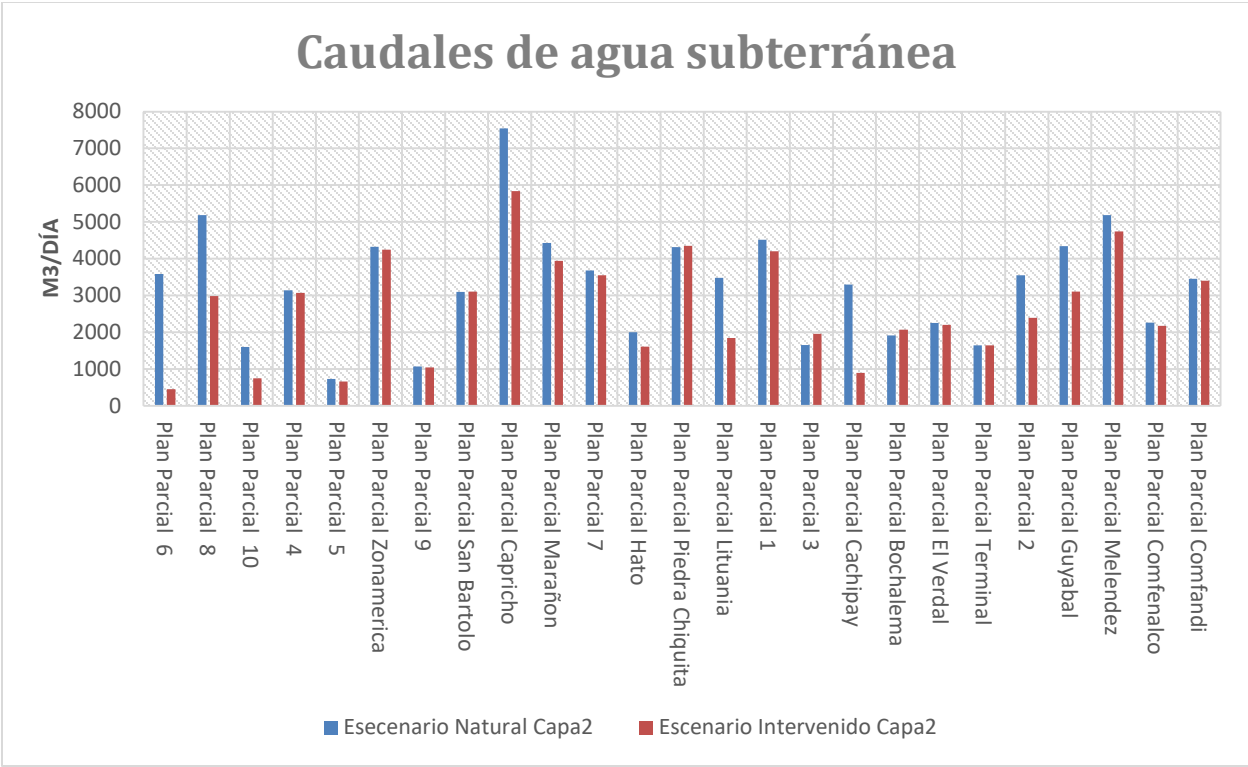


Gráfica 7. Flujo de entrada y salida para cada uno de los planes parciales escenario 3

Tabla 15 Porcentaje de agotamiento del escenario tres capa uno

Plan Parcial	Capa	Porcentaje de Afectación	Escala
Plan Parcial 6	1	99.22	Alto
Plan Parcial 8	1	98.63	Alto
Plan Parcial Lituania	1	96.96	Alto
Plan Parcial Cachipay	1	96.29	Alto
Plan Parcial 2	1	96.06	Alto
Plan Parcial Capricho	1	93.98	Alto
Plan Parcial 10	1	92.36	Alto
Plan Parcial 1	1	90.62	Alto
Plan Parcial Guyabal	1	89.27	Alto
Plan Parcial Piedra Chiquita	1	86.80	Alto
Plan Parcial Marañón	1	86.51	Alto
Plan Parcial El Verdal	1	73.73	Alto
Plan Parcial Comfandi	1	73.71	Alto
Plan Parcial San Bartolo	1	69.74	Medio
Plan Parcial Bochalema	1	53.07	Medio
Plan Parcial Zonamerica	1	49.54	Medio
Plan Parcial Hato	1	43.45	Medio
Plan Parcial 3	1	39.87	Medio
Plan Parcial Terminal	1	35.50	Medio
Plan Parcial Comfenalco	1	33.52	Medio
Plan Parcial 4	1	32.52	Medio
Plan Parcial 7	1	31.31	Medio
Plan Parcial 5	1	27.03	Bajo
Plan Parcial 9	1	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial Meléndez	1	0.00	No Hay Afectación

Para la segunda capa se observa en la Gráfica 8, se observa que la diferencia de caudales en el balance de agua entre el escenario natural e intervenido, persisten para algunos Planes Parciales como lo es el Plan Parcial 6, Cachipay, Plan Parcial 8, siendo la ubicación espacial de estos planes sensibles a una intervención antrópica, Por otro lado en la Tabla 16, se muestra la escala de afectación encontrando que dos Planes Parciales poseen una afectación alta y que el 48% de los las urbanizaciones propuesta poseen tendrían una afectación baja en cuanto al agotamiento del acuífero.



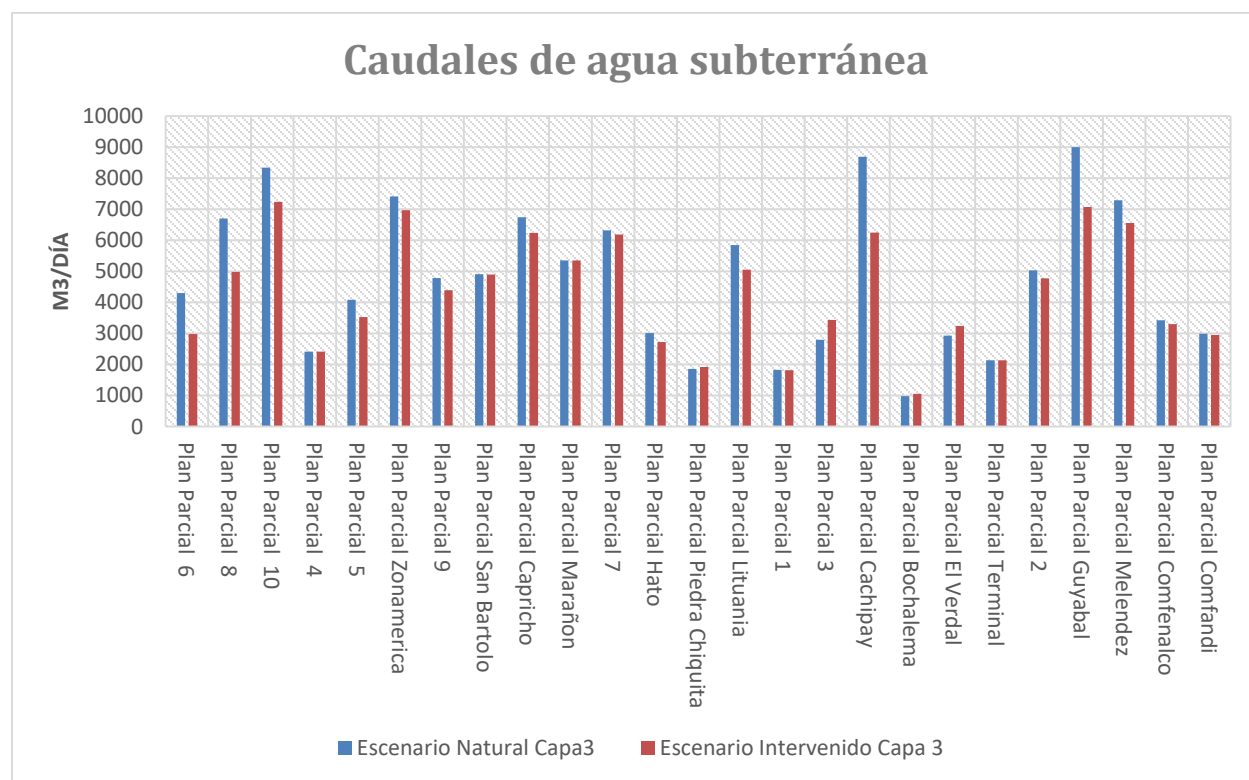
Gráfica 8. Flujo de entrada y salida para la segunda capa de los planes parciales escenario 3.

Tabla 16 Porcentaje de agotamiento del escenario tres capa dos

Plan Parcial	Capa	Porcentaje de Afectación	Escala
Plan Parcial 6	2	87.54	Alto
Plan Parcial Cachipay	2	72.81	Alto
Plan Parcial 10	2	53.06	Medio
Plan Parcial Lituania	2	47.11	Medio
Plan Parcial 8	2	42.51	Medio
Plan Parcial 2	2	32.74	Medio
Plan Parcial Guyabal	2	28.45	Bajo
Plan Parcial Capricho	2	22.61	Bajo
Plan Parcial Hato	2	19.44	Bajo
Plan Parcial Marañón	2	11.04	Bajo
Plan Parcial 5	2	9.33	Bajo
Plan Parcial 1	2	6.95	Bajo
Plan Parcial Comfenalco	2	3.97	Bajo
Plan Parcial 7	2	3.53	Bajo
Plan Parcial El Verdal	2	2.36	Bajo
Plan Parcial 4	2	2.00	Bajo
Plan Parcial Zonamerica	2	1.77	Bajo
Plan Parcial Comfandi	2	1.56	Bajo

Plan Parcial 9	2	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial San Bartolo	2	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial Meléndez	2	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial Terminal	2	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial Piedra Chiquita	2	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial Bochalema	2	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial 3	2	0.00	No Hay Afectación

En la Gráfica 9, compara los resultados del balance de agua entre el escenario natural e intervenido, mostrando que para algunos Planes Parciales persiste esa diferencia entre lo natural y la intervención, si bien en cuanto escala de caudal es menor como se observa en la gráfica aun algunas zonas donde se ubica algunos planes parciales sigue mostrando la sensibilidad a la intervención antrópica, Del mismo modo en la Tabla 17, indica que el 56% de la ubicación de los Planes Parciales tendrían una escala de agotamiento Bajo, mientras que el 46% de la ubicación de los planes tendrían afectación frente al agotamiento del recurso hídrico en esta capa.



Gráfica 9 Flujo de entrada y salida para la tercera capa de los planes parciales escenario 3.

Tabla 17 Porcentaje de agotamiento del escenario tres capa tres

Plan Parcial	Capa	Porcentaje de Afectación	Escala
Plan Parcial 6	3	30.69	Medio
Plan Parcial Cachipay	3	28.10	Bajo
Plan Parcial 8	3	25.81	Bajo
Plan Parcial Guyabal	3	21.42	Bajo
Plan Parcial Lituania	3	13.67	Bajo
Plan Parcial 5	3	13.49	Bajo
Plan Parcial 10	3	13.17	Bajo
Plan Parcial Hato	3	9.30	Bajo
Plan Parcial Capricho	3	7.46	Bajo
Plan Parcial Zonamerica	3	5.99	Bajo
Plan Parcial 2	3	5.16	Bajo
Plan Parcial Comfenalco	3	3.76	Bajo
Plan Parcial 7	3	2.14	Bajo
Plan Parcial Comfandi	3	1.51	Bajo
Plan Parcial 1	3	0.75	Bajo
Plan Parcial 9	3	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial San Bartolo	3	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial Meléndez	3	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial Maraón	3	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial Terminal	3	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial 4	3	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial Piedra Chiquita	3	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial Bochalema	3	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial El Verdal	3	0.00	No Hay Afectación
Plan Parcial 3	3	0.00	No Hay Afectación

7.2 Análisis de resultados de riesgo por agotamiento

Como se observa en los resultados de la modelación de los escenarios naturales y de intervención, teniendo en cuenta que se está modelado el grado de amenaza por urbanización en el área proyectada por el municipio como expansión urbana posee dos efectos:

- ◆ Disminución del balance de agua entre el escenario natural y de intervención
- ◆ Aumento de los niveles piezométricos en las áreas urbanizadas.

En cuanto a la disminución del balance de agua y de acuerdo con la revisión literaria se le conoce como riesgo por agotamiento en acuíferos, es decir que en los tres escenarios de amenaza de urbanización se está afectado la reserva hídrica del acuífero a futuro, dado que existe una disminución en cuanto a su caudal de oferta, para identificación de las zonas más sensibles a dicha disminución se procede a evaluar la intervención promedio de la impermeabilización en la Capa 1y Capa 2 de cada uno de los escenarios, debido a que en estos escenarios se observa el efecto que tiene la impermeabilización en la zona de recarga, mientras que la Capa 3 el efecto en su escala de afectación es bajo como se observa en las tablas anteriores.

A continuación se define los rangos para la evaluación del riesgo por agotamiento, para ello se procede a calcular los rangos de los valores ideales, lo cual se realiza a partir de la diferencia entre el valor máximo y mínimo, y el producto se divide entre tres, el cual corresponde (Bajo, Medio y Alto). Por último, el producto obtenido se le suma al valor mínimo y así consecutivamente hasta alcanzar los tres valores. En la Tabla 18 y Tabla 19 se presenta los valores promedios para cada una de la capa y en la Tabla 20y Tabla 21 se muestra los respectivos rangos para la evaluación del riesgo por agotamiento para la Capa 1 y 2

Tabla 18 Agotamiento promedio para la Capa 1				Tabla 19 Agotamiento promedio para la Capa 2			
Plan Parcial	Capa	Promedio	Rango	Plan Parcial	Capa	Promedio	Rango
Plan Parcial 8	1	98.93	Alto	Plan Parcial 6	2	86.80	Alto
Plan Parcial 6	1	99.18	Alto	Plan Parcial	2	72.27	Alto
Plan Parcial 10	1	95.67	Alto	Cachipay			
Plan Parcial Lituania	1	97.47	Alto	Plan Parcial 10	2	58.31	Medio
Plan Parcial Cachipay	1	96.63	Alto	Plan Parcial Lituania	2	47.55	Medio
Plan Parcial Capricho	1	91.01	Alto	Plan Parcial 8	2	44.19	Medio
Plan Parcial Guayabal	1	91.80	Alto	Plan Parcial 2	2	32.11	Medio
Plan Parcial 2	1	95.03	Alto	Plan Parcial Guayabal	2	28.51	Bajo
Plan Parcial 1	1	91.51	Alto	Plan Parcial Capricho	2	21.34	Bajo
Plan Parcial Maraón	1	76.29	Alto	Plan Parcial Hato	2	16.35	Bajo
Plan Parcial Piedra Chiquita	1	86.60	Alto	Plan Parcial 5	2	9.95	Bajo
				Plan Parcial 1	2	7.37	Bajo
				Plan Parcial	2	7.17	Bajo

Plan Parcial El Verdal	1	77.99	Alto	Marañón			
Plan Parcial Hato	1	48.16	Medio	Plan Parcial Meléndez	2	5.54	Bajo
Plan Parcial Bochalema	1	53.00	Medio	Plan Parcial El Verdal	2	3.72	Bajo
Plan Parcial San Bartolo	1	61.06	Medio	Plan Parcial Comfenalco	2	3.71	Bajo
Plan Parcial Zonamerica	1	40.37	Medio	Plan Parcial San Bartolo	2	3.10	Bajo
Plan Parcial Comfandi	1	38.66	Medio	Plan Parcial 7	2	2.69	Bajo
Plan Parcial Comfenalco	1	37.33	Medio	Plan Parcial Piedra Chiquita	2	2.40	Bajo
Plan Parcial Terminal	1	19.80	Bajo	Plan Parcial Terminal	2	2.10	Bajo
Plan Parcial 5	1	19.92	Bajo	Plan Parcial 4	2	1.98	Bajo
Plan Parcial 7	1	16.03	Bajo	Plan Parcial 3	2	1.70	Bajo
Plan Parcial 4	1	22.97	Bajo	Plan Parcial Bochalema	2	1.60	Bajo
Plan Parcial 9	1	13.29	Bajo	Plan Parcial Zonamerica	2	1.54	Bajo
Plan Parcial 3	1	5.16	Bajo	Plan Parcial 9	2	1.53	Bajo
Plan Parcial Meléndez	1	10.19	Bajo	Plan Parcial Comfandi	2	1.44	Bajo

Tabla 20 Escala de clasificación de la amenaza para la capa 1		Tabla 21 Escala de clasificación de la amenaza para la capa 2	
Rango para la Capa 1		Rango para la Capa 2	
Bajo	[5.1-36.50]	Bajo	[1.44-29.69]
Medio	[36.50-67.84]	Medio	[29.69-58.14]
Alto	[67.84-99.18]	Alto	[58.14-86.60]

De acuerdo con la clasificación anterior de riesgo por agotamiento, se presenta a continuación en las Figura 35 Riesgo por agotamiento Capa1 Figura 36 donde se identifican las zonas sensibles a la amenaza de urbanización para la Capa 1 y 2, en su primera capa independiente del escenario de profundidad de impermeabilización son las zona Noroccidental y Centro del área de expansión urbana. Sin embargo, en la zona centro de la primera capa en el Plan Parcial 3 muestra escala atípica respecto al grado de amenaza dado a que alrededor de ella que posee una amenaza alta. Al relacionar los resultados del riesgo por agotamiento en el área del plan parcial, se encuentra que en la zona cruzan dos correlaciones estratigráfica hacia el Oriente que son los cortes F-F y J-J ambos resultados muestra comportamientos atípicos respecto a los demás cortes, donde hay cambio de material los primeros metros, teniendo un orden de Arena, luego Arcilla y por ultimo Arena. Lo anterior se debe en que la zona existe

un cambio de condiciones geológicas entre cono aluvial de río Pance, el cono aluvial del río Meléndez y la cercanía con los depósitos aluviales del río Cauca, posiblemente este lente arcilloso que se encuentra intercalado entre dos espesores de arena protegen el balance de caudal ante a la amenaza de cambio de condiciones del suelo.

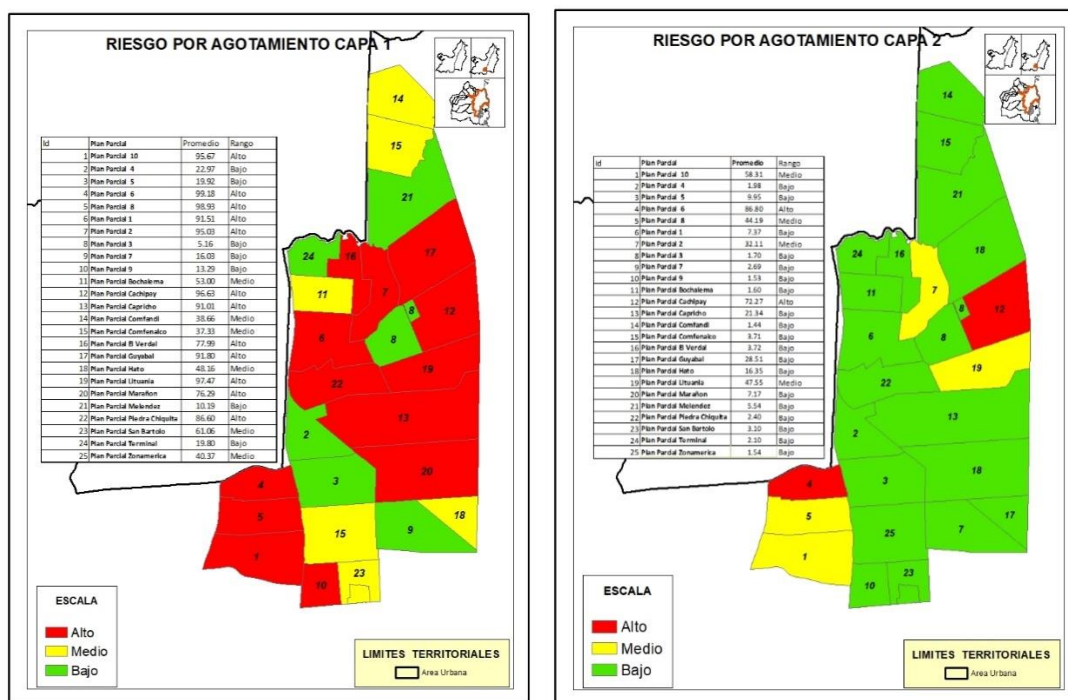


Figura 35 Riesgo por agotamiento Capa1 Figura 36 Riesgo por agotamiento capa 2

De igual forma pasa para la evaluación del riesgo por agotamiento de los Planes Parciales 4, 5 y 7, la ubicación espacial se encuentra la correlación H-H, observando en ella que la primera capa existe un espesor de Arcilla y que aumenta hacia Suroriente, este espesor disminuye el grado de riesgo de intervención en la zona independiente de la amenaza de la profundidad de impermeabilización. En la segunda capa de evaluación de, se observa que la zona de expansión urbana el riesgo por agotamiento del acuífero es bajo, sin embargo persisten áreas al Noroccidente y Centro oriente Plan Parcial 6 y Cachipay, donde su riesgo es alto, es probable que la escala persista en esta área dado al cambio de pendiente que existe en las dos zonas una para el cono aluvial del río Pance y la otra dado a las cercanía que existe con el depósito aluvial del río Cauca.

En cuanto los resultados obtenidos de la modelación numérica, se observa Figura 37, la concentración de las líneas de flujo independiente de la profundización de la impermeabilización de cada uno de los escenarios propuesto de amenaza este fenómeno de concentración se le conoce como efecto barrera.

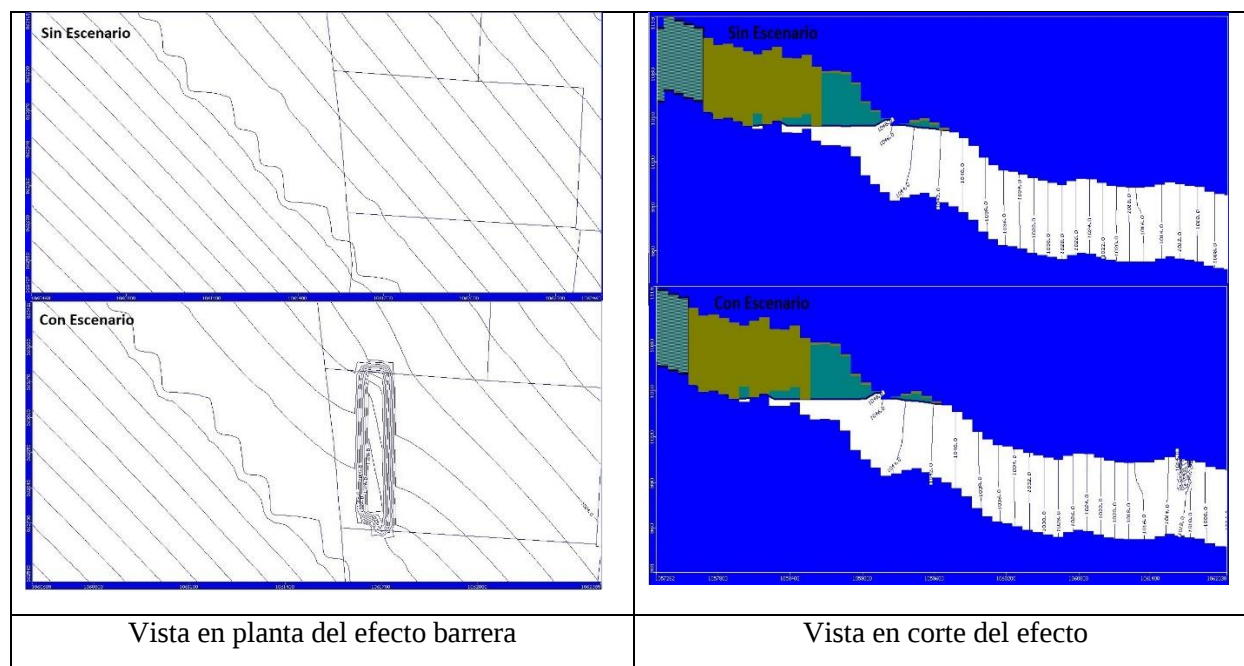


Figura 37 Efecto barrera de la impermeabilización

El efecto barrera de acuerdo con (Pujades, López, Carrera, Vázquez-Suñé, & Jurado, 2012). Modifican el flujo natural del agua subterránea, lo que hace piezometría aumente y luego decaiga su nivel piezométrico, en pocas palabras se define como el aumento en la pérdida de carga a través de la barrera con respecto a las condiciones naturales antes de la construcción. El efecto en la impermeabilización puede ser de dos clases regional, cuando se impermeabilizan grandes áreas como ciudades afectando grandes extensiones en distancia por fuera de la ciudad y local cuando se impermeabiliza la estructura teniendo una afectación localizada. Por otro lado (Attard, Cuvillier, Eisenlohr, Rossier, & Winiarski, 2016), evaluó el efecto pistón que tienen las estructuras en acuíferos pocos profundos, teniendo encuentra tres escenarios (natural, estructura impermeable y estructura de drenaje), encontrando los siguientes en la investigación:

- ✦ Las simulaciones destacaron que las estructuras subterráneas generan un efecto de pistón dispersivo. Este fenómeno ocurre principalmente en la estructura que favorece un proceso de mezcla de aguas subterráneas entre acuíferos poco profundos y profundos. Obteniendo un alcance horizontal de varios cientos de metros.
- ✦ Este fenómeno se observó incluso cuando la perturbación del flujo advectivo era pequeña y cuando la estructura no era anclada en el acuífero más profundo.

- ♦ En el estudio demuestra que la estructura de drenaje tienen un mayor impacto en varios órdenes de magnitud en las líneas de flujo.

Es decir que en el área proyectada que tiene el municipio como desarrollo urbanístico se encontraría sujeta a dichos efectos donde habrá un aumento de la piezometría como se observa en la Figura 37 que es el efecto de barrera impermeable en acuíferos pocos profundos o libres y efecto pisto, en el primer efecto llevaría a las urbanizaciones locales a un aumento de la tasa de bombeo, para abatir los niveles piezométricos que genera dicho efecto, por otro lado el segundo efecto provocará una mezcla de aguas “jóvenes” con aguas “viejas” afectando la calidad de agua de la reserva del acuífero dando a la mezcla poniendo en segundo orden en riesgo el acuífero en cuanto a su contaminación.

8 Propuesta y discusión

8.1 Propuestas de ocupación urbana para la mitigación del riesgo por agotamiento reduciendo la amenaza al que se encuentra sometido el acuífero.

Para evaluar la propuesta de la mitigación del riesgo a partir de la reducción de la amenaza de expansión urbana que se proyecta en un área de recarga del acuífero, se parte de los tres escenarios de intervención que se evaluaron en el capítulo anterior, además se considera las áreas sensibles de urbanización, donde se identificó el riesgo por agotamiento que tiene el área al momento de tener un cambio de coberturas de suelos por zonas duras en un 100%. Para ello, se plantea la siguiente metodología que identifique las zonas menos sensibles al cambio de uso de suelo en el área proyectada para cambio de uso del suelo en el marco de un desarrollo ambiental sustentable pueda ser replicable al contexto local.

8.1.1 Planteamiento de la metodología para determinar los cambios de uso de suelos reduciendo el riesgo.

De acuerdo con el análisis de la información del capítulo 1 y los resultados obtenidos en el capítulo 2, se observa que el área donde esta propuesta la expansión urbana es un área sensible a los cambios de uso del suelo y que afecta el balance de agua subterránea, en otras palabras es poner en riesgo las reservas de acuífero por agotamiento, dado a que existe una afectación al cambio de uso del suelo, tal como se pudo observar en la evaluación de los diferentes escenarios y comparados con la situación actual en cada una de las áreas de los diferentes Planes Parciales. Para el planteamiento de la siguiente metodología de evaluación se tuvo en cuenta los siguientes resultados:

- ♦ Caracterización de los conos aluviales
 - Análisis estratigráfico en el área de expansión urbana.
- ♦ Resultados de la modelación numérica
 - Identificación de celdas secas
 - Niveles de agua subterránea
 - Evaluación de riesgo por agotamiento en la primera capa

A continuación, se describe la metodología planteada para evaluar el modelo de ocupación en el área de recarga del acuífero.

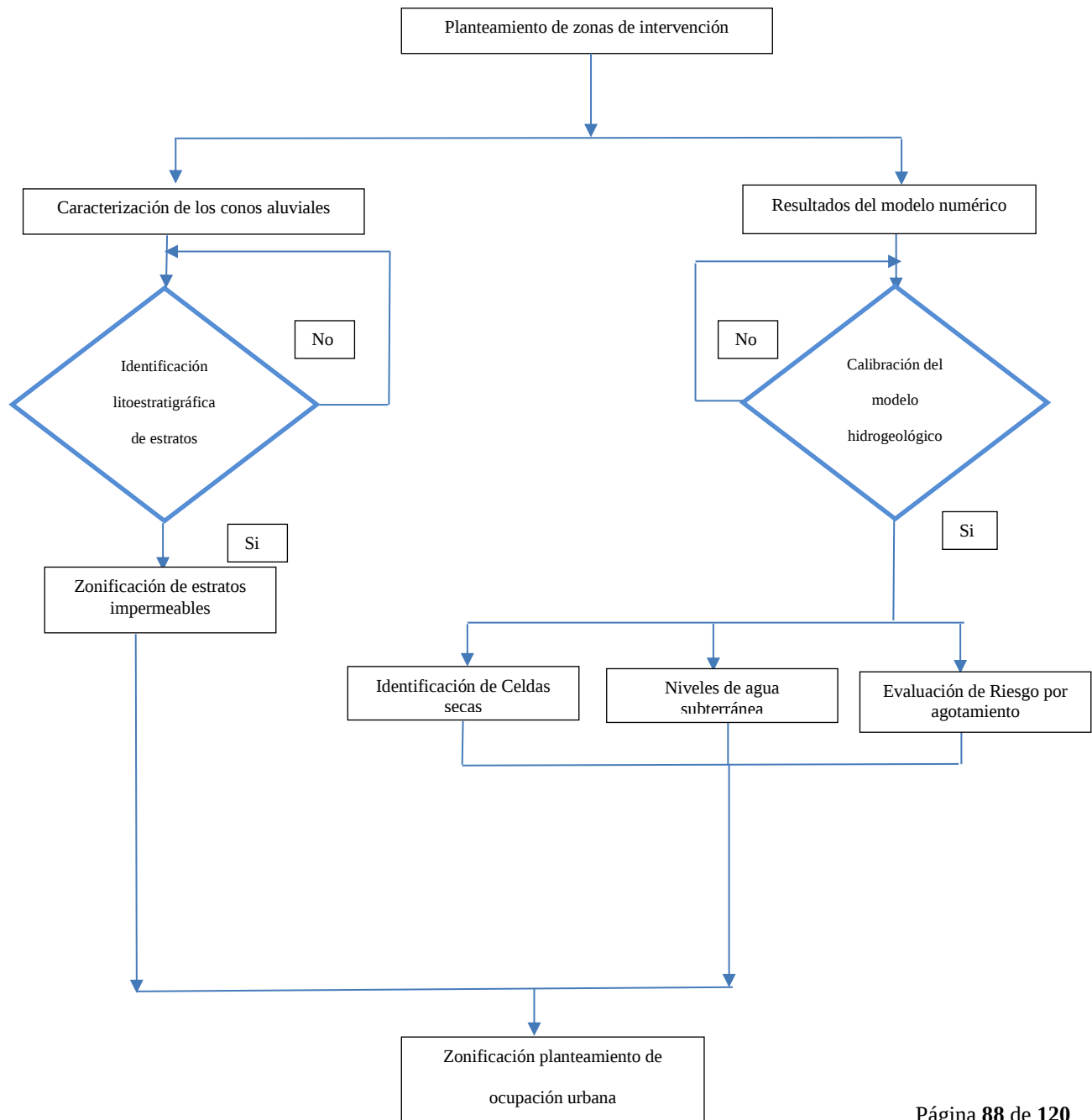


Figura 38 Metodología propuesta para evaluar zonas de ocupación urbana

8.1.1.1 Identificación de espesor semi permeable

En el capítulo 1 se caracteriza los conos aluviales presentes en el área de expansión urbana, de igual forma el análisis del modelo conceptual, a partir del análisis se obtiene como resultado los espesores del material semi-impermeable en los primeros metros Figura 39. Como se observa en ella hacia el Norte del área de expansión urbana se encuentra espesores mayores a 15 metros de profundidad los cuales son influencia de los depósitos de la cuenca río Lili y Meléndez, de igual forma se observa que parte Occidental del área de expansión urbana son los espesores de menor profundidad que puede variar entre 1-5 metros, por último la parte Oriental de la zona de expansión se encuentran espesores entre el rango de 15-10 metros.

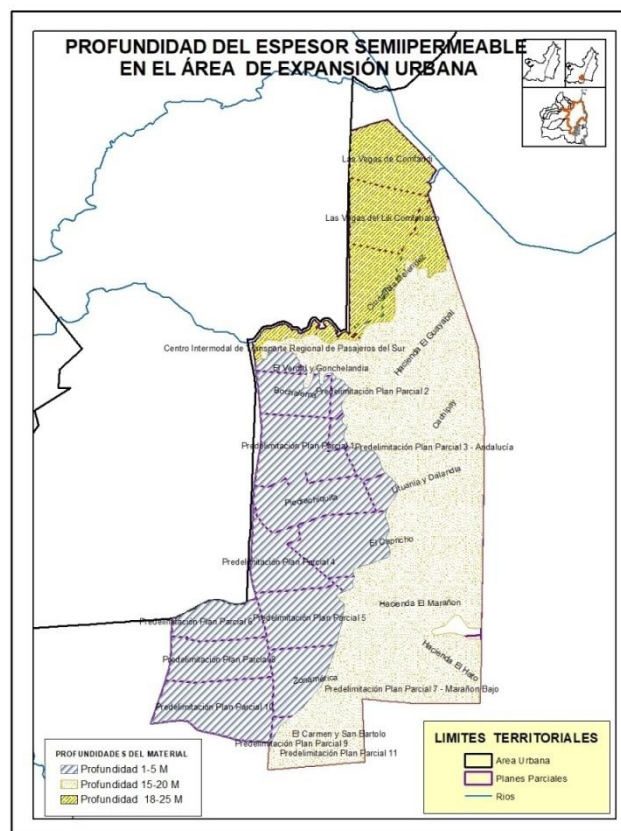


Figura 39 Espesor del material semipermeable en la primera capa

8.1.2 Resultados del modelo numérico

A partir de los resultados de la calibración del modelo numérico, los cuales se consideran aceptables dado el nivel de información de detalle con que se cuenta en el área de expansión urbana en cuanto a variables de niveles de agua subterránea siendo insumo para la el ajuste y calibración del modelo en cuanto a la variable de calibración de conductividad hidráulica.

8.1.2.1 Identificación de celdas secas

Se parte de los escenarios de evaluación de la amenaza por intervención desarrollados en el capítulo anterior la Figura 40 se muestra los resultados de los diferentes modelos en que se evaluó la intervención de la zona en una 100% para cada una de las profundidades, en ella se puede identificar que existen zonas donde no se presentan nivel de agua subterránea por encima de la profundidad evaluada de uno, dos y tres metros, esta ausencia del nivel de agua en la celda puede ayudar a determinar áreas potencialmente urbanizables. A continuación, se relacionan las áreas de celdas secas para cada uno de los escenarios:

- ♦ Modelo con una capa de profundidad de un “1” metro: tiene un área de 901 Ha sin presencia de nivel de agua en el primer metro
- ♦ Modelo con una capa de profundidad de dos “2” metros: tiene un área de 787 Ha, sin presencia de nivel de agua en el segundo metro
- ♦ Modelo con una capa de profundidad de tres “3” metros: tiene un área de 628 Ha, sin presencia de nivel de agua en los tres primeros metros

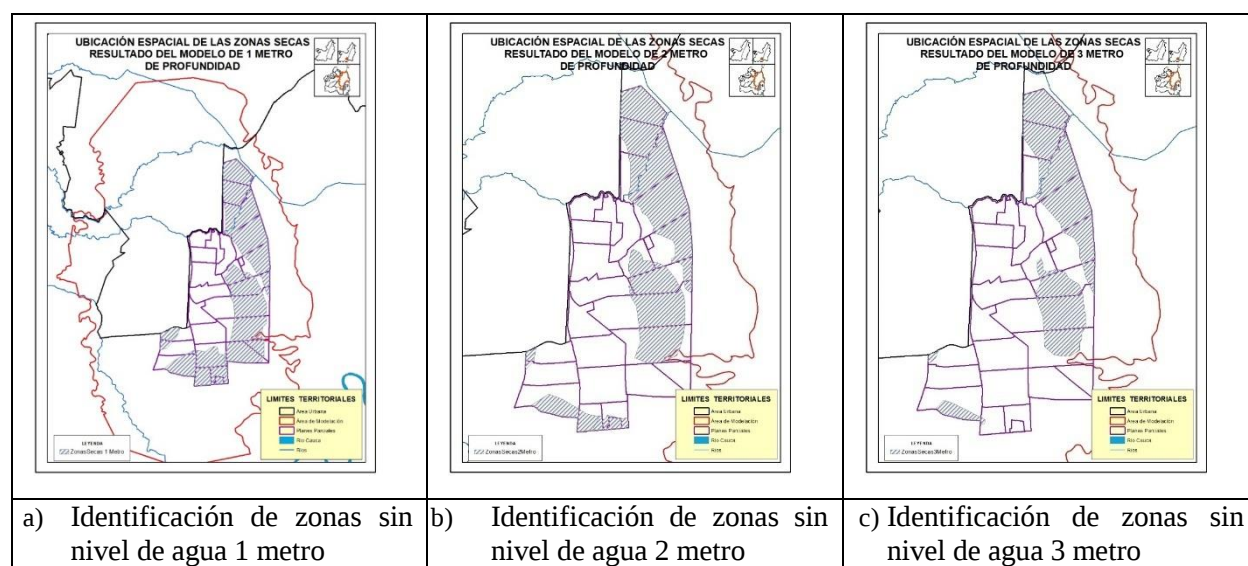
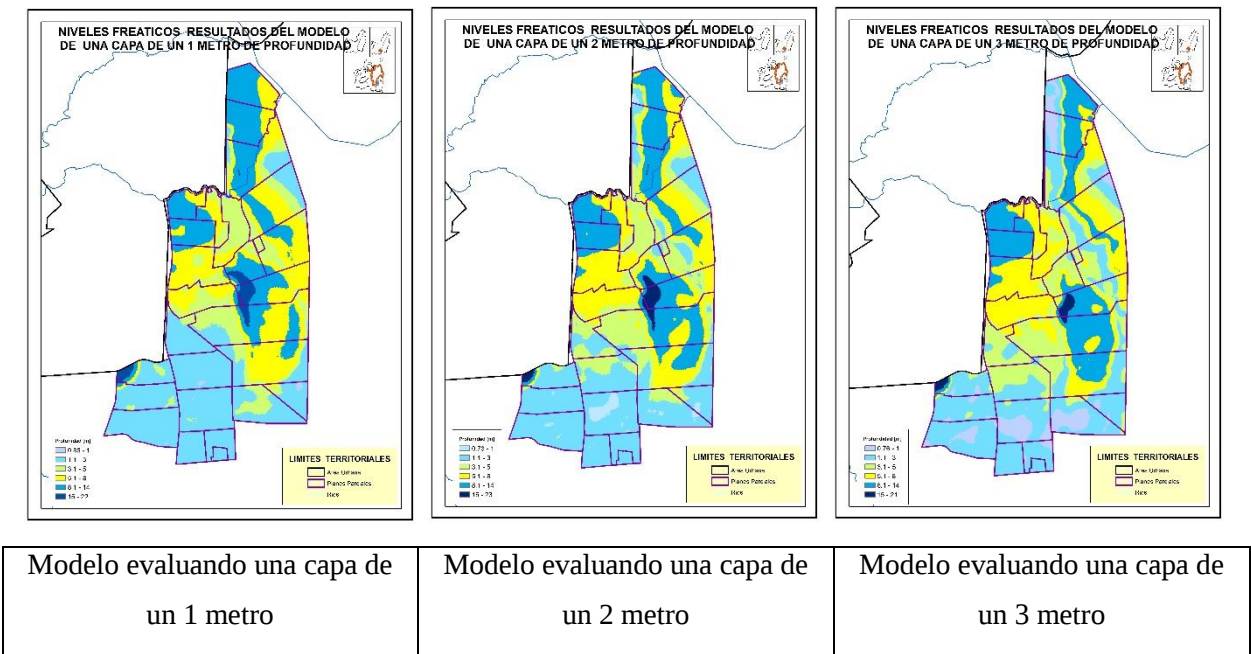


Figura 40. Zonas con ausencia del nivel de aguas subterránea evaluado en cada uno de los escenarios

Como se observa en figura anterior el área de expansión tanto en algunas zonas en los sectores Nororiental, Centro y Suroccidental, el nivel de agua subterránea se encuentra por debajo de (1, 2 y 3) m, en esas zonas no se presenta el nivel de agua subterránea, convirtiéndose en zonas donde no exista afectación al recurso hídrico subterráneo.

8.1.2.2 Profundidad del nivel de agua subterránea

Los resultados de los niveles de agua se obtienen a partir de la información arrojada de los diferentes escenarios de modelación de agua subterránea, a continuación en la Figura 41 se muestra los resultados obtenidos de los niveles freáticos para cada una de las modelaciones.



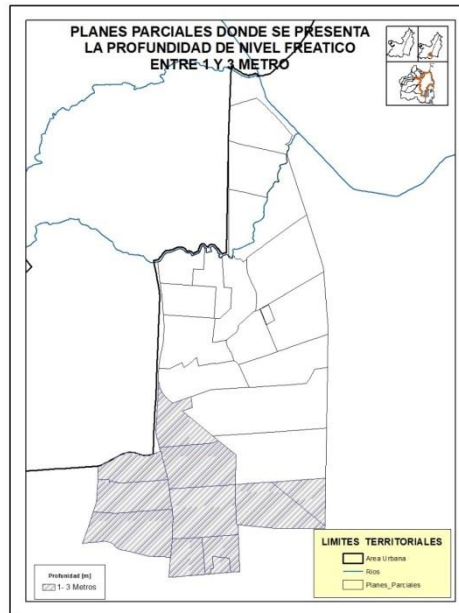


Figura 42. Ubicación espacial del nivel freático entre 1-3 metros

8.1.2.3 Resultados del riesgo por agotamiento.

La evaluación del riesgo por agotamiento tiene como objetivo identificar las zonas sensibles a la ocupación independiente de los resultados obtenidos las demás variables anteriores evaluadas dentro de la metodología, como se observa en la Figura 43, aproximadamente el 52% del número de planes parciales se ubican en un riesgo por agotamiento alto, estas zonas se encuentra en la parte central del área de expansión urbana y la zona Noroccidental. De igual forma existe el mismo número de planes en que se identifica el rango de riesgo medio y bajo, estos planes se encuentra distribuidos en la zona Nororiental y Suroriental.

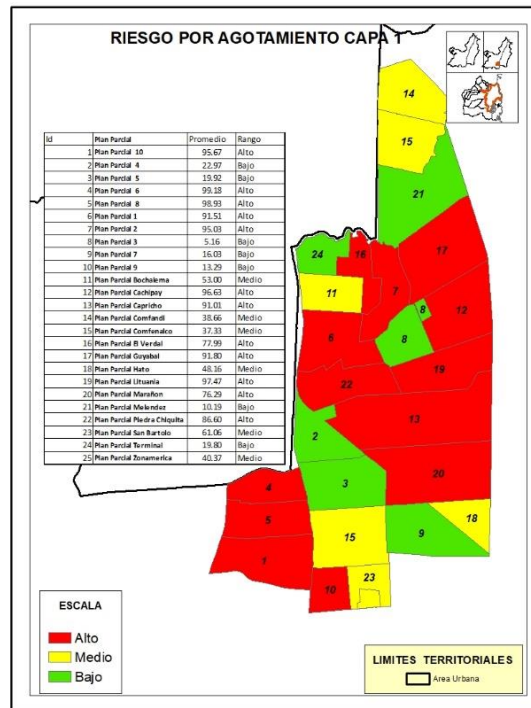


Figura 43 Identificación de riesgo por agotamiento

8.1.3 Delimitación de zonas para ocupación urbana.

Una vez realizado el análisis geológico que inmerso en él se encuentra el análisis litoestratigráfico, de niveles de agua subterránea, identificación de celdas secas y zonificación del riesgo por agotamiento, se procede a sobre poner cada uno de los mapas generados de los análisis con el fin de identificar las posibles zonas donde se podría realizar una intervención de ocupación, para ello se sobrepone cada uno de los resultados obtenidos de los pasos de la metodología aplicada, por ejemplo las zonas donde el resultado del nivel freático se encuentre menor a 1 metros, su litoestratigráfica de material semipermeable es menor a 4 metros y su cono aluvial pertenezca al Qca1 y el riesgo sea alto, serían zonas donde los proyectos de ocupación urbana tendrían que ser conjuntos habitacionales no tengan contemplado estructuras subterráneas o cimentaciones menores a 0.5 metros, en la Figura 44 se propone la ocupación de acuerdo con los resultados obtenidos en la metodología:

- Las zonas donde se encuentre el nivel freático entre 1-3 metros, su espesor primer espesor de material litoestratigráfico este entre 5 y 10 metros, se ubiquen entre el cono aluvial del río Pance Qca1 y Qca2 y tengan riesgo por agotamiento alto. Serian zonas planteadas para una ocupación

con cimentaciones menores a 2 metros de profundidad, con espacio entre viviendas de zonas blandas o semiblandas, de igual forma en este sentido son proyectos urbanísticos que no contemplen estructuras subterráneas.

- ♣ Las áreas donde se encuentre el nivel freático se encuentren entre 3-5 metros, su espesor de material litoestratigráfico varía entre 5 y 10 metros y estén ubicado dentro del cono aluvial del río Pance Qca2, serían zonas planteadas para realizar estructuras subterráneas de aproximadamente 2 metros de profundidad, de igual forma en estas zonas deben existir zonas blandas como parques para faciliten la recarga al acuífero por agua lluvia o escorrentía. En ese orden de ideas en estas áreas se podrían realizar conjuntos habitacionales tipo apartamentos.
- ♣ Zonas donde el nivel freático se encuentre entre 5-8 metros, su espesor de material litoestratigráfico en la primera capa varíe entre 10 y 15 metros, estén ubicados en el cono aluvial del río Pance Qca2 o en el cono aluvial del río Meléndez y se encuentre en riesgo por agotamiento bajo, podrían desarrollar proyectos con cimentaciones subterránea no mayores a 4.30 metros de profundidad.
- ♣ Zonas donde el nivel freático este por debajo de los 10 metros, su espesor del material litoestratigráfico en la primera capa varia mayor a los 15 metros y se encuentre en el cono aluvial del río Pance (Qca2) y/o en el cono aluvial del río Meléndez, podrán desarrollar proyectos urbanísticos que implique el desarrollo de cimentaciones con profundidad no mayor a los 7 metros.

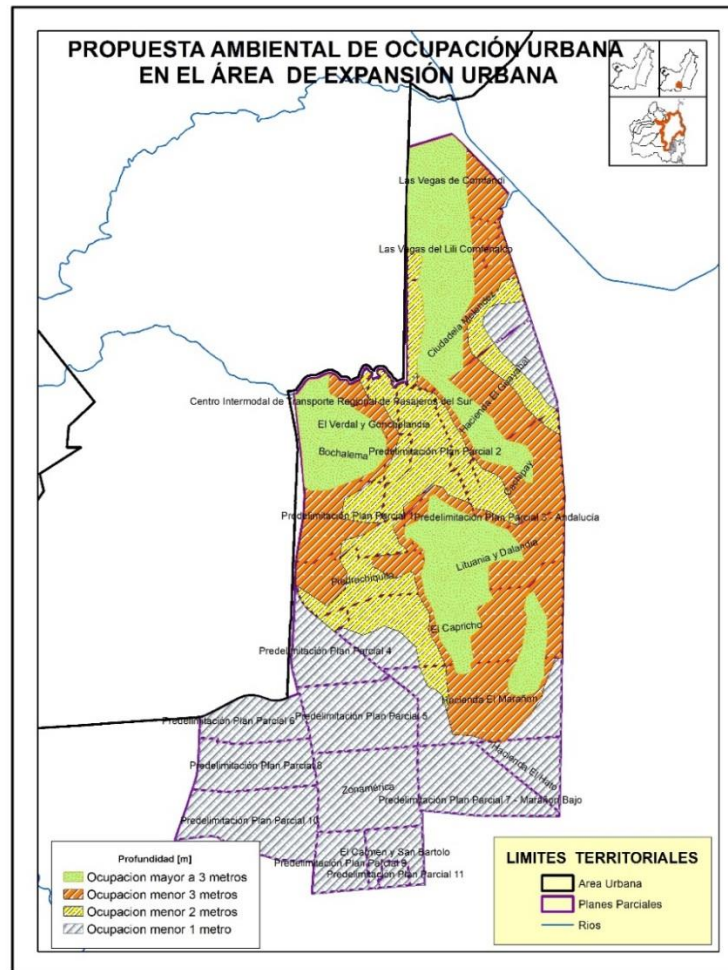


Figura 44. Propuesta de ocupación urbana

9 Conclusiones y recomendaciones

Para el desarrollo del modelo numérico fue necesario la ampliación del área de expansión urbana, con el objetivo de obtener un límite adecuado en el desarrollo del análisis hidrogeológico. Para determinar las fronteras del modelo numérico, se tuvo en cuenta lo siguiente: la construcción de las líneas de correlación estratigráficas del subsuelo, la caracterización geológica, la geomorfológica, la construcción de líneas de isopiezas, el modelo estratigráfico.

En la presente investigación se determinó el comportamiento de los diferentes materiales hallados en la zona de estudio, a partir de la caracterización de las correlaciones estratigráficas, obteniendo como resultado subzonas de diferentes espesores de material semi-impermeable o impermeable en su primer estrato, con lo cual se generó un modelo en 3D. De igual forma el modelo estratigráfico evaluado se caracterizó por presentar un porcentaje muy alto de materiales permeables como lo son gravas y arenas, lo cual se debe principalmente a los aportes torrenciales de la cuenca del río Pance, en donde por gradiente topográfico existen depósitos de materiales granulares. Caso contrario sucede con los aportes de la cuenca del cono aluvial del río Meléndez, el cual se caracteriza por ser un depósito arcilloso, generado por el origen geológico de la cuenca.

En la investigación se realizaron dos modelaciones numéricas con dos y tres capas, en donde se comparó el comportamiento hidrodinámico del acuífero, para cada caso. En el caso del modelo de tres capas, se contempló una primera capa de profundidad promedio de un metro, en la cual se incorporó la unidad del suelo; una segunda capa con profundidad entre un metro y quince metros, en la cual se incorporó la unidad del material arcilloso y una tercera capa con profundidades entre quince a cincuenta metros, en la cual se incorporó los depósitos de materiales permeables como arenas y gravas. En el modelo de dos capas, se estableció que la profundidad de la primera capa sería de uno a dieciséis metros, en la cual se incorporó la unidad del material arcilloso y la segunda capa con una profundidad que oscila entre dieciséis a treinta metros, en la cual se incorporó depósitos de materiales permeables como arenas y gravas. Como resultado del análisis se encontró que, para los dos modelos numéricos, la capa correspondiente a los depósitos de materiales permeables, presentaron tres subzonas, las cuales varían entre arena media a grava., lo cual indica que en estas capas hay una mayor recarga de agua hacia al acuífero.

Sumado a lo anterior, se encontró que la distribución de los materiales litológicos dependerá de la topografía del área del modelo numérico, como por ejemplo en zonas de ladera es común encontrar cantos

y gravas, mientras que en las partes planas se pueden encontrar materiales granulares de menor diámetro como limos y arenas.

En el modelo de dos capas se obtuvieron como resultado tres zonas de conductividad hidráulica y para el modelo de tres capas se obtuvieron dos zonas de conductividad hidráulica. En los dos casos se realizó la calibración de régimen estacionario, obteniendo resultados aceptables entre los niveles observados en las diferentes campañas de monitoreo de agua subterránea Vs los resultados calculados por el modelo.

En los dos modelos numéricos se encontró que, la dirección de flujo presenta un comportamiento Occidente – Oriente, mostrando con esto que la zona de recarga del acuífero se halla en el extremo Occidental y que en el extremo Oriental hay una disminución del gradiente hidráulico, lo cual indica que hay una transición de la velocidad del flujo entre el cono aluvial del río Pance y el depósito sedimentario del río Cauca.

Conforme a los resultados se puede afirmar que, si bien el desarrollo de la expansión urbana se encuentra en función de las diferentes actividades de urbanización que son ejecutadas a partir de la unidad mínima de los planes parciales, este desarrollo debe ser analizado previamente con el objetivo de evitar impactos negativos sobre el recurso hídrico del agua subterránea, en donde al generar una modificación en los parámetros hidrodinámicos del entorno local, se puede afectar de manera irreversible la sostenibilidad cualitativa y cuantitativa del acuífero.

Teniendo en cuenta que el agua subterránea puede llegar a ser un recurso oculto, es posible que en una unidad geológica se llegue a agotar gradualmente su disponibilidad y calidad, antes que los impactos sean visibles en el exterior de dicha unidad. Por lo anterior, es fundamental evaluar el riesgo por agotamiento en el área de expansión urbana, analizando si existe una disminución del caudal de entrada y salida en cada uno de los escenarios contemplados, permitiendo con ello evaluar la afectación sobre el agua subterránea, recurso estratégico a futuro para el abastecimiento de la ciudad de Santiago de Cali.

Es importante resaltar que los daños ambientales causados a los ecosistemas, por la mala planificación del territorio pueden ser irreversibles, logrando un efecto en cadena en el ciclo natural de los nacimientos, humedales y ríos. De manera similar, modificaciones en el flujo del agua en el ecosistema puede desencadenar en problemas de desertificación de los ecosistemas alrededor de estas islas calientes, dado a que el nivel de agua subterránea puede descender significativamente.

Sumado a lo anterior, el riesgo por agotamiento evaluado, trae consigo otros impactos desde el punto de vista de la ingeniería estructural, en el cual se contempla el hundimiento de las superficies, como en los casos de las ciudades de ciudad de México, Londres, Barcelona y París, entre otras, en donde su inadecuado desarrollo urbanístico ha afectado considerablemente las estructuras de las edificaciones.

Dentro de la presente investigación no se evaluó el riesgo por contaminación, variable fundamental en el análisis integral de los impactos de la expansión urbana en zonas de recarga al acuífero, por lo anterior se recomienda abordar este tema en próximas investigación en la zona de estudio, con el objetivo de evaluar posibles riesgos para la salud frente a la presencia de contaminación por fuentes puntuales y difusas.

La sostenibilidad de los recursos del agua subterránea se define como el uso a largo plazo de los recursos de agua subterránea para satisfacer las necesidades de las demandas presentes y futuras sin impactos ambientales, económicos o sociales inaceptables. Por lo anterior, el presente trabajo de investigación plantea como resultado de la evaluación del riesgo por agotamiento en el área de expansión urbana que, el ordenamiento del territorio se origine en el marco de la sostenibilidad del recurso hídrico, buscando un equilibrio entre lo ambiental, lo económico y lo social. De igual forma, se debe analizar todo proyecto planteado dentro del área de expansión urbana, con el objetivo de buscar estrategias que permitan que no se genere afectación del recurso hídrico subterráneo.

Como resultado de la investigación se plantea un ordenamiento territorial en el área de expansión urbana, en el cual se contemplen las zonas con alto riesgo de afectación, en donde no se podrá profundizar ninguna construcción a más de un metro, dado a las condiciones hidrogeológicas de las zonas, proponiéndose que los proyectos constructivos a desarrollarse deberán ser correspondiente al de viviendas unifamiliares de máximo dos pisos de altura en donde se destinen zonas verdes que faciliten la recarga del acuífero, o en su defecto se adelante proyectos de parcelaciones campestres, con grandes zonas verdes.

En los casos de las zonas en donde por su condición hidrogeológica, se pueda construir, se deberán tener en cuenta que, las profundidades máximas de las construcciones serán de tres metros, estableciendo que cada proyecto constructivo elabore un plan de manejo del acuífero para garantizar la calidad y cantidad del agua del acuífero.

Esta propuesta de intervención pretende evitar que se adelanten procesos de construcción en zonas sensibles a cambios en el suelo, que altere la impermeabilización en profundidad. Es de aclarar que la investigación se centró en el conocimiento del riesgo como un elemento asociado a un desarrollo

sustentable de la ciudad de Santiago de Cali, facilitando información para los administradores locales del territorio como una propuesta de desarrollo urbanístico.

Es importante destacar que, para la ciudad de Santiago de Cali, las aguas subterráneas son una reserva de agua aprovechable de gran interés, por lo cual es necesario fortalecer la normatividad ambiental vigente en cuanto a la planeación de los diferentes planes de ordenamiento que involucren un cambio en el uso del suelo en sus coberturas, tal como lo plantea el Plan de Ordenamiento Territorial-POT -2014 del municipio de Santiago de Cali, en la zona de expansión urbana corredor Cali-Jamundí y cuyo desarrollo propuesto ponen en riesgo la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo asociados a una densificación habitacional en dicha área. Por ende, es necesario plantear mecanismos de responsabilidad compartida del recurso hídrico dentro del marco de un desarrollo sostenible de la ciudad y la región.

ANEXOS

A.1 Análisis de los resultados obtenidos de las líneas piezométricas

De acuerdo con los resultados de la interpolación para el segundo semestre del año 2009, se observa que hacia la zona occidental del área de expansión urbana, para los planes parciales (6, 8 y 10), se encuentra la zona de recarga como lo muestra la Figura 45, dado que solo se ha analizado la información del área de interés por medio de la interpolación es probable que la recarga que está reflejando las líneas de flujo sea manera local, pero que está influenciada por aporte de la recarga de agua subterránea que genera la cuenca del río Pance en este sector. De igual forma se identifica un gradiente hidráulico mayor en la parte central que hacia los costados occidentales e orientales de la zona de modelación, en promedio el gradiente hidráulico para este periodo es de 0.0022 m/m

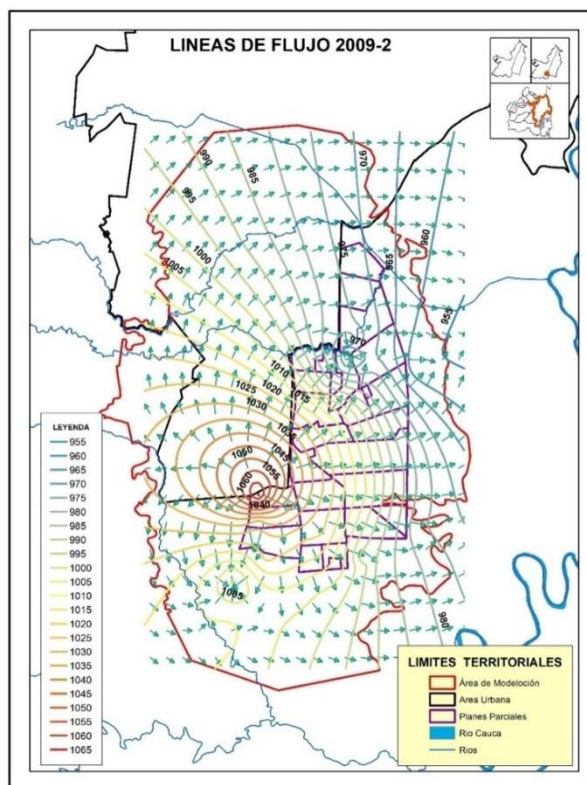


Figura 45. Líneas de flujo 2009-2

Para el primer semestre del año 2010. Figura 46, se observa que existe un desplazamiento del área de recarga hacia el oriente de la zona de expansión urbana probablemente este desplazamiento se deba a que para este periodo la región afrontó un verano intenso donde las fuentes de agua superficial se vio el reflejado su disminución en su caudal superficial, de igual forma se observa hacia el occidente del plan

parcial 10 un punto de abatimiento, probablemente se deba a que esta zona es sensible a los cambios de los niveles de agua subterránea y las líneas de flujo se dirijan hacia este sector, el gradiente hidráulico para esta medición en el área de estudio es de 0.019 m/m.

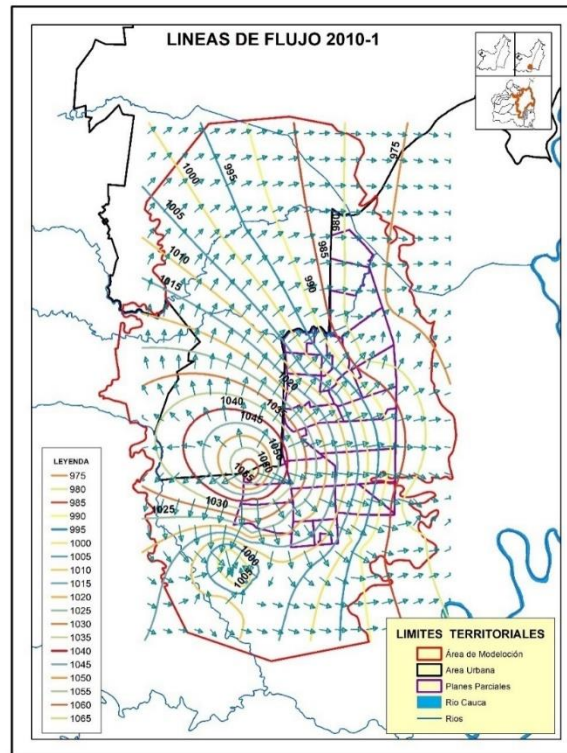


Figura 46. Líneas de flujo 2010-1

Para el primer semestre del año 2011. Figura 47, se observa que la zona de recarga se desplaza hacia el occidente de los planes parciales (8, 9 y 10), es decir que existe una posible recuperación en cuanto los niveles freáticos del área de estudio, posiblemente se deba a que para el primer semestre del año 2011 en la región se presentaron lluvias constantes, haciendo posible la recuperación de los niveles de agua superficial y subterránea, de igual forma se sigue presentado el abatimiento del nivel freático hacia el costado suroccidental del plan parcial 10, el gradiente hidráulico para este periodo en la zona de expansión urbana es de 0.019 m/m.

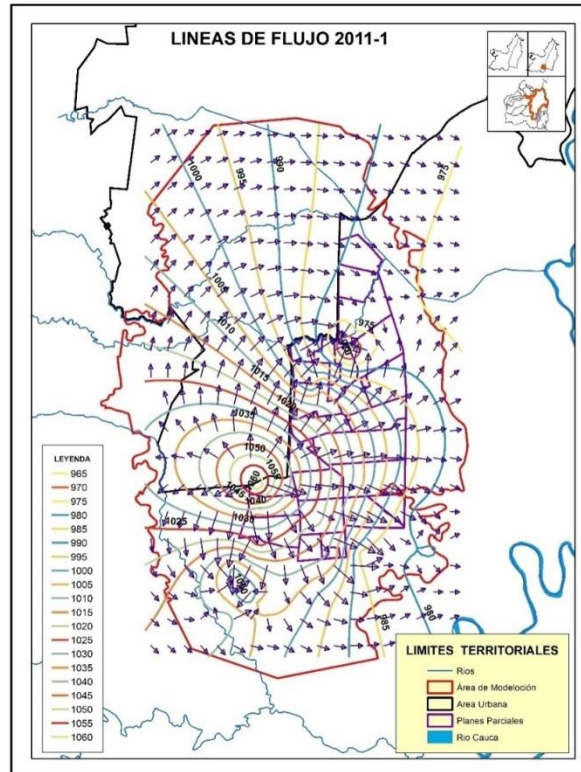


Figura 47. Líneas de flujo 2011-1

Para el primer semestre del año 2012. Figura 48 , se observa que la zona de recarga se amplía hacia el occidente hacia el costado oriental del río Pance y de acuerdo con el espaciamiento de las líneas de flujo hacia el cono aluvial del río Meléndez es una zona de transición, donde la velocidad del flujo es menor que en la parte central de la zona expansión, debido a la concentración de las líneas de flujo esta zona, por otro lado se sigue presentado el abatimiento del nivel de agua subterránea hacia el costado suroccidental del plan parcial 10, tal como se observa en la figura. Por último el gradiente hidráulico este periodo en esta zona es de 0.017 m/m.

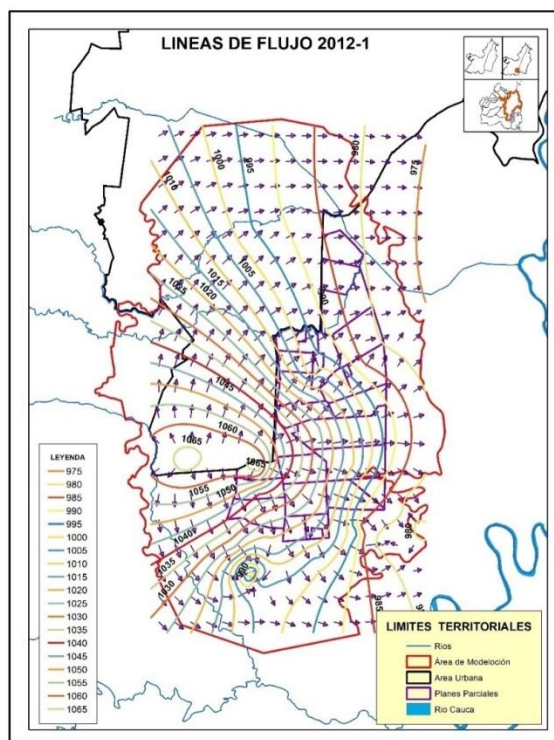


Figura 48. Líneas de flujo 2012-1

En el segundo semestre del año 2012. Figura 49 , que la zona de recarga se sigue presentando hacia el costado oriental del río Pance, es decir que el río para este período igual que el anterior período está aportando un flujo base al acuífero de la zona de estudio, ya para este período desaparece el cono de abatimiento que existía en el extremo suroccidental del plan parcial 10, es decir que los niveles de agua se estabilizaron, por último el gradiente hidráulico para este periodo es de 0.019 m/m

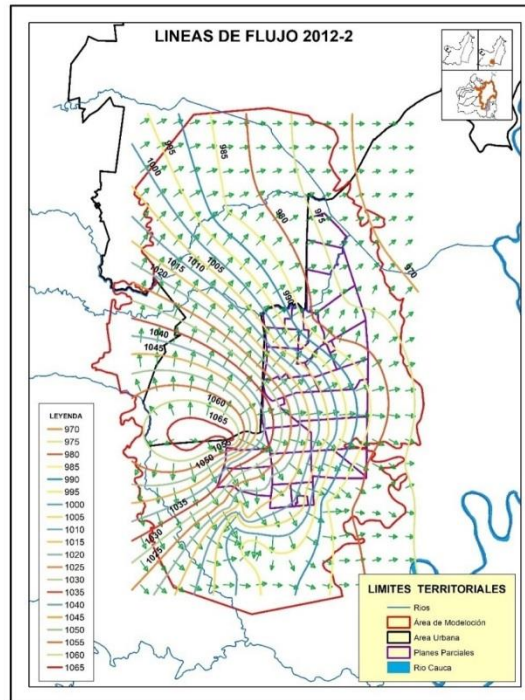


Figura 49. Líneas de flujo 2012-2

En el primer semestre del año 2013. Figura 50 se observa que la zona de recarga sigue presentado el mismo comportamiento que el período anterior. Sin embargo, para este período de análisis se vuelve a presentar el abatimiento en el sector suroriental del plan parcial 10, de igual forma hacia el cono aluvial del río Meléndez, existe un estrechamiento de las líneas de flujo, es decir que aumenta el gradiente hidráulico por ende la velocidad del flujo en este sector. El gradiente promedio en toda el área de expansión urbana es de 0.017 m/m

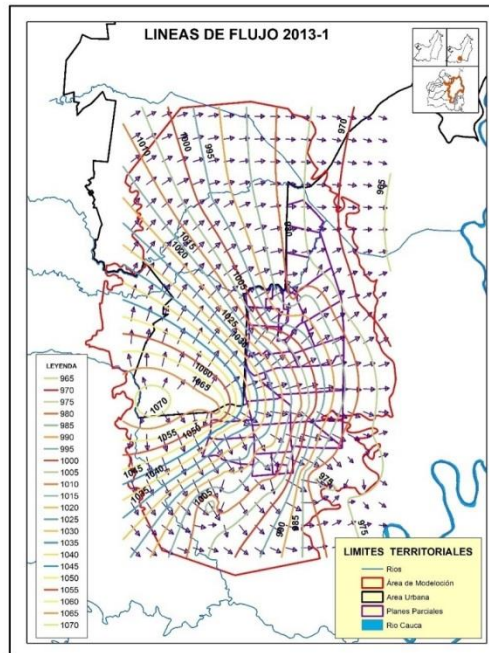


Figura 50. Líneas de flujo 2013-1

En el segundo semestre del año 2013. Figura 51, se sigue mostrando el mismo comportamiento que para periodos anteriores, el gradiente hidráulico para la zona de expansión urbana es de aproximadamente 0.018 m/m, como se muestra el sector Noroccidental la zona de recarga aporta flujo base al río Pance, mientras que el sector Suroccidental, donde se ubican los ríos Lili y Meléndez no muestra este comportamiento de aporte de caudal base a ambos ríos.

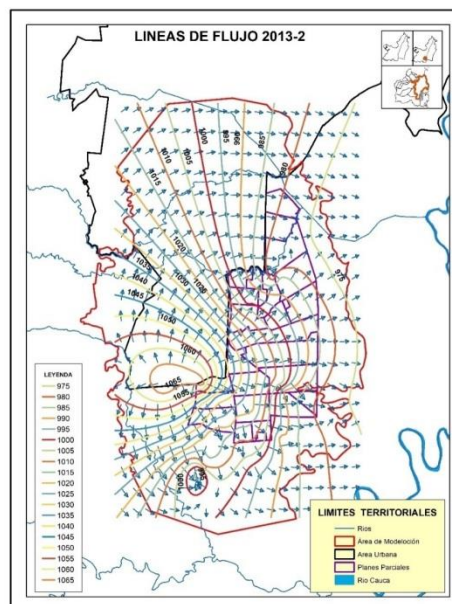


Figura 51. Líneas de flujo 2013-2

Referencias

- Aguilar Duarte, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., & Delgado, C. (2013). *Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos*. 16, 487–495.
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2013). Proyecciones de Poblacion Cali 2006-2036. *Información Estadística Del Municipio*, p. 7. Retrieved from http://www.cali.gov.co/planeacion/publicaciones/informacion_estadistica_pub
- Attard, G., Cuvillier, L., Eisenlohr, L., Rossier, Y., & Winiarski, T. (2016). Deterministic modelling of the cumulative impacts of underground structures on urban groundwater flow and the definition of a potential state of urban groundwater flow: example of Lyon, France. *Modélisation déterministe des impacts cumulés des structures so. Hydrogeology Journal*, 24(5), 1213–1229. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1385-z>
- Barron, O. V., Barr, A. D., & Donn, M. J. (2013). Effect of urbanisation on the water balance of a catchment with shallow groundwater. *Journal of Hydrology*, 485, 162–176. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.027>
- Betancur, T., Mejia, O., & Palacio, C. (2009). Conceptual hydrogeology model to Bajo Cauca antioqueño: a tropical aquifer system. *Revista Facultad de Ingenieria*, (48), 107–118.
- Bocanegra, M., Edgar, J., & Caicedo, J. D. P. (2000). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, (July).
- Congreso de Colombia. (2012). *Política nacional de gestion del riesgo de desastres y se establece el sistema nacional de gestion del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones*. 28.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC. (2010). *Reglamentación de las*

Aguas Subterránea-Acuerdo 042.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC. (2012). *Reglamentación Integral Participativa Para la Gestión de las Aguas Subterránea en el Departamento del Valle del Cauca*. Cali.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC. (2017). *Evaluación Regional del Agua-ERA*.

Cristina, L., & Valencia, B. (2014). *Transformación urbana del área de expansión de Cali. Estudio de caso: Cali-Jamundí corredor, 2000-2013*. 2000–2013.

Dávila-Pórcel, R. A. (2011). *Desarrollo sostenible de usos de suelo en ciudades en crecimiento, aplicando Hidrogeología Urbana como parámetro de planificación territorial: caso de estudio Linares, N. L., México*. 244.

Dávila Pórcel, R. A., & de León Gómez, H. (2017). Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 63(3), 463–477. <https://doi.org/10.18268/bsgm2011v63n3a8>

Diario El País Cali. (n.d.). El Pais - Cali Colombia. Retrieved April 3, 2019, from <http://historico.elpais.com.co/paisonline/calionline/notas/Agosto182004/B118N1.html>

Fernández, M. A. (1996). Ciudades en riesgo. *Red de Estudios Sociales En Prevención de Desastres En América Latina*.

Foster, S. S. D., Morris, B. L., & Lawrence, A. R. (2015). 3. Effects of urbanization on groundwater recharge. *Groundwater Problems in Urban Areas*, 43–63. <https://doi.org/10.1680/gpiua.19744.0005>

GOLDEN SOFTWARE. (2019). Surfer® | 2D & 3D mapping, modeling & analysis software for scientists and engineers. Retrieved April 7, 2019, from

<https://www.goldensoftware.com/products/surfer>

Gwenzi, W., & Nyamadzawo, G. (2014). Hydrological Impacts of Urbanization and Urban Roof Water Harvesting in Water-limited Catchments: A Review. *Environmental Processes*, 1(4), 573–593. <https://doi.org/10.1007/s40710-014-0037-3>

Hydrogeologic, W. (2011). *Visual MODFLOW 2011 . 1 User ' s Manual*.

IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua*. Bogota D.C: IDEAM.

Konikow, L. F., & Kendy, E. (2005). Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal*, 13(1), 317–320. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0411-8>

Lavell, A., & Latina, A. (1994). Viviendo en riesgo. ... *Vulnerables y Prevención de Desastres En* Retrieved from http://desenredando.org/public/libros/1994/ver/ver_todo_nov-20-2002.pdf

MADS. (2012). *Dec_1640_2012.Pdf*. Bogota D.C.

Martín Del Campo, M. A., Esteller, M. V., Expósito, J. L., & Hirata, R. (2014). Impacts of urbanization on groundwater hydrodynamics and hydrochemistry of the Toluca Valley aquifer (Mexico). *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(5), 2979–2999. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3595-3>

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). *Decreto número 3600, 20 de septiembre de 2007.* (3600). Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2007/dec_3600_2007.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos. In *MADS, Colombia*. Retrieved from https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Manejo_de

- Mishra, SK, & Singh, V. (2013). *Metodología de la curva del servicio de conservación del suelo (SCS-CN)*.
- Misra, A. K. (2011). Impact of Urbanization on the Hydrology of Ganga Basin (India). *Water Resources Management*, 25(2), 705–719. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9722-9>
- Moghaddam Nia, A., Khalighi, S., Salajegheh, A., Borji, M., & Malekian, A. (2018). Comprehensive evaluation of groundwater resources based on DPSIR conceptual framework. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(8). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3453-2>
- Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*.
- Olmeda, J. M. (2006). *El agua y su análisis desde la perspectiva económica*. Retrieved from <http://altea.daea.ua.es/ochorem/comunicaciones/MESA2COM/OlmedaPascualJoseMiguel.pdf>
- ONUAA. (2019). Propiedades Físicas | Portal de Suelos de la FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Retrieved April 6, 2019, from <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Palacio, P. (2007). *Identificación de fuentes y zonas de recarga a partir de isotopos estables del agua (caso de estudio Bajo Cauca antioqueño)*. (4), 93p.
- Palmer, R. C., Holman, I. P., Robins, N. S., & Lewis, M. A. (1995). Guide to groundwater vulnerability mapping in England and Wales. *National Rivers Authority R and D Note*, 578(1).
- Pernía Llera, J. M., & Fornés Azcoiti, J. M. (2009). Cambio Climático Y Agua Subterránea. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 17(2), 172–178.

<https://doi.org/10.2113/gseegeosci.15.3.211>

POT. (2014). *Acuerdo 373 de 2014 Plan De Ordenamiento Territorial Del Municipio De Santiago De Cali*. 433.

Pujades, E., López, A., Carrera, J., Vázquez-Suñé, E., & Jurado, A. (2012). Barrier effect of underground structures on aquifers. *Engineering Geology*, 144–145, 41–49.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.004>

Sahagún-sánchez, F., & Reyes-hernández, H. (2018). Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental , México Impact of land use cover change on protected natural areas in central region of Sierra Madre Oriental , Mexico. *Biología y Química*, 12(2), 6–21.

Secretaria del Senado de la República de Colombia. (1993). Leyes desde 1992 - Vigencia expresa y control de constitucionalidad [LEY_0099_1993]. Retrieved April 4, 2019, from http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html

Seiler, K. P., & Gat, J. R. (2007). *Groundwater recharge from run-off, infiltration and percolation*. Springer Science & Business Media.

Simmers. (1988a). *Estimation of Natural Groundwater Recharge NATO ASI Series*.

Simmers, I. (1988b). *Estimation of natural groundwater recharge*. Springer Science \& Business Media.

Smith Domenico. (1998). *Valores estimados de la porosidad (%)*, según Sanders. (1998), 9–10.

Vélez Otálvaro, M. V., Pimienta Ortiz, C., & Quintero Vargas, M. C. (2011). *Aguas Subterráneas: Un Enfoque Práctico* (p. 58). p. 58.

Velis, M., Conti, K. I., & Biermann, F. (2017). Groundwater and human development: synergies and trade-offs within the context of the sustainable development goals. *Sustainability*

Science, 12(6), 1007–1017. <https://doi.org/10.1007/s11625-017-0490-9>

Victoria, M., & Otálvaro, V. (2004). *Métodos para determinar la recarga en acuíferos*.

Villanueva, M., & Iglesias, A. (1990). *Pozos y Acuíferos*. 150.