UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**A GESTÃO DE AQUÍFEROS ATRAVÉS DE
MODELOS NUMÉRICOS: UM EXEMPLO DA
BACIA DO RIO CHICÚ (COLÔMBIA)**

Doris Liliana Otálvaro Hoyos

Orientador: Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
2002

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**A GESTÃO DE AQUÍFEROS ATRAVÉS DE MODELOS NUMÉRICOS:
UM EXEMPLO DA BACIA DO RIO CHICÚ (COLÔMBIA)**

DORIS LILIANA OTÁLVARO HOYOS

Orientador: Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA

Nome

Assinatura

Presidente: Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata

Examinadores: Prof. Dr. Celso de Oliveira Loureiro

Dr. Everton de Oliveira

**SÃO PAULO
2002**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC

30900011000

**A GESTÃO DE AQÜÍFEROS ATRAVÉS DE MODELOS NUMÉRICOS:
UM EXEMPLO DA BACIA DO RIO CHICÚ (COLÔMBIA)**

Doris Liliana Otálvaro Hoyos

Orientador: Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
2002

Ao meu filho Santiago

AGRADECIMENTOS

A autora quer expressar seus mais profundos agradecimentos a todas as pessoas que de uma ou outra forma contribuíram para a realização deste projeto:

Primeiramente a meu orientador Prof. Dr. Ricardo Hirata, pelo incentivo e interesse demonstrado desde o planejamento de minha vinda ao Brasil, pela sua orientação oportuna, pelo seu constante apoio e, e especialmente pela sua infinita compreensão nas horas difíceis.

Ao CAPES-CNPq pela bolsa de Mestrado outorgada.

Ao INGEOMINAS, pelo apoio logístico e pela cessão de material de consulta.

Ao Grupo Hidrogeologia de INGEOMINAS, Glorita, Maria C. e Olga, pelo constante apoio, e especialmente ao Geólogo Mauricio Quiroz, que me auxiliou na aquisição de informações em diferentes instituições da Colômbia.

À Miriam Rios, na qualidade de Chefe do Grupo de Hidrogeologia e especialmente como a amiga que sempre me brindou com sua colaboração.

Ao Programa de Recursos Minerais e Hidrogeologia do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo pela infra-estrutura cedida.

A Secretaria de Pós -Graduação do IGc-USP (Ana Paula e Magali).

Ao pessoal do LAMOS (Laboratório de Modelos Físicos): especialmente a Cláudia Varnier, Alessandro Cesarino, Angélica Gutierrez, Jeane Gláucia dos Santos, pelo apoio e interesse durante a realização do projeto. Ao Luiz Ferrari, pelas valiosas discussões, dicas e sugestões durante a etapa de modelagem matemática.

A Márcia Mika Saito, por sua amizade, seu constante interesse e seu apoio na edição final da tese.

Ao Dr. Daniel Gomes (Waterloo Hydrogeological Inc.) e ao Dr. Carlos Molano (Universidad de Los Andes -Colômbia-) pelas suas valiosas sugestões na etapa de modelagem numérica.

Aos meus colegas colombianos (Érica, Alejandro, César, Michelle, Marcela, Agustín, Anabel, Diana e Javier) por sua amizade e sua colaboração nesta etapa de minha vida.

Aos meus familiares pelo apoio, carinho e compreensão durante o tempo de ausência.

Finalmente ao meu companheiro Fabio, pelo carinho, paciência, apoio e dedicação durante este tempo, e ao Santiago por todas as horas que deixei de passar ao seu lado.

MUITO OBRIGADA.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IV
LISTA DE TABELAS.....	V
LISTA DE ANEXOS.....	V
RESUMO.....	VI
ABSTRACT	VII
 1. INTRODUÇÃO.....	 1
1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2. OBJETIVOS DO PROJETO.....	3
 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	 4
2.1. LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS GEOGRÁFICOS	4
2.2. ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS	6
2.2.1. Água e serviços públicos	9
2.3. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.	9
2.3.1. Unidades Cretáceas	10
a. Formação Chipaque, (Kich).	10
b. Grupo Guadalupe (Ksg).	13
2.3.2. Unidades Terciárias	14
a. Formação Guaduas	14
2.3.3. Depósitos Quaternários	15
a. Formação Sabana	15
b. Depósitos Aluviais.....	15
c. Depósitos Coluviais (Qc).....	16
2.3.4. Geologia Estrutural	16
2.4. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO.....	19
2.4.1. Aspectos Gerais dos Sistemas Aquíferos	21
a. Aquífero Neógeno-Quaternário	21
b. Aquífero Guadalupe.....	23
2.4.2. Apresentação de Estudos Hidrogeológicos Anteriores.....	24
 3. ASPECTOS TEÓRICOS.....	 30
3.1. CONCEITOS BÁSICOS DA MODELAGEM MATEMÁTICA	30
3.1.1. Equação Fundamental de Fluxo	32
3.1.2. Condições de contorno e iniciais.....	35
a. Condição de Contorno Tipo 1 ou Dirichlet.....	36
b. Condição de Contorno Tipo 2 ou Neuman	36
c. Condição de Contorno Tipo 3 ou Cauchy.....	36
d. Condições Iniciais	37
3.1.3. Principais Etapas Desenvolvidas na Modelagem Matemática.....	37
3.1.4. Características do Programa Modflow.	37

3.2. PRINCÍPIOS DE GESTÃO DE AQÜÍFEROS.....	40
3.2.1. Proteção dos recursos hídricos subterrâneos em termos de quantidade	40
3.2.2. Proteção dos Recursos Hídricos Subterrâneos em Termos de Qualidade	42
4. MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1. MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEITUAL.....	44
4.1.1. Compilação de informação	44
4.1.2. Modelo de circulação das águas subterrâneas e variação dos níveis potenciométricos.....	46
4.1.3. Verificação e análise de informação sobre pontos de água	46
4.1.4. Análise dos níveis potenciométricos e do sistema de circulação das águas subterrâneas.....	47
4.1.5. Seleção de parâmetros para a modelagem matemática	48
4.2. MODELAGEM NUMÉRICA DO FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	48
4.2.1. Preparação da informação técnica.....	49
4.2.2. Geração de Camadas	49
4.2.3. Análises preliminares de sensibilidade.....	50
4.2.4 Criação do Modelo Matemático.....	52
5. RESULTADOS	53
5.1. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL.....	53
5.2.2. Geometria dos aquíferos.....	53
5.2.3. Comportamento dos níveis potenciométricos.....	54
5.2.4. Sistema de circulação das águas subterrâneas.	62
5.2.5. Relação hidráulica dos sistemas aquíferos.	62
5.2.6. Parâmetros Hidráulicos.....	63
5.2 MODELAÇÃO NUMÉRICA DO FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEA.....	63
5.2.1. Discretização da área	63
5.2.2. Parâmetros de entrada do modelo	65
a. Condutividade Hidráulica	65
b. Recarga	68
c. Poços.....	69
d. Condições de Contorno	69
5.2.3. Calibração do modelo	72
a. Estado natural ou sem bombeamento.....	74
b. Estado com bombeamento	75
5.2.4. Análise de sensibilidade.....	77
5.2.5. Resultados do modelo matemático	79
5.3. APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO COMO FERRAMENTA DE GERENCIAMENTO.....	83
5.3.1. Cenários de Exploração.....	83
5.3.2. Zonas de contribuição dos poços de abastecimento público.....	87
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	93
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Fatores de desenvolvimento econômico e seus efeitos na população e no meio ambiente	2
Figura 2.	Localização da zona de estudo.....	5
Figura 3.	Panorâmica da zona norte do rio Chicú.....	7
Figura 4.	Mapa geológico da zona de estudo.....	11
Figura 5.	Coluna estratigráfica generalizada da zona de estudo.....	12
Figura 6.	Divisão estrutural por blocos da Sabana de Bogotá.....	17
Figura 7.	Perfis geológicos esquemáticos.....	20
Figura 8.	Espessura dos sedimentos neógeno-quaternários.....	22
Figura 9.	Perfil a sul da bacia do rio Chicú, mostrando a continuidade lateral de sedimentos finos.....	23
Figura 10.	Fluxo de água em um volume elementar representativo de um aquífero.....	33
Figura 11.	Elementos de avaliação, gestão e proteção dos recursos hídricos subterrâneos.....	41
Figura 12.	Metodologia geral utilizada no projeto.....	45
Figura 13.	Testes preliminares de sensibilidade.....	51
Figura 14.	Variograma experimental dos dados de níveis estáticos para a década do 90.....	55
Figura 15.	Blocos de interpolação por krigagem, dos valores médios do nível estático.....	55
Figura 16.	Mapa potenciométrico para os anos 1991-1992.....	57
Figura 17.	Mapa potenciométrico da década do 90.....	58
Figura 18a.	Variação dos níveis potenciométricos (1991-1992).....	59
Figura 18b.	Localização dos poços analisados.....	59
Figura 19a.	Variação dos níveis potenciométricos na década do 90.....	60
Figura 19b.	Localização dos poços analisados.....	60
Figura 20.	Possíveis causas dos rebaixamentos dos níveis potenciométricos.....	61
Figura 21.	Transmissividade versus capacidade específica dos poços.....	64
Figura 22a.	Discretização horizontal da malha.....	66
Figura 22b.	Discretização vertical da malha.....	66
Figura 23.	Distribuição espacial da condutividade hidráulica.....	67
Figura 24.	Distribuição espacial da recarga por precipitação.....	70
Figura 25a.	Poços de observação, estado "sem bombeamento".....	71
Figura 25b.	Poços de observação e extração, estado "com bombeamento".....	71
Figura 26.	Condições de contorno do modelo matemático.....	73
Figura 27a.	Gráfico de calibração para o estado "sem bombeamento".....	76
Figura 27b.	Gráfico de calibração para o estado "com bombeamento".....	76
Figura 28a.	Mapa potenciométrico simulado para o estado "sem bombeamento".....	80
Figura 28b.	Mapa potenciométrico simulado para o estado "com bombeamento".....	81
Figura 29.	Efeitos regionais de bombeamento intensivo.....	84
Figura 30.	Efeitos locais do bombeamento intensivo.....	86
Figura 31.	Zonas de contribuição total dos poços municipais.....	89
Figura 32.	Zonas de trânsito dos poços de abastecimento público.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo dos aspectos sócio-econômicos da área de estudo.....	8
Tabela 2. Principais características das unidades aflorantes na zona de estudo.....	25
Tabela 3. Protocolo da modelagem matemática.....	38
Tabela 4. Condutividades hidráulicas iniciais.....	65
Tabela 5. Dados de recarga usados na modelagem numérica.....	68
Tabela 6. Resultados da análise de sensibilidade.....	78
Tabela 7. Balanços de massa para as simulações em estado com bombeamento e sem bombeamento.....	82
Tabela 8. Raios máximos das zonas de trânsito dos poços municipais.....	90
Tabela 9. Restrição de atividades potencialmente contaminantes, nos perímetros de proteção de poços.(Hirata e Rebouças, 1999).....	91

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO 1. Níveis potenciométricos dos anos 1990, 1991-1992, 1995, e 1998-1999.
- ANEXO 2. Dados técnicos dos poços selecionados para o estudo.
- ANEXO 3. Dados das probas de bombeamento, e outras informações da zona.
- ANEXO 4. Análises preliminares de sensibilidade.

RESUMO

Os recursos hídricos subterrâneos são um fator relevante para o desenvolvimento sócio-econômico, atual e futuro da Bacia do Rio Chicú -Colômbia-. A exploração de aquíferos nesta região foi incrementada substancialmente a partir da década de 80 com o auge da floricultura, mas sem acompanhamento nem controle adequados por parte das autoridades competentes. Atualmente, este manejo impróprio do recurso tem ocasionado problemas ambientais como a seca de fontes superficiais de água, queima natural de solos e fenômenos localizados de subsidência do terreno.

Nesta bacia foi realizada uma modelagem numérica tridimensional do fluxo da água subterrânea, que se baseou fundamentalmente na síntese das informações geológicas e hidrogeológicas disponíveis e da análise da complexa tectônica que afeta a área, visando melhorar o conhecimento hidrogeológico, bem como avaliar a resposta do sistema frente à exploração intensiva local e regional.

Como resultados do estudo foram identificadas as tendências gerais do fluxo das águas subterrâneas, a existência de componentes laterais de fluxo desde as serras adjacentes, especialmente a de Tabio-Tenjo, e o potencial hidráulico para fluxos ascendentes a partir dos aquíferos profundos, mas com tempos de trânsito de várias centenas de anos. Igualmente, foram identificadas zonas com rebaixamento constante dos níveis potenciométricos localizadas principalmente a sul do município de Tenjo, em Vereda Carrasquilla e Vereda El Estanco. Estes rebaixamentos, que para a década de 90 foram inferiores a 10 m, estavam associados geralmente à alta densidade de poços, e em casos isolados, às elevadas vazões de exploração.

Os cenários de exploração intensiva mostraram a fragilidade do sistema, especialmente na região dos poços de abastecimento público, onde se gerariam grandes rebaixamentos como resultado da interferência de poços próximos. A exploração intensiva regional revelou uma rápida diminuição dos aportes as drenagens, maior rebaixamento regional dos níveis aquíferos e, em alguns casos, rebaixamentos localizados e seca de zonas superficiais próximas aos poços.

Com respeito à proteção da qualidade das águas subterrâneas, foram traçadas as zonas de captura e de trânsito dos poços municipais, para as quais deram-se algumas recomendações gerais sobre as atividades que devem ser restringidas ou aceitas com a implementação de estudos detalhados.

ABSTRACT

Groundwater resources have been fundamental on the socio-economic past and present development of Rio Chicú basin. Intensive aquifer exploitations have been increasing since the floriculture boom on the 80's, but without adequate regulation. Nowadays, this inappropriate use of hydrogeological resource has lead to environmental problems such as groundwater head drawdown, lost superficial waters, naturally born soils and terrene subsidence.

In order to obtain a better hydrogeological knowledge of the region and understand the system response to local and regional exploitation, a tridimensional numerical groundwater flow model was developed, using geological and hydrogeological information, especially according to the tectonic related with the area .

The results allowed us to identify the general trend of the groundwater flow, the presence of a lateral flow from adjacent higher lands (particularly the Serrania Tabio-Tenjo), and the hydraulic potential for ascendant flows from depth aquifers, but with hundreds of years of transit times. Zones with constant groundwater levels drawdown where localized in the Vereda Carrasquilla, Vereda El Estanco and the Serrania Tabio-Tenjo. This groundwater levels drawdown where lower than 10 m for the 90s, and generally associated with high well density, and sporadically with high exploitation rates.

Intensive exploitation scenarios show the fragility of the system, especially in the areas of public wells, where higher groundwater levels drawdowns are the result of interference among wells. Regional intensive exploitation has shown a fast decrease of river base flow.

Supply protection areas of public wells where also delineated, whereas general recommendation for acceptable or rejectable activities and detail studies within the protection perimeters where done.

1. INTRODUÇÃO

Em termos gerais, esse estudo compreende dois aspectos principais. O primeiro relacionado à gestão de aquíferos na Bacia do Rio Chicú, onde os recursos hídricos subterrâneos desempenhando um papel relevante para o seu desenvolvimento econômico e social. O segundo aspecto é relacionado à área específica do conhecimento, a aplicação da simulação matemática tridimensional do fluxo das águas subterrâneas, numa região particularmente complexa desde o ponto de vista geológico-estrutural.

Com relação ao primeiro aspecto, a zona de estudo faz parte da Sabana de Bogotá, uma região intensamente habitada e estratégica para o desenvolvimento atual e futuro da Colômbia. Nas últimas décadas esta área tem experimentado um significativo incremento nas atividades agro-industriais, especialmente nas zonas cultivadas com flores, destinadas à exportação. Esta situação tem trazido como consequência uma maior demanda de água para diversos usos; suprida na sua grande maioria através das águas subterrâneas, mas sem controle adequado da sua exploração.

Do ponto de vista hidrogeológico, o sistema de circulação das águas subterrâneas, a variação de parâmetros hidrogeológicos e a relação hidráulica dos dois principais sistemas aquíferos da região (depósitos não consolidados Neógeno-Quaternários e Guadalupe), estão estreitamente ligados à complexa configuração geológica da zona e sua forte atividade tectônica e neotectônica, que gerou falhas, dobramentos e fraturamentos das rochas consolidadas e que afetam consideravelmente a disposição das unidades em subsuperfície.

1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A demanda de recursos hídricos na bacia do Rio Chicú tem sofrido um significativo incremento devido à presença de numerosas agroindústrias de cultivo de flores, as quais requerem grandes volumes de água para sua produção e funcionamento. Nessa zona, as águas subterrâneas têm-se colocado como

excelente alternativa para satisfazer a crescente demanda, frente aos cada vez mais comuns cenários de seca e contaminação das fontes hídricas superficiais.

Apesar da marcada importância que o recurso hídrico subterrâneo tem desempenhado para o desenvolvimento da região, a falta de gerenciamento, por parte das autoridades competentes, somada a fatores sociais e econômicos (Figura 1), têm gerado grandes efeitos negativos ao meio ambiente, como a seca de fontes superficiais de água, rebaixamento localizado dos níveis dos aquíferos, fenômenos de subsidência do terreno e incêndios naturais de sedimentos orgânicos dessecados, nas zonas de piemonte e na planície.

Figura 1. Fatores de desenvolvimento econômico e seus efeitos na população e no meio ambiente.

Frente ao atual panorama da exploração dos recursos hídricos subterrâneos na zona de estudo, é de vital importância implementar estratégias que permitam

garantir seu uso sustentável, sem sacrificar o crescimento sócio-econômico, antes que o problema alcance limites críticos.

O presente trabalho, através da criação de diversos cenários de exploração num modelo numérico tridimensional de fluxo das águas subterrâneas, calibrado, pretende indicar algumas estratégias para a gestão deste recurso na bacia, a fim de auxiliar as autoridades encarregadas do seu controle.

1.2. OBJETIVOS DO PROJETO

O projeto de pesquisa tem como objetivo principal a modelagem numérica do fluxo de água subterrânea em três dimensões, partindo-se da síntese do conhecimento geológico, incluindo a análise da tectônica complexa que afeta a área. Este modelo permitirá subsidiar as autoridades ambientais na administração dos recursos hídricos na zona.

Espera-se também que o presente trabalho sirva para auxiliar na implementação de outros estudos de igual tônica em outras regiões colombianas, igualmente complexas sob o ponto de vista geológico-estrutural.

Os objetivos específicos do projeto podem ser resumidos nos seguintes itens:

- Revisão do modelo hidrogeológico conceitual da bacia do Rio Chicú-Colômbia, partindo dos estudos realizados na área;
- Análises do comportamento dos níveis piezométricos na década de 90;
- Exercício de modelagem matemática do fluxo d'água com o programa Visual Modflow, Waterloo Hydrology Inc. (1998), visando identificar as áreas com maior sensibilidade à exploração, para propor ferramentas adequadas para o controle do recurso.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS GEOGRÁFICOS

A zona de estudo localiza-se no estado de Cundinamarca-Colômbia, 20 km a noroeste da cidade de Bogotá. A região faz parte da grande bacia hidrográfica do rio Bogotá, que forma a maior alti-planície da Cordilheira Oriental do País e está compreendida entre as coordenadas UTM, com origem em Bogotá:

$$\begin{array}{ll} X_1: 986.000 \text{ m} & Y_1: 1'017.000 \text{ m} \\ X_2: 1'001.000 \text{ m} & Y_2: 1'040.000 \text{ m} \end{array}$$

A zona apresenta uma forma alongada no sentido NNE, concordante com o padrão estrutural dos Andes Colombianos. Sua área é de aproximadamente 140km², com uma largura máxima no centro da bacia de 11,2km e um comprimento de 20km (Figura 2).

As principais vias de acesso partem da rodovia Bogotá-Medellín, perto das regiões conhecidas como Sibéria e La Punta, localizadas ao SW da bacia. Destas vias saem numerosos caminhos que comunicam-se com as fazendas agrícolas da região.

A principal drenagem é o rio Chicú, embora atualmente esteja quase sem água. Segundo Van Der Hammen (1998), em décadas passadas, este rio contava com a água que rendiam aproximadamente 12 riachos principais distribuídas nos flancos das serranias adjacentes. Em 1943, a vazão do rio Chicú, depois de receber estes tributários, era de aproximadamente 1152 m³/h, hoje, praticamente, transporta somente esgoto.

Geomorfologicamente podem-se diferenciar duas zonas, a primeira predominantemente plana, localizada na parte central da bacia, apresentando altitudes de 2550 msnm próximo ao leito do rio Chicú e seus tributários, e aumentam gradualmente ao norte da bacia, perto de sua nascente. A segunda zona é formada pelos sistemas montanhosos que contornam a zona plana, as serranias de Tabio-Tenjo ao oeste e de Cota-Chía a leste, as quais apresentam altitudes máximas de

Fonte: www.igcac.gov.co (2001)

Figura 2. Localização da zona de estudo

3150msnm. Na figura 3 pode se apreciar uma panorâmica da zona norte da bacia do Rio Chicú, onde evidenciam-se as diferenças geomorfológicas da zona.

O clima da região é classificado como frio andino, com temperaturas médias entre 14 e 17 graus centígrados, com uma precipitação média anual de 850mm na parte plana e 1000mm nas zonas montanhosas. Apresentam-se duas épocas chuvosas, de abril a maio e de outubro a novembro, e duas épocas secas, de junho a setembro e de dezembro a março (Ingeominas, 1990).

A vegetação nativa existente é caracterizada por pastos e por alguns bosques, embora muitos deles tenham sido desflorestados. Segundo Van Der Hammen (1998), encontram-se na Serra de Tabio-Tenjo o denominado "*bosque de corono, espino e raque*".

2.2. ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS

Na bacia estudada, encontram-se dois pequenos municípios, Tabio e Tenjo, os quais foram fundados nos anos 1800 e 1652, respectivamente. Atualmente Tabio conta com uma população de 12.370 habitantes, dos quais o 68% reside na zona rural. No município de Tenjo há um total de 15.395 habitantes, com um 86% morando na área rural (Tabela 1).

As principais atividades econômicas da região estão relacionadas ao cultivo de flores, destinadas principalmente para exportação aos E.U.A, onde Colômbia ocupa o segundo lugar dentro dos países exportadores. Na Sabana de Bogotá localizam-se o 92% das áreas cultivadas com flores do país, produzindo mais de 50 variedades, dentro das quais as mais representativas são o clavel, a rosa, a alstroeméria e o pompom (Asocolflores, 2000).

Em 1991, existiam na bacia do rio Chicú mais de 58 companhias floricultoras que ocupavam uma área de 242,34 ha (UN-SENA, 1992). Hoje as áreas cultivadas ocupam 436 ha (CAR, 2000), mostrando um incremento de 180% na última década. Outros cultivos de caráter transitório são batata, cereais, cenoura, etc, e também têm importância a criação de bovinos para produção de carne e leite. Nas zonas de piemonte das serranias adjacentes existem extensas explorações de areias e seixos

Figura 3. Panorâmica da zona norte do rio Chicú

Tabela 1. Resumo dos aspectos sócio-econômicos da área de estudo.

ÁREA E POPULAÇÃO

Município	Área		Número de Vilas	Habitantes		Taxa de Crescimento (%)	Densidade (Hab/km ²)	População com Necessidades básicas não satisfeitas (%)
	Urbana	Rural		Z. Urbana	Z. Rural			
TABIO	0.45	75	7	3986	8386	1	133	69
TENJO	0.24	109	15	2084	13311	7	141	62

ATIVIDADES ECONÔMICAS

Município	Cultivo Flores Ha	Cultivos Transitórios (Há)	Batata (Ha)	Ervilha (Ha)	Cenoura (Ha)	População Bovina
TABIO	66	310	150	50	-	6250
TENJO	370	600	-	-	N/S	6500

SISTEMA DE AQUEDUTO E REDE DE ESGOTO

Município	Sistema Aqueduto	Capac. m ³ /h	Plantas Tratamento	Capac. (m ³ /h)	Cobertura (%)	Água Potável (%)	Perdas (%)	Cobert. Rede Esgoto (%)
TABIO	Rio Frio Occlid.	12,1	1 Quebrada Tincé.	150,6	87,5	47,9	29	95
	Rio Frio Orient.	12,5						
	Salitre	11,3						
	Carrón	3,38						
	Casco Urbano	64,8						
TENJO	P. Chitasugá I	73,08	4 Plantas convencionais 1 Planta compacta	331,2	100	60	-	90
	P. Chitasugá. II	37,2						
	P. Casajera	33						
	Poço Juaica	2,2						
	P. Churuguaco	41,8						
	Poço La Punta	N/S						

N/S: Sem Informação

Baseado em informações de CAR, 2000 e EAAB, 2000.

provenientes das formações cretáceas superiores, principalmente de Arenisca de Labor y Tierna, os quais são usados como materiais para construção. Esta exploração cria grandes valas, com um grande efeito negativo na paisagem, além de serem utilizadas freqüentemente para disposição de resíduos domésticos e industriais (Van Der Hammen, 1998).

2.2.1. Água e serviços públicos

O abastecimento de água, esgoto e limpeza são responsabilidades das secretarias de serviços públicos dos municípios. Assim, a distribuição de água na zona rural de Tabio é feita através de quatro sistemas que não tratam seus efluentes, em quanto à zona urbana. Este sistema em conjunto tem uma capacidade de 104,94 m³/h e abastece um total de 10.817 habitantes, apresentando uma cobertura de 95% da população. O abastecimento de água no município de Tenjo, tanto para a zona rural como para as 18 vilas, algumas pertencentes a municípios vizinhos, é feito através de seis poços profundos, que têm a capacidade de produção de 207 m³/h. Este sistema conta ainda com cinco plantas de tratamento de água e tem uma capacidade para 331 m³/h, abastecendo a 90% da população (EAAB, 2000; Tabela 1). Quanto à utilização de água subterrânea na floricultura, existem somente algumas estimativas para a Sabana de Bogotá, baseadas num cadastro de quase 50% de poços ativos, realizado por CAR-INPRO (1994, *apud* García e Ortega 1996). Segundo estes últimos autores a exploração deve ser da ordem de 50.000.000 m³/ano.

Nos cultivos de flores, 80% da água é utilizada no processo de irrigação e o restante é empregado para fertilização, aplicação de pesticidas e preparação de soluções para a etapa de pós-colheita e uso doméstico.

2.3. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.

A sucessão litológica da Sabana de Bogotá inicia-se com rochas sedimentares, de origem marinha, e metamórficas de baixo grau, de idade paleozóica, as quais foram cobertas por uma série de mega-sequências sedimentarias, de tipo "Back-Arc" durante o Cretáceo, "Early Foreland Basin", no

Paleogeno, "Pre-Andean Foreland Basin", no Eoceno-Mioceno e "Foreland Basin" durante o Mioceno-Quaternário. A Sabana de Bogotá formou-se durante o desenvolvimento desta última mega-sequência, onde predominou uma forte componente tectônica, como resultado da acreção do bloco do Panamá (Cooper *et al.*, 1995). As estruturas originadas por esta compressão apresentam um "trend" estrutural NNE e estão constituídas por uma série de sinclinais amplos com núcleos de rochas terciárias e anticlinais estreitos com núcleos de rochas cretáceas, às vezes invertidos, intensamente fraturados e com seus contatos deslocados pela ação de falhas de tipo inverso. A partir do Mioceno-Quaternário, as sub-bacias originadas foram cobertas por sedimentos fluvio-glaciais, lacustres, aluviais e coluviais.

Cronologicamente apresentam-se as seguintes unidades estratigráficas na bacia do rio Chicú (Figuras 4 e 5):

2.3.1. Unidades Cretáceas

a. Formação Chipaque, (Kich).

Esta formação, pertencente ao Grupo Villeta, foi definida inicialmente por Hubach (1931) e redefinida por Renzoni (1968). É considerada a base da coluna estratigráfica da bacia e aflora no extremo NW da Serra de Tabio-Tenjo, perto da nascente do rio Chicú, e na margem oeste da Serra de Cota-Chía, como uma faixa alongada em contato falhado com o Grupo Guadalupe. Em geral apresenta uma expressão geomorfológica suave. Litologicamente esta formação é caracterizada por estratos de até 10 m de espessura de siltitos argilosos pretos, finamente laminados, ocasionalmente silicosos, que meteorizam em forma de escamas. Também aparecem siltitos finos pretos com esporádicas intercalações de calcários, principalmente na parte inferior. Na parte superior apresentam-se arenitos de quartzo muito finos, da cor cinza clara a obscura, de até 1 m de espessura, intercalados com esporádicos níveis de carvão. A espessura da unidade é variável e pode alcançar 900 m na zona de estudo. Segundo Caro *et al.*, (1996), a idade da Formação Chipaque é Conociano-Santoniano e foi depositada num ambiente marinho pouco profundo.

Figura 4. Mapa geológico da zona de estudo.

Figura 5. Coluna estratigráfica generalizada da zona de estudo.

b. Grupo Guadalupe (Ksg).

Este grupo foi definido por Hubach (1931) e posteriormente dividido por Renzoni (1962, 1968) em três formações, denominadas Arenisca Dura, Plaeners e Arenisca de Labor y Tierna, as quais foram posteriormente descritas por Pérez e Salazar (1978).

Formação Arenisca Dura (Ksgd).

Esta formação ocupa a parte central das zonas montanhosas que rodeiam a bacia, onde aparece fortemente afetada pela ação de falhas, geralmente de tipo inverso, que repetem sucessivamente as seqüências de rochas Cretáceas da área. Esta formação apresenta-se em estratos muito grossos de arenitos quartzosos, de grão fino a médio com tonalidades cinza a branco, muito compactos, com cimentação silicosa, intercalada com delgadas camadas de siltitos, siltitos silicosos e argilitos de cores claras. Na parte superior, os arenitos são calcários, e alguns estratos podem conter foraminíferos (Ingeominas, 1983). A espessura desta formação varia entre 300 e 450 m. Seu ambiente de deposição é considerado marinho pouco profundo a sublitoral.

Formação Plaeners (Ksgpl).

Na zona de estudo esta formação aparece na parte central da Serrania de Tabio-Tenjo, com seu traço interrompido por falhas geralmente inversas e com direção NNE. Na Serrania de Cota-Chía aparece na margem SW, como uma faixa delgada e alargada. Esta formação está constituída por uma sucessão de siltitos finos silicosos e argilitos, geralmente compactos, de tonalidade cinza, com estratificação fina e fratura romboédrica. Ocasionalmente aparecem estratificadas camadas de arenito de grão fino a muito fino, quartzosos, bem cimentados. As camadas de siltitos freqüentemente encontram-se separadas por finos níveis de argila que favorecem seu fraturamento. Apresenta uma morfologia suave e sua espessura varia entre 60 e 160 m. Segundo Blatt (1972; *apud* Pérez e Salazar, 1978), as estruturas sedimentares e litológicas indicam uma sedimentação em um ambiente tranqüilo muito pouco profundo, com possível exposição subaérea, correspondente a planícies de lama formadas por correntes marinhas.

Formação Labor y Tierna (Ksglt).

Esta formação aparece restrita ao extremo NE da Serrania de Cota-Chía, e fora da zona de estudo, na margem leste desta mesma serrania, como pequenas faixas isoladas. Ingeominas (1990) divide esta unidade em três conjuntos: o inferior compreendido por bancos muito grossos de quartzo-arenitos de tonalidades cinzas e amarelas, de grão fino, sub-arredondados e bem selecionados, intercalada com camadas de até 2 m de espessura de siltitos finos laminados, mostrando que o contato desta formação com a Plaeners é transicional. Este nível pode alcançar os 50 m de espessura. A parte média é constituída por uma seqüência monótona de argilitos silicosos, que podem alcançar os 15 m de espessura. A parte superior apresenta uma seqüência de arenitos de quartzo de grão fino a médio, de cor cinza claro, sub-arredondadas, bem selecionadas, com estratificação cruzada, em estratos de 0,2 a 3 m de espessura. Na Sabana de Bogotá tem-se reportado espessuras entre 250 e 325 m, mas na área de estudo a formação aparece com aproximadamente 100 m, segundo as colunas litológicas levantadas em estudos anteriores. Esta formação foi depositada num ambiente litorâneo com importante influência de ondas e é relacionada ao Maastrichtiano inferior e médio (Caro *et al*, 1996).

2.3.2. Unidades Terciárias

Na Sabana de Bogotá aparece uma espessa seqüência de rochas terciárias predominantemente argilosas que cobrem as unidades cretáceas descritas anteriormente. Na zona de estudo somente é reportada a Formação Guaduas.

a. Formação Guaduas (KTg)

Esta formação foi definida por Hettner (1892), posteriormente estudada por Hubach (1957) e mais recentemente por Sarmiento (1992). Na zona de estudo aflora no piemonte da Serrania Tabio-Tenjo, formando o núcleo do Sinclinal do Rio Frio localizado ao norte da bacia do Chicú e cujo eixo possivelmente é cortado dentro da área de estudo por uma falha transversal. Segundo Sarmiento (1992), nesta unidade podem-se diferenciar 9 segmentos: i) Predomínio de siltitos finos com lentes de siltitos grossos ou quartzo-arenitos; ii) Primeira zona produtora de carvão, que encontra-se em camadas intercaladas entre siltitos finos, com conteúdo variável de matéria orgânica; iii) Arenitos com intercalações de siltito grosso e fino; iv) Segundo

setor produtor de carvão, com abundantes siltitos finos e poucos níveis de arenitos; v) Argilitos de tonalidades vermelhas e verdes; vi) Terceiro nível produtor de carvão, com siltitos finos e lentes delgadas de siltitos grossos ou arenitos quartzosos; vii) Siltitos finos com diferentes conteúdos de matéria orgânica, aparecem na parte inferior; na parte média encontra-se o último setor com camadas de carvão intercaladas entre camadas de siltitos finos de pouca espessura, siltitos grossos e níveis arenosos; e na parte superior aparecem siltitos finos; viii) Arenitos granodecrescentes imaturos na sua textura e composição; ix) Sucessão de camadas de siltitos finos, com níveis arenosos. A espessura desta unidade varia entre 600 e 1000m (Van Der Hammen, 1957). Esta unidade em algumas cartas geológicas aparece cartografiada como Formação Bogotá, como no Mapa do Neógeno-quaternário (Van Der Hammen, 1995).

2.3.3. Depósitos Quaternários

Entre os depósitos quaternários encontram-se a Formação Sabana e depósitos aluviais e coluviais.

a. Formação Sabana (Qsa)

Esta formação ocupa a maior parte da planície da Sabana de Bogotá e da zona de estudo. É composta principalmente por argilas plásticas, da cor cinza escura, distribuídas em estratos que podem alcançar até 1 m de espessura, e por sedimentos finos de origem lacustre, com estratificações de lentes de areia, seixos e cinzas vulcânicas. Nas margens das sub-bacias da Sabana de Bogotá existe um incremento nas intercalações de argila orgânica, turfas, lignitos, argilas arenosas e areias argilosas (Van Der Hammen, 1995). Na parte central dos perfis litológicos dos poços Funza II e Cidade Universitária, selecionados como “seções tipo” desta formação, encontram-se camadas de areia, situação que se repete em outras perfurações feitas na bacia do rio Chicú. A espessura total desta formação, segundo os registros litológicos da área de Funza, alcança 320 m. Sua idade é Pleistoceno Médio a Tardio (Van Der Hammen, 1995).

b. Depósitos Aluviais (Qal)

Os depósitos aluviais, de idade holocena foram originados por fortes correntes fluviais. Na zona de estudo são compostos por areias, silte e seixos, e localmente

calhaus arredondados de arenitos em matriz areno-siltosa, e silto-arenosos e esporádicas lentes de calhaus de arenito. Estes depósitos se localizam ao longo das correntes de rios e riachos. Nos rios pode alcançar até 30m de espessura, enquanto nos riachos ocasionalmente passa os 2 m. (Ingeominas, 1990).

c. Depósitos Coluviais (Qc)

Na zona de estudo estes depósitos aparecem no extremo NE da Serra de Tabio-Tenjo e na zona centro-norte da Serrania Cota-Chía. Eles são acumulações de ladeira resultantes do fraturamento e arraste de rochas pré-existentes. São originados geralmente nas zonas de fratura com alta pendente, o que facilita seu transporte pela ação da gravidade. Geralmente são constituídos por seixos, calhaus e blocos em matrizes predominantemente argilosas. A idade assinada para estes depósitos é Pleistoceno a Holoceno.

2.3.4. Geologia Estrutural

A complexa tectônica da área de estudo está intimamente relacionada à evolução da Cordilheira Oriental da Colômbia, onde convergem e interagem as placas litosféricas Nazca, Sul América e Caribe.

A Sabana de Bogotá tem sido descrita como uma área de “tectônica especial” dentro da Cordilheira Oriental, onde segundo Julivert (1963; *apud* Velandia, 2000), apresentam uma mistura de mecanismos tectônicos com presença de falhas que cortam um embasamento basculado, formando amplos sinclinais e estreitos anticlinais, assimétricos, com seus flancos invertidos, dobramentos inclinados, discordância angulares e fenômenos de injeção salina.

Uma das principais características da Cordilheira Oriental e dos Andes Setentrionais é a existência de um “trend” estrutural no sentido NNE, como resultante da principal direção dos esforços compressivos gerados pela interação das placas litosféricas mencionadas. Embora esta seja a principal direção das estruturas da região, existem alguns autores como Gómez (1986, 1991), Reyes (1993) *apud* Velandia (2000), Caro *et al.* (1996), que mencionam a importância dos padrões de falhamento no sentido SE-NW, os quais jogaram um papel fundamental na origem da bacia intramontana da Sabana de Bogotá. Estas falhas têm um movimento de direção e conformam diferentes blocos tectônicos transversais, os quais podem estar subdivididos por falhas longitudinais.

Para explicar as diversas características estruturais encontradas na Sabana de Bogotá, autores como Caro *et al.* (1996), diferenciaram em três blocos estruturais separados por grandes falhas transversais, como mostrado na Figura 6. A Falha de Usaquén divide o Bloco Norte, (onde encontra-se a zona de estudo), do Bloco Central, e a prolongação das Falhas San Cristobal-Facatativá, separa este último do Bloco Sul.

A principal característica encontrada no Bloco Norte, é o perecimento das serranias de Tabio-Tenjo, Cota-Chía e Suba, no limite sul do bloco, correspondente ao traço da falha saquén. O Bloco Central sofreu um deslocamento a oeste, com respeito aos blocos norte e sul, associado com falhas de cavalgamento, com plano de inclinação para este, as quais, possivelmente estão conectadas em profundidade. Neste bloco se nota um incremento significativo na espessura dos sedimentos recentes, e incluso nesta zona localiza-se o poço Funza, que serviu para descrever as características da Formação Sabana. O Bloco Sul, é caracterizado pela presença de sinclinais amplos e pela forte deflexão que sofrem as estruturas da zona oeste do bloco, em direção ao NW.

Figura 6. Divisão estrutural por blocos da Sabana de Bogotá.
Tomada de Caro *et al.* 1996.

Estudos mais recentes, como o de Velandia (2000), continuam destacado a importância dos sistemas de falhamento transversais e a possível existência de atividade neotectônica, afetando os sedimentos Neógeno-Quaternários, considerados na maioria de trabalhos anteriores como de relativa calma estrutural. Estas falhas com possível atividade recente seriam responsáveis pela conformação de blocos estruturais, que podem variar substancialmente a espessura dos sedimentos recentes, como ocorre na área de estudo. Acosta e Ulloa (1997) também destacam a presença de pequenos domos alinhados ao longo da bacia, que poderiam evidenciar atividade neotectônica.

Segundo Acosta e Ulloa (1997), a bacia rio Chicú esta constituída ao norte pela terminação do Sinclinal do rio Frio, o qual estaria limitado pela falha mais ocidental da Serrania de Cota-Chía. Ao sul esta presente só o flanco ocidental deste sinclinal. Estes autores descrevem algumas características particulares presentes nas serranias da zona estudada, como:

Serrania de Tabio-Tenjo: trata-se de uma estrutura anticlinal, afetada pela ação de falhas de cavalgamento com diferentes direções, e pode ser dividida em 3 setores:

- Setor norte e núcleo da serrania: presença de falhas de cavalgamento com vergência leste e direção N10E a N20E.
- Setor centro: a direção das falhas de cavalgamento sofre uma mudança brusca na sua direção, variando entre N70E e N80E.
- Setor sul: no seu flanco E se apresentam cavalgamentos com direção E, com inclinação ao W, e no flanco W se apresentam com inclinação para E.

Os autores propõem para esta serrania a existência de um empilhamento de cavalgamentos em forma de anticlinal ("*antiformal stack*"), que possivelmente sofreu uma rotação de 40° na sua parte central.

Serrania Cota-Chía: as características observadas nesta serrania apresentam menor complexidade estrutural, com presença de duas falhas de cavalgamento com sentido NNE, com planos de inclinação a E. No extremo sul da serrania encontra-se um anticlinal invertido, interpretado por Acosta e Ulloa (1997) como "*Drag Fold*", originado pelo movimento da falha mais ocidental da zona. Também têm sido

cartografadas algumas falhas transversais, que apresentam certa continuidade nos sedimentos recentes.

Segundo Velandia (2000), na bacia do rio Chicú confluem de forma particular falhas de cavalgamento ou retro-cavalgamento, provocando os maiores deslocamentos verticais da região central da Sabana de Bogotá. O autor menciona, entre outras características, que as falhas que delimitam a Serrania de Tabio-Tenjo têm continuidade embaixo dos sedimentos recentes, formando cunhas onde as unidades cretáceas e paleógenas são detectadas a diferentes profundidades. Segundo o autor as falhas de cavalgamento atuam como isolantes hidrogeológicos, podendo separar, inclusive, algumas zonas de recarga. Já as falhas transversais, consideradas como distensivas ou extensionais, se convertem em excelentes condutoras, principalmente quando associadas a zonas de intenso fraturamento.

No presente estudo, para melhor apreciar o importante papel que têm as falhas de cavalgamento na conformação geológica, e seu efeito na continuidade das unidades cretáceas e terciárias embaixo dos espessos sedimentos neógeno-quaternários, foram construídos uma série de perfis geológicos esquemáticos varrendo toda a área de estudo, baseados nas informações geológicas de superfície de Ingeominas (1990), Acosta (1993), Acosta e Ulloa (1997) e Velandia (2000). Ver alguns exemplos na Figura 7 (na figura 4 pode ser vista sua localização).

2.4. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

Regionalmente, a Sabana de Bogotá apresenta dois principais complexos aquíferos, um superficial, formado por depósitos não consolidados neógeno-quaternário, e um aquífero profundo, formado pelas rochas cretáceas do Grupo Guadalupe. Estes aquíferos estão geralmente separados por uma espessa camada de sedimentos terciários de composição predominantemente argilosa e de baixa condutividade hidráulica, que atuam como uma espécie de aquitarde regional, embora possam conformar horizontes aquíferos de caráter local.

Figura 7. Perfis geológicos esquemáticos.

Na Bacia do rio Chicú, os dois complexos aquíferos foram analisados conjuntamente baseados na informação existente, especialmente de Ingeominas (1990), como descrito a seguir.

2.4.1. Aspectos Gerais dos Sistemas Aquíferos

a. Aquífero Neógeno-Quaternário

O sistema aquífero superficial é constituído por sedimentos não consolidados de idade neógeno-quaternária pertencentes à Formação Sabana e aos depósitos de origem aluvial, fluvio-glacial e coluvial. Estes sedimentos ocupam a parte central da bacia e conformam uma paisagem plana à ligeiramente ondulada. Sua espessura, segundo as novas interpretações de Ingeominas (2000), chega a mais de 500 m na parte central da bacia (Figura 8).

Este aquífero tem sido intensamente explorado, especialmente a partir da década de 80 com o auge da floricultura na região. No cadastro de poços levantado por Ingeominas (1990), existiam aproximadamente 35 poços cacimba, com profundidades inferiores aos 15m e mais de 800 poços tubulares concentrados em pequenas áreas, cujo principal uso era o abastecimento público, seguido da irrigação. Sua profundidade é geralmente inferior aos 100 m, com regimes de exploração nas áreas cultivadas de 12 a 24 horas/dia, vazão média de $2\text{m}^3/\text{hora}$, extraíndo aproximadamente $2,9 \times 10^6 \text{m}^3/\text{ano}$ (Ingeominas, 1990). Não existe um cadastro atualizado das captações na região, que permita calcular os volumes extraídos atualmente deste aquífero. Há só estimativas de que anualmente são perfurados ao redor de 90 poços na Sabana de Bogotá (Alvarez, 1997). Além desta situação deve-se levar em consideração que muitos dos poços também têm sido abandonados por diferentes causas ou foram construídos como reserva para usos futuros.

Litologicamente o aquífero apresenta uma grande variação areal e em profundidade, uma vez que é constituído por sucessivas intercalações e lentes de diferente composição, numa matriz predominantemente argilosa. Esta matriz apresenta nas regiões marginais da bacia, níveis de argilas orgânicas e turfas, e em algumas zonas presença de seixos (Van Der Hammen, 1995). Apesar desta grande heterogeneidade litológica, é possível mencionar algumas características particulares na zona de estudo, como a predominância de camadas argilosas na parte superficial da bacia, assim como nas margens dos rios (Gaviria, 1998).

Figura 8. Espessura dos sedimentos Neógeno-Quaternários

Em profundidade, especialmente na zona SW da bacia, com o auxílio das colunas litológicas de poços, também foi possível identificar uma espessa camada de sedimentos argilosos, com relativa continuidade lateral (Figura 9).

A água deste aquífero é classificada como bicarbonatada-cálcica e bicarbonatada magnesiana, com má qualidade físico-química, devido à presença de elevada salinidade, sendo inclusive salobra em algumas zonas (Ingeominas, 1990). O aquífero é do tipo livre-coberto a confinado, às vezes suspenso, devido às variações litológicas que trazem como consequência uma grande variação nos seus parâmetros hidrogeológicos. Baseado em restritos testes de bombeamento, realizados por companhias consultoras e compilados por Ingeominas (1990), foram encontrados os seguintes dados: condutividade hidráulica de 0,4 a 4,5 m/dia, transmissividade de 5 a 20 m²/dia, coeficiente de armazenamento de 5×10^{-3} a $4,5 \times 10^{-5}$, capacidade específica de 0,108 a 0,72 m³/h/m.

presença de argila

Figura 9. Perfil a sul da bacia do rio Chicú, mostrando a continuidade lateral de sedimentos finos.

b. Aquífero Guadalupe

Este aquífero é constituído pelas rochas cretáceas do Grupo Guadalupe, formações Labor e Tierna, Plaeners e Arenisca Dura; formando as zonas montanhosas que circundam a bacia do rio Chicú, serranias de Tabio-Tenjo e Cota-Chía.

Litologicamente é constituído por uma seqüência de bancos grossos de quartzo-arenitos, intercalados com delgadas camadas de siltitos e argilitos. Na parte central existe uma dominância de camadas de argilitos e siltitos freqüentemente silicosos, compactos e com um forte grau de fraturamento, tipicamente romboédrico. Os níveis produtores de água correspondem principalmente aos arenitos das formações Arenisca Dura e Arenisca Labor y Tierna, que apresentam diferentes graus de compactação e dureza. A principal característica deste aquífero é seu alto grau de fissuramento como consequência dos diferentes processos tectônicos que deram origem à Cordilheira Oriental da Colômbia, podendo apresentar grandes diferenças nas características hidrogeológicas devido à combinação de porosidades primária e secundária representada por fissuras distribuídas muito irregularmente.

A espessura do Grupo Guadalupe alcança 900m, podendo aumentar substancialmente pela sucessiva repetição de seqüências geradas pelos sistemas de falhamento inverso (Figura 7).

Na zona de estudo este aquífero é captado geralmente por poços tubulares com profundidades superiores a 200m, localizados geralmente nas margens da bacia perto das zonas de afloramento. Freqüentemente estes poços são usados para o abastecimento público, como no caso do aqueduto de Tenjo, com regimes de exploração de aproximadamente 72 m³/h. A qualidade da água é em geral aceitável para o consumo humano, segundo as normas do Ministério da Saúde da Colômbia (1983).

O aquífero é do tipo confinado e seus parâmetros hidrogeológicos são bastante heterogêneos como resposta às variações litológicas e especialmente à forte anisotropia das fissuras. A condutividade hidráulica é da ordem de 1 a 3,5 m/dia, a transmissividade é de 50 a 270 m²/dia, o coeficiente de armazenamento de 4×10^{-4} e a capacidade específica entre 1,08 e 1,8 m³/h/m.

Um resumo das principais características hidrogeológicas das unidades da zona estudada, incluindo os cálculos sobre a recarga proveniente de precipitação e a descarga através das captações, é apresentado na Tabela 2.

2.4.2. Apresentação de Estudos Hidrogeológicos Anteriores

Devido à crescente importância que as águas subterrâneas apresentam na Sabana de Bogotá, têm-se desenvolvido numerosos trabalhos geológicos e

Tabela 2. Principais características das unidades aflorantes na zona de estudo

Unidades geológicas		Características litológicas Predominantes	Espessura Média	Propriedades aquíferas		Parâmetros hidráulicos
Dep. Coluviales	Depósitos de ladera, conformados por gravas, guijos e blocos de arenito com predomínio de matriz argilosa.	Desconhecida	AQUIFERO NÃO CONSOLIDADO	Aquífero de maior exploração na zona de estudo, com mais de 822 poços perfurados até 1992, embora seu baixo rendimento.	$Q/s = 0,03 - 0,2 \text{ l/s/m}$ $K = 0,4 - 4,5 \text{ m/dia}$ $T = 5 - 20 \text{ m}^2/\text{dia}$ $S(\text{est.}) = 5,5\text{e-}3 \text{ e } 4,5 \text{ e-}5$ $\text{Recarga} = 2,1 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{ano}$ $\text{Descarga} = 2,9 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{ano}$
Dep. aluviales	Argilas de inundação, localmente presença de silte fluvial e nas áreas pantanosas <u>argila lacustre</u> (orgânica e diatomitas)	Pouca espessura
Fm Sabana	Principal recheio da bacia constituído por argilas lacustres e em direção as margens incremento de argilas orgânicas, lignito(lenhito) e turfas, argilas arenosas e areias argilosas.	0- 780m Na zona de estudo de poucos metros m - > 500m
Fm Guaduas	Níveis de argilito cinza intercalados com níveis de arenito argiloso e silicoso, com moderada seleção, compactas, em bancos tabulares. Apresenta-se alguns bancos de carvão na parte inferior e media.	600-1000m Na área de estudo desconhecido.		Na sua parte média pode constituir aquíferos locais
Fm Labor y Tierna	Inf: Sucessão de quartzo-arenitos de grão fino, subarredondado, bem selecionado, em camadas grossas com níveis de siltitos de 2mm de espessura. Médio: sequência de siltitos cinza, laminados. Sup: Quartzo-arenitos de grão fino, cinza-amarelento, bem selecionadas, compactas, as vezes friáveis; em bancos muito grossos, de geometria tabular.	200-325m Na área de estudo aprox. 100m.	AQUIFERO GUADALUPE	Aquíferos de porosidade primaria e secundaria com bons rendimentos.	$Q/s = 0,3 - 0,5 \text{ l/s/m}$ $K = 1- 3,5 \text{ m/dia}$ $T = 50 - 270 \text{ m}^2/\text{dia}$ $S(\text{est.}) = 4,0\text{e-}4$ $\text{Recarga} = 6 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{ano}$ $\text{Descarga} = 2,1 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{ano}$
Fm Plaeners	Sucessão de camadas de argilitos e siltitos comumente silicosas, compactas de tonalidades cinza, com geometria tabular, estratificação delgada e laminação interna, intercaladas com bancos de quartzo-arenitos de grão fino, bem selecionadas e matriz argilosa.	60-160 m Na área de estudo aprox 120m.		Localmente podem constituir aquíferos pelo seu alto grau de fraturamento em rombos e por estar afetada por intenso falhamento na área de estudo
Fm Arenisca Dura	Sucessão de arenitos de quartzo, em camadas de 5cm a 8m, brancos a cinzas, de grão fino a médio, sub-arredondado, bem selecionado, compactos com cimentação silicosa. Intercalados com camadas delgadas (10cm) de siltitos silicosos e folhelhos com clivagem.	300-460m Na área de estudo segundo perfis geológicos Aprox 350m		Constitui aquíferos de bom rendimento nas regiões intensamente afetadas por falhas.
Fm. Chipaque	Argilitas e siltitos finamente laminados, ocasionalmente silicosos ou carbonáticos, da cor cinza à preta, em camadas de até 10m de espessura, intercalados com bancos de 5cm a 1m, de arenitos calcários, fossilíferos, e arenitos quartzosos de grão fino.	300-900m Na área de estudo aprox. 400m		Em termos gerais pode-se considerar como impermeável, embora localmente as camadas arenosas possam constituir aquíferos de baixo rendimento.	

hidrogeológicos, objetivando melhorar o conhecimento do sistema de circulação das águas subterrâneas e assim procurar a conservação da sua qualidade e quantidade. Neste texto serão mencionados apenas alguns dos estudos mais importantes, e cuja informação constituiu-se na base fundamental para o presente projeto.

Scheibe (1918) realizou um estudo sobre as "Fontes Quentes de Tabio", referindo-se às fontes termais localizadas na margem NE da Serrania de Tabio-Tenjo. No artigo apresenta uma descrição litológica das unidades aflorantes, e destaca a importância dos câmbios na inclinação das camadas da Formação Guaduas ao norte do Boqueirão do rio Frio (limite norte da bacia do Chicú). No seu trabalho, caracterizou as fontes termais desde o ponto de vista físico-químico e, baseado na sua experiência e observações feitas na Sabana de Bogotá, concluiu que estas águas deveriam ser juvenis e emanar desde profundidades superiores aos 2.000m, embora o autor mencione a importância de trabalhos detalhados que corroborassem essas hipóteses.

Diezemann (1959) executa um estudo que incluiu uma análise dos dados de precipitação média anual dos anos 1939 até 1942 e da capacidade de infiltração das diferentes unidades aflorantes na Sabana de Bogotá baseado nas observações de campo e em algumas análises da porosidade e absorção das rochas de ditas unidades. Com esta análise conclui que as propriedades dentro das mesmas unidades podem variar amplamente. O autor apresenta um cadastro de poços com informações como localização, profundidade aproximada e sistema de exploração, mas não apresenta dados quantitativos, como níveis potenciométricos, que permitissem avaliar o estado hidrogeológico da zona nesta época.

INGEOMINAS, tem realizado uma série de trabalhos hidrogeológicos na região, sendo o mais completo deles o estudo hidrogeológico quantitativo da Sabana de Bogotá, realizado entre 1989 e 1991. Este estudo compreendeu um levantamento hidrogeológico detalhado, incluindo mapeamento geológico, levantamento geofísico, cadastro completo de poços e as fases de hidrologia e hidroquímica. Como resultado foram classificadas as diferentes unidades aflorantes na bacia, de acordo com o seu potencial de armazenamento de água. Estas unidades foram caracterizadas hidroquímica e hidraulicamente e foi realizado o balanço hídrico, o cálculo da recarga proveniente da precipitação e da descarga por bombeamento de poços para cada unidade aquífera.

Lobo-Guerrero (1992) apresenta alguns exemplos dos rebaixamentos dos níveis da água subterrânea em poços da região ocidental da Sabana de Bogotá, afirmando que a taxa global é de 3 a 5m/ano. O autor menciona que a superexploração dos recursos hídricos subterrâneos são uma das causas da compactação e afundamento das camadas superficiais da Formação Sabana em alguns setores da bacia.

García e Martinez (1996) realizaram um estudo do comportamento dos níveis potenciométricos em três sub-bacias da Sabana de Bogotá, incluindo a do rio Chicú, as quais apresentam altas taxas de exploração do recurso hídrico subterrâneo. Na bacia do rio Chicú foram medidos mensalmente os níveis de 30 poços durante abril e dezembro de 1995. Como resultado, foram identificadas a tendência geral do fluxo das águas subterrâneas, as zonas de recarga e as zonas de rebaixamento das superfícies potenciométricas; que segundo os autores são causados por exploração intensiva (maior nas épocas secas) ou por interferência dos poços adjacentes. Foram também reconhecidos setores com recuperação de níveis, ou onde estes permanecem praticamente constantes, associados com mudanças nos regimes de exploração ou abandono de poços.

Medina & Prieto (1996) realizaram um estudo das redes de fluxo da água subterrânea na bacia do rio Chicú, identificando um padrão principal com sentido N-S. No estudo também foram apresentadas diversas hipóteses para explicar a origem das águas subterrâneas do aquífero neógeno-quadernário. Concluíram que são mínimos os aportes da precipitação e dos rios da região e identificaram a "Cienaga cubita", situada ao SW da bacia como uma das zonas de recarga do aquífero. Os aportes provenientes das unidades subjacentes, segundo os autores, são muito lentos, fato corroborado pelos resultados isotópicos da água de um poço, onde obteve-se uma idade de 112.000 anos. A salinidade da água da zona norte é explicada pela presença de águas termais ou fósseis.

Tem sido realizada uma série de estudos isotópicos procurando identificar as zonas de recarga e datar as águas subterrâneas, bem como medir as velocidades dos fluxos subterrâneos. Alguns estudos são mencionados a seguir :

Rodriguez & Jimenez (1986), baseados nos resultados de datações das águas subterrâneas com ^{14}C , concluem que sua infiltração ocorreu há milhares de anos, indicando taxas muito baixas de recarga. Segundo os autores isto confirma a hipótese de que a Sabana de Bogotá é uma bacia fechada, sem influência nem

efluência de água. Esta hipótese tem gerado diversas reações controvertidas entre os hidrogeólogos conhecedores da região. Torres *et al.* (1987) realizaram um estudo hidrogeológico dos aquíferos da Sabana de Bogotá, com uso dos isótopos estáveis ^{18}O , ^2H , ^3H e ^{14}C e com uso de radiotraçadores para a determinação de parâmetros hidrogeológicos e da velocidade horizontal do fluxo da água subterrânea. Neste estudo foram identificadas algumas zonas de infiltração e o rio Bogotá foi apontado como zona de descarga natural do aquífero. Segundo os autores as águas dos poços profundos provem da precipitação, infiltrada antes de 1953. Castrillón & Bermoudez (1999), baseados nos resultados preliminares do estudo isotópico da Sabana de Bogotá, que incluiu 93 análises de ^{18}O e ^3H (60 de precipitação), concluem que a recarga nas zonas com altitudes de até 3400m deve estar relacionada à precipitação e que a recarga lateral pode ocorrer entre os diferentes aquíferos ou através de falhas. Baseados nas análises químicas que acompanharam às isotópicas, sugerem que as fases bicarbonatadas sódicas encontradas devem estar relacionadas a zonas de fratura, mananciais minerais ou termais, e a acumulação de sódio deve ser o resultado da evaporação de sal nas antigas lagoas que constituíam a Sabana de Bogotá.

Alguns estudos que incluem a modelagem matemática tanto na Sabana de Bogotá quanto na zona de estudo, são os seguintes:

Molano (1988) realizou uma modelagem matemática na zona de Madrid, situada ao SW da Sabana de Bogotá, mediante um programa da sua autoria, por meio do qual foi possível reproduzir satisfatoriamente os níveis potenciométricos observados em campo.

Martinez & Hincapié (1991), realizaram uma modelagem numérica 2D, utilizando o programa WELL, que se baseia no método de diferenças finitas. O objetivo deste estudo foi precisar os parâmetros hidráulicos do aquífero Guadalupe, mais especificamente da Formação Arenisca de Labor y Tierna, na região de La Punta, situada ao SW da bacia do rio Chicú. Para o estudo foi construído um poço de 8" e 150m de profundidade e um poço existente foi utilizado como ponto de observação dos níveis da água subterrânea.

Martínez (1993) realizou uma modelagem matemática do fluxo da água subterrânea do aquífero quaternário, "Depósitos de Terraza Alta"(Qta)", na bacia do

rio Chicú, mediante o programa Modflow, versão 2.1, da U.S. Geological Survey. Neste estudo implementou-se uma rede de monitoramento dos níveis de água constituída por 38 poços rasos, cujos níveis foram medidos mensalmente durante aproximadamente um ano. O restante das informações necessárias para a construção do modelo, foi compilado de Ingeominas (1990). Com o modelo foi possível simular o comportamento do aquífero e fazer um ajuste dos parâmetros de entrada, como distribuição espacial do seu armazenamento e da recarga efetiva. Segundo o autor, a restrita informação sobre os níveis históricos e parâmetros hidráulicos do aquífero impediram fazer predições confiáveis do comportamento do mesmo.

IDEAM (2000), realizou uma modelação do fluxo de água subterrânea na área do Distrito Capital, Bogotá. O objetivo do trabalho foi o seu controle, mediante a criação de cenários simulados de exploração em estado estacionário e transiente, a determinação de reservas disponíveis e aproveitáveis, a determinação de setores com maiores possibilidades de aproveitamento e o prognóstico de impactos de exploração a grande escala. Como resultado do estudo conclui-se que, apesar de existir um grande armazenamento de águas subterrâneas na Sabana de Bogotá, a recarga é muito reduzida, a condutividade hidráulica e os coeficientes de armazenamento são em geral médios ou baixos, razão pela qual existem rebaixamentos pronunciados dos níveis potenciométricos. Os tempos de trânsito desde as zonas de recarga são da ordem de milhares de anos, fazendo com que se use água do próprio armazenamento do aquífero.

3. ASPECTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão tratados os principais aspectos teóricos que constituíram a base para a modelação matemática e para o gerenciamento de aquíferos.

3.1. CONCEITOS BÁSICOS DA MODELAGEM MATEMÁTICA

Na atualidade, os modelos matemáticos de fluxo e de transporte da água subterrânea são amplamente usados como ferramenta para a avaliação e o planejamento em estudos hidrogeológicos de diversos tipos. Isto ocorre devido a sua versatilidade para a criação de diversos cenários e à possibilidade de comparar resultados gerados a partir da mesma base de dados, permitindo avaliar a melhor resposta ao problema analisado.

Segundo Cleary (1998), uma modelação matemática é uma representação da realidade por meio de equações que simulam respostas para problemas físicos, em uma versão muito simplificada do que freqüentemente é um sistema complexo.

Existem diversos tipos de modelos de águas subterrâneas, entre os quais pode-se mencionar os seguintes (Spitz e Moreno, 1996):

- **Modelos analíticos:** Estes modelos, que obtêm respostas únicas para os problemas investigados, foram amplamente usados nas análises de testes de bombeamento, em simulações 2D, em estado estacionário de sistemas homogêneos, em simulações do fluxo de água subterrânea para poços e rios, assim como no transporte de massa e calor. A maior vantagem destes modelos é que são resolvidos rapidamente, com boas aproximações e a baixos custos, além de precisar de relativamente poucos dados para sua aplicação (Fetter, 2001).
- **Modelos físicos de meios porosos:** Estes modelos são realizados em laboratórios, onde o sistema hidrogeológico é representado a escalas apropriadas e com seus contornos hidrogeológicos incluídos. Na atualidade estes modelos são usados mais com fins didáticos, uma vez que foram substituídos por modelos numéricos.

- **Modelos de fluidos viscosos:** Estes modelos são baseados na analogia do movimento de fluidos viscosos, como a glicerina, entre duas placas paralelas bem próximas e o fluxo de águas subterrânea em duas dimensões.
- **Modelos de membrana:** Estes modelos usam a analogia entre a deformação da superfície das águas subterrâneas devida a exploração de poços e a deflexão de membranas delgadas mostrado pelo deslocamento vertical em pontos discretos.
- **Modelos análogos elétricos:** São modelos baseados na similaridade do fluxo de eletricidade e o fluxo da água subterrânea.
- **Modelos empíricos:** Estes são modelos que empregam representações dos processos físicos e químicos por meio de generalizações ou simplificações.
- **Modelos de balanço de massa:** Estes modelos realizam balanço de massa do fluxo de água subterrânea ou de solutos sobre grandes sistemas de água subterrânea.
- **Estocásticos ou de estimativa de probabilidade:** Estes modelos envolvem parâmetros estatísticos para suas previsões, por exemplo, a tendência de conjuntos de dados ou parâmetros; requerendo, portanto, de completas bases de dados para sua correta aplicação. Os resultados obtidos nestes modelos devem ser bem interpretados porque quantificam as incertezas inerentes às próprias características do meio (Cleary, 1998).
- **Modelos numéricos:** Os modelos numéricos basicamente representam um conjunto de modelos de células simples. As soluções obtidas nestes modelos são aproximações, podendo-se obter mais que uma resposta para os problemas analisados. Estes modelos são geralmente usados onde existem condições de contorno complexas ou onde os valores dos parâmetros variam espacialmente, como em aquíferos heterogêneos e anisotrópicos.

Os modelos matemáticos podem ser resolvidos em dois estados, estacionário e transiente. O primeiro é um estado de equilíbrio, onde se considera que não haja variação das cargas hidráulicas com o tempo. Já o segundo permite a variação de parâmetros com o tempo, como por exemplo, da recarga nos diferentes períodos do ano, etc.

As principais aplicações dos modelos matemáticos, segundo Spitz e Moreno (1996) e Cleary (1998), podem ser resumidas nos seguintes itens:

- Quando existem quantidades consideráveis de informações sobre o aquífero, os modelos matemáticos podem incrementar sua aplicabilidade, uma vez que permitem combinar as informações de campo, resumi-las e interpreta-las.
- Como ferramenta para a determinação de quanto e onde coletar novos dados de campo ou da utilidade dos dados preexistentes.
- Para avaliações e comparações de diferentes hipóteses desenvolvidas no modelo hidrogeológico conceitual com o auxílio do modelo matemático.
- Para o planejamento de atividades futuras, permitindo simular repostas do sistema de fluxo da água subterrânea em diferentes cenários.
- Para a solução de problemas de manejo de aquíferos, quando os modelos matemáticos podem prever mudanças nos níveis de água subterrânea por exploração ou variações climáticas sazonais.
- Para o delineamento de áreas de proteção de poços, sob condições de heterogeneidade e anisotropia.
- Para a solução de problemas de transporte de soluto, pois permitem ajudar a conhecer a extensão presente da pluma contaminante, assim como sua evolução histórica. Também podem auxiliar nos trabalhos de monitoramento ou na análise das alternativas de remediação.
- Para auxiliar na análise de problemas específicos das águas subterrâneas como a intrusão salina, subsidência, deslocamento de fluidos imiscíveis e transporte de solutos em meios fraturados, etc.

3.1.1. Equação Fundamental de Fluxo

A equação que é solucionada nos modelos matemáticos é a equação fundamental do fluxo, que teoricamente é aplicável tanto para aquíferos livres como confinados. Esta equação é formulada a partir da combinação do princípio de conservação de massa e da Lei de Darcy, para um Volume Elementar Representativo (VER) de um aquífero (Figura 10). Esta é uma equação diferencial parcial, transiente, tridimensional, para a distribuição de carga num aquífero heterogêneo e anisotrópico, em que o sistema de coordenadas de eixos coincide com as direções principais do tensor de condutividade hidráulica (Cleary, 1998). A seguir é apresentada a definição da fórmula.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) +/- W(x,y,z,t) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

H , é a carga hidráulica total, [L];

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} , são os componentes principais do tensor de condutividade hidráulica; [L/T];

W , representa as fontes ou sumidouros de água subterrânea, como poços, drenos; [1/T];

S_s , é o coeficiente de armazenamento específico, [1/L].

Figura 10. Fluxo de água em um volume elementar representativo de um aquífero.

$$\mathbf{q} = q_x \mathbf{i}_x + q_y \mathbf{i}_y + q_z \mathbf{i}_z$$

[1]

$\mathbf{q}$: vetor cuja magnitude pode ser expressa em termos de três componentes, q_x, q_y, q_z

$\mathbf{i}_x, \mathbf{i}_y, \mathbf{i}_z$: são unidades vetoriais ao longo dos eixos x, y e z

A equação do balanço de massa define:

Fluxo ingresso – Fluxo de saída	=	mudança no armazenamento em função do tempo
--	----------	--

Considerando o fluxo ao longo do eixo Y, no “**VER**”, o fluxo de ingresso ocorre na face $\Delta x \Delta z$ e é igual a $q_y (IN)$. O fluxo que sai é igual a $q_y (OUT)$.

$$[q_y (IN) - q_y (OUT)] \Delta x \Delta z$$

[2]

Esta expressão pode ser escrita como:

$$\frac{[q_y (IN) - q_y (OUT)]}{\Delta y} \Delta x \Delta y \Delta z$$

$$\Delta y$$

[3]

A mudança na taxa de fluxo no **VER**, ao longo do eixo Y é:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z$$

[4]

Expressões similares podem ser escritas para a mudança na taxa do fluxo ao longo dos eixos X e Y. A mudança total do fluxo é igual à mudança no armazenamento e é expressa como segue:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z = \text{mudança no armazenamento}$$

[5]

Analisando a possibilidade de fontes (+) ou sumidouros (-) de água dentro do **VER**, o fluxo de ingresso seria expresso por $W \Delta x \Delta y \Delta z$, e a equação seria:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - W \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{mudança no armazenamento}$$

[6]

Agora, considerando que a mudança no armazenamento é representada pelo coeficiente de armazenamento específico [S_s], que é definido como o volume de água que se libera do armazenamento por unidade de mudança na carga hidráulica (h), por unidade de volume do aquífero:

$$S_s = \frac{\Delta v}{\Delta h \cdot \Delta x \Delta y \Delta z}$$

[7]

Convencionalmente Δv é intrinsecamente positivo, quando Δh é negativo.

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad [8]$$

Combinando as equações 8 e 6 e dividindo por $\Delta x \Delta y \Delta z$, tem-se a equação do balanço de água:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} + W \quad [9]$$

Esta equação é de pouco uso, pois não se pode medir q diretamente. A Lei de Darcy é usada para definir a relação entre q e h , onde o potencial pode medir-se diretamente. A lei de Darcy em três dimensões é escrita da seguinte forma, quando as direções principais de anisotropia coincidem com a direção dos eixos x , y e z :

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

10]

Substituindo 10 em 9, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) +/- W = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

3.1.2. Condições de contorno e iniciais

Uma das mais importantes tarefas da modelagem matemática é a definição da área do modelo e suas condições de contorno. Estes limites representam a interface entre a área do modelo e o meio ambiente circundante, e sempre devem ser especificados no modelo a ser realizado (Spitz e Moreno, 1996).

As condições de contorno têm sido classificadas em três grandes tipos, descritos a seguir:

a. Condição de Contorno Tipo 1 ou Dirichlet

Condição de Carga Especificada. Esta é a condição mais comumente usada e pode ocorrer quando um corpo de água superficial interage livremente com o aquífero, neste caso assumi-se que o nível da água superficial é igual ao nível do aquífero. Na realidade é difícil encontrar na natureza um corpo de água superficial que atravessasse toda a espessura do aquífero ou esteja inteiramente conectado hidraulicamente com ele.

b. Condição de Contorno Tipo 2 ou Neuman

Condição de Fluxo Especificado. Dentro deste tipo encontra-se a condição de não fluxo ou fluxo zero, que pode representar um corpo impermeável ou refletivo ou uma barreira hidráulica, neste caso o fluxo de água será paralelo à condição especificada. Nas análises dos resultados do modelo, o não fluxo é idêntico a *streamlines* (Spitz e Moreno, 1996). Outro exemplo de fluxo zero é a presença de zonas de falhas impermeáveis, divisores de águas subterrâneas, a interface de água doce/salgada em aquíferos costeiros também pode ser usada como uma aproximação deste limite (Anderson e Woessner, 1992).

c. Condição de Contorno Tipo 3 ou Cauchy

Condição Mista ou de fluxo dependente da carga. Estes limites “semi-impermeáveis” são geralmente usados para representar superfícies de água, cujo intercâmbio com o aquífero depende das diferenças entre os níveis de água superficial e subterrânea. Tais condições podem ocorrer quando o leito do rio atua como uma membrana semi-impermeável entre o rio e o aquífero. Neste tipo de condição é introduzido o termo de “condutância” que representa a resistência ao fluxo entre o limite e o aquífero, e é expressa da seguinte forma:

$$c' = \frac{k}{d}$$

c' : condutância

K : condutividade do leito do rio

d : espessura do leito do rio.

d. Condições Iniciais

Estas condições, tanto para o estado estacionário quanto para o transiente, são um requerimento numérico e não físico do modelo matemático, que representa a distribuição de carga hidráulica conhecida em um determinado período de tempo, denominado $t = 0$, podendo ser usada alguma medição da superfície potenciométrica para este fim.

3.1.3. Principais Etapas Desenvolvidas na Modelagem Matemática

Considera-se que a primeira etapa é a definição dos propósitos da investigação e a certeza de que eles podem ser atingidos através da modelagem. Em termos gerais as etapas envolvidas no processo de modelagem podem-se resumir nos seguintes itens:

- Estabelecimento do modelo conceitual
- Aplicação do modelo matemático
- Solução
- Calibração
- Validação
- Predição
- Apresentação de resultados

Na Tabela 3, é apresentado um resumo das principais etapas da modelagem matemática e o tipo de informação requerida.

3.1.4. Características do Programa Modflow.

O programa Modflow (McDonalds e Harbaugh, 1984) simula o fluxo de água subterrânea usando um modelo tridimensional de diferenças finitas, onde o nó da célula, no qual as informações são posicionadas, está localizado no centro da célula, sendo por isto chamado de diferenças finitas centrado no bloco. As camadas podem ser simuladas como não-confinadas, confinadas ou uma combinação entre ambas; e é possível também simular fatores externos de estresse como fluxo devido a poços, a drenos, fluxo através dos leitos de rios, evapotranspiração e recarga areal.

Tabela 3. Protocolo da modelagem matemática

ETAPA	ELEMENTOS CHAVE	EXEMPLOS TIPO INFORMAÇÃO REQUERIDA
Definição do propósito	<ul style="list-style-type: none"> Entendimento do problema a resolver 	
Modelo Conceitual	<ul style="list-style-type: none"> Unidades hidro-estratigráficas Geometria Tipos de aquífero Parâmetros do aquífero Propriedades químicas Balço hídrico Níveis e sistema do fluxo Contornos hidrogeológicos 	Cadastro de poços, níveis estáticos e dinâmicos, provas de bombeamento, mapas topográficos, mapeamento geológico, geologia estrutural, fontes, levantamento geofísico, análises químicas, superficiais de água, dados de precipitação,
Modelagem Matemática	<ul style="list-style-type: none"> Modelo a ser usado Definição da grade Condições iniciais Condições de contorno 	Área de interesse, limites naturais (águas superficiais, limites geológicos, divisores de águas subterrâneas)
Calibração	<ul style="list-style-type: none"> Solução Vs. observação Ajuste de parâmetros 	Dados históricos
Análise sensibilidade	<ul style="list-style-type: none"> Elementos de estresse Efeito das incertezas na calibração do modelo 	
Validação	<ul style="list-style-type: none"> Testar modelo 	
Predição	<ul style="list-style-type: none"> Resposta a futuros eventos 	

Tabela elaborada com informações de Anderson e Woessner (1992) e Splitz e Moreno (1996).

O Modflow possui vários subprogramas para solucionar específicas condições de contorno (Fetter, 2001):

- **Drenos:** Atuam como sumidouros de água, são úteis para representar drenagens intermitentes ou que são afeitados por bombeamento de poços. Neste caso é usado o termo de condutância ou resistência ao fluxo do material na base do dreno, que considera a condutividade hidráulica deste material, a sua espessura, a sua largura e o comprimento da célula (Iritani, 1998).
- **Rios:** São limites dependentes do fluxo. Eles atuam como uma infinita fonte de água. Esta condição também usa a condutância do material da base do rio, que é calculada da mesma forma que para o dreno.
- **Recarga:** É a água proveniente da precipitação ou de irrigação adicionada a cada célula na camada superior do modelo.
- **Evapotranspiração:** É a água removida dependendo do nível da água subterrânea. A evapotranspiração cessa quando a célula seca.

- **Poços:** Podem ser de extração ou de injeção, sendo suas vazões negativas ou positivas respectivamente. Estão localizados no centro da célula.

O Modflow apresenta uma estrutura modular que consiste de uma série de sub-rotinas altamente independentes conhecidas como módulos. Estes módulos permitem ao usuário aplicar certas características do modelo hidrogeológico de forma independente em benefício dos objetivos particulares do seu estudo. Podem ser selecionados também diferentes métodos de solução, e ajustar os critérios de convergência dos mesmos. (Manual of Visual Modflow, 1995-2000 e Fetter, 2001):

- **SSOR** (Sucessive Slice Overrelaxation) é um método para solucionar grandes equações lineares por iterações, mas resulta muito lento sendo mais útil para modelos de seção vertical.
- **SIP** (Strongly Implicit Method) resolve simultâneas equações lineares por iteração. É um método muito estável, que geralmente tende a convergir, mas freqüentemente de forma lenta. Sempre deve ser checado o balanço de massa, porque os resultados podem ser enganosos.
- **PCG2** (Preconditioned-Conjugate Gradient Stabilized Method) é um método fácil, matematicamente muito completo, mas que pode falhar em sistemas muito complexos.
- **WHS Solver** faz parte da versão original do Modflow, e é um método de solução rápido e muito completo, mas que requer muita memória do computador para seu apropriado funcionamento.

O programa MODFLOW tem como premissas: fluxo saturado, meio poroso e temperatura e densidades uniformes, não sendo apropriado para simular fluxo multi-fase, fluxo na zona não saturada, em meio fraturado (a não ser que seja semelhante a um meio poroso), nem fluxo por diferença de densidade ou em aquíferos com condições variáveis de anisotropia (Fetter, 2001).

O **Visual MODFLOW**, utilizado na realização do presente trabalho, é um pré e pós-processador para o MODFLOW, MODPATH e MT3D, que foi desenhado visando facilitar a entrada de dados, tipicamente difícil nos modelos tridimensionais. Entre os muitos benefícios que caracterizam este programa podem-se mencionar os

seguintes: i) Permite adicionar os parâmetros graficamente e numa seqüência ordenada e lógica, ii) Permite importar mapas que ajudam na localização e entrada de alguns parâmetros, iii) Permite importar superfícies das diferentes camadas em arquivos gerados em programas compatíveis como SURFER e AUTOCAD, e iv) Conta com saídas gráficas, permitindo uma rápida visualização dos resultados.

Além disso, conta com recursos como o **WINPEST**, que é um modulo que auxilia na interpretação de dados e na calibração do modelo, já que permite otimizar certos parâmetros para obter a menor discrepância entre as cargas hidráulicas observadas e os simuladas, e o **VMOD 3D-Explorer** que facilita a visualização em 3D dos diferentes parâmetros do modelo e dos resultados.

3.2. PRINCÍPIOS DE GESTÃO DE AQÜÍFEROS.

Os recursos hídricos em conjunto são definidos por Moreira e Fuzeira (1992) como bens econômicos, finitos e vulneráveis, cuja gestão sustentável é um elemento fundamental para a conservação dos ecossistemas e a promoção da saúde e bem estar humano. O planejamento integral de sua utilização deve ser compatível com as políticas sociais, econômicas e ambientais da região estudada.

A proteção destes recursos reúne um conjunto de medidas que visam sua conservação em termos de **qualidade e quantidade**, permitindo uma exploração racional como fonte segura e confiável para o abastecimento de água potável (Foster *et al.*, 1992). Na figura 11, pode-se observar uma estratégia geral para a proteção das águas subterrâneas (Foster & Hirata, 1988).

3.2.1. Proteção dos recursos hídricos subterrâneos em termos de quantidade

Uma grande questão para exercer um adequado controle de aquíferos, é conhecer qual é a quantidade de água subterrânea que pode ser sustentavelmente explorada, já que depende de inúmeros fatores que incluem as características próprias do meio (magnitude da recarga, armazenamento, descarga natural, parâmetros hidráulicos que definem a capacidade de resposta do aquífero) e aspectos externos como número e localização de captações, proximidade de fontes

Figura 11. Elementos da avaliação, gestão e proteção dos recursos hídricos subterrâneos
Modificado de Foster. et. al. (1992)

/ potenciais de contaminação, aspectos sociais, econômicos e legais.

Em 1915, Lee introduziu o termo “vazão segura”, definindo-a como a quantidade de água que poderia ser bombeada regular ou permanentemente, sem causar danos nas reservas armazenadas no aquífero. A vazão segura era entendida como o balanço entre a recarga anual por precipitação e a água bombeada do aquífero. Não obstante este termo não considerava adequadamente a interação com outros aquíferos, os efeitos a longo prazo, nem danos causados ao meio ambiente (Custodio, 2001). Na década dos 80 foi desenvolvido o conceito de “sustentabilidade” ou seja a exploração dos recursos naturais, incluindo a água subterrânea que permita satisfazer as necessidades presentes sem comprometer sua capacidade futura (Custodio, 2001).

Nas regiões com exploração intensiva é comum aplicar o termo de “super-exploração” para designar os fatores negativos associados a uma exploração intensiva. No mesmo sentido, o termo é usado para designar a interferência entre poços, ou entre poços e corpos de água superficial, ou onde existam problemas de manejo inadequado do recurso. Segundo Custodio (2001), este termo é demasiado polemico e é freqüentemente usado como um qualificador da evolução inadequada de um aquífero sob certas ópticas particulares. Segundo o mesmo autor a super-exploração não indica necessariamente que a exploração é maior que a recarga, uma vez que pode ser o resultado da interferências ou do grande período transitório que segue às mudanças do balanço hídrico e cuja duração depende do tamanho do aquífero e do seu coeficiente de armazenamento. A super-exploração deve ser analisados desde muitos critérios incluindo os aspetos sociais e econômicos e de custo-benefício da extração. Deve também ser considerado o grau de evolução do aquífero, o fator tempo, o monitoramento e a quantificação dos efeitos negativos e a realização de balanços de água reais de curto e longo prazo (Custodio, 2001)

3.2.2. Proteção dos Recursos Hídricos Subterrâneos em Termos de Qualidade

Este aspeto refere-se ao controle da contaminação das águas subterrâneas. Este é um aspecto fundamental da proteção de aquíferos, já que são inúmeras as atividades que podem gerar cargas contaminantes que, contando com meios

eficientes de transporte, podem atingir os aquíferos e degradar sua qualidade até limites irreversíveis.

Neste sentido têm-se desenvolvido estratégias focalizadas tanto na proteção do aquífero a nível regional, quanto das captações de águas subterrâneas. No primeiro caso, a ferramenta básica é o zoneamento do terreno com relação a sua "acessibilidade hidráulica" e a sua capacidade de atenuação da carga contaminante (**vulnerabilidade**), permitindo identificar as áreas prioritárias, menos protegidas naturalmente, onde se devem controlar com maior rigidez ou restringir as atividades potencialmente contaminantes (Foster e Hirata, 1988). O segundo caso é baseado na delimitação das **zonas de captura** dos poços e seus **perímetros de proteção**, com o objetivo de controlar as atividades realizadas nas suas zonas de recarga. Na prática, a área de captura por ser geralmente muito extensa e impossível de controlar, é dividida em 2 ou 3 zonas, tendo como critérios uma distância horizontal a partir do poço, um tempo de fluxo horizontal, uma porção da zona de recarga, a capacidade de diluição da zona saturada ou a capacidade de atenuação. (Foster *et al.* 1992).

Comumente se delimitam as seguintes zonas: i) Área de operação; esta zona tem de 20m a 30m de diâmetro ao redor do poço; ii) Zona interior de proteção, estabelecida com o objetivo de proteger o aquífero de organismos patogênicos; sua definição é baseada em uma distância equivalente a um tempo de fluxo horizontal específico, que pode variar entre 10 e 400 dias, mas freqüentemente é de 50 dias; e iii) Zona exterior de proteção (definida para fontes de contaminação pontual ou difusa), esta zona é delimitada com uma porcentagem fixa da área de recarga total ou por um tempo de fluxo horizontal ao poço ou manancial (Foster *et al.* 1992).

Uma estratégia global para a proteção da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos inclui, além da definição dos PPP e da cartografia da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos, o reconhecimento e classificação das atividades potencialmente contaminantes e consequentemente da definição do perigo de contaminação das águas subterrâneas. Uma ampla discussão sobre estes temas pode ser encontrada em textos como: Foster *et al.* (1992), Hirata e Rebouças (1999), entre outros.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto de pesquisa incluiu as fases de: i) Preparação de dados para revisão e formulação do modelo hidrogeológico conceitual, ii) Modelagem matemática do fluxo da água subterrânea com todas as suas sub-etapas e finalmente; iii) Aplicação dos resultados obtidos mediante a apresentação de uma proposta de gerenciamento do recurso hídrico subterrâneo.

Neste capítulo serão abordadas apenas as metodologias utilizadas na preparação e análise preliminar das informações a serem utilizadas nas etapas posteriores, cujos resultados serão descritos no capítulo seguinte.

Na Figura 12, é mostrado o método global utilizado na realização do projeto. As diferentes etapas realizadas serão descritas detalhadamente na sequência.

4.1. MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEITUAL

Esta etapa foi considerada a mais importante do projeto, já que seus resultados nortearam a construção do modelo numérico do fluxo da água subterrânea e por extensão das recomendações sobre a gestão dos recursos hídricos na bacia.

Em termos gerais esta etapa incluiu a compilação, revisão e análise das diferentes informações geológica, hidrológica e hidrogeológica disponíveis da área. As principais atividades desenvolvidas foram:

4.1.1. Compilação de informação

Foram consultados estudos realizados por instituições que pesquisam e regulam as águas subterrâneas na Colômbia, tais como o Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS), a Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) e o Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), sobre os seguintes aspectos, fundamentais para o entendimento dos sistemas aquíferos da bacia:

- **Geometria do aquífero:** Este foi um dos aspectos mais difíceis de abordar dentro do projeto, devido tanto à complexidade da geologia e arcabouço estrutural, quanto à existência de diversos modelos, por diferentes autores, às

Figura 12. Metodologia geral utilizada no projeto

Figura 12. Metodologia geral utilizada no projeto

vezes contraditórios, impossíveis de serem corroborados com o grau atual do conhecimento. Dentro dos estudos analisados encontram-se Acosta *et al.* (1997); Caro *et al.* (1996) e Velandia (2000).

- **Parâmetros hídricos e hidrogeológicos:** O Estudo hidrogeológico quantitativo da bacia do rio Chicú (Ingeominas, 1990), constitui-se na principal fonte de informação sobre os parâmetros hidrogeológicos, uma vez que é o mais completo da zona. Foram consultados também alguns artigos hidrogeológicos sobre a Sabana de Bogotá e a zona de estudo. Deve-se notar que este é um ponto onde se apresenta deficiência de informação, já que se conta com poucos testes de bombeamento dos aquíferos na região.

4.1.2. Modelo de circulação das águas subterrâneas e variação dos níveis potenciométricos.

Esta fase objetivou conhecer o sistema de fluxo e a variação dos níveis da água subterrânea nas últimas décadas, para o qual foram consultados quatro estudos hidrogeológicos: i) Estudo hidrogeológico quantitativo da bacia do rio Chicú (Ingeominas, 1990), no qual realizaram-se campanhas de medição de níveis entre fevereiro-junho de 1990 e março-maio de 1992; ii) Modelagem numérica da Bacia do Rio Chicú (Martinez, 1993), no qual realizaram-se medições mensais do nível estático nos meses de abril a dezembro de 1991 e de fevereiro a julho de 1992, iii) Estudo dos níveis piezométricos dos aquíferos de três bacias hidrográficas da Sabana de Bogotá (García e Martinez, 1996). Neste estudo realizaram-se medições mensais dos níveis estáticos em 29 poços entre março e novembro de 1995, e iv) Estudo dos níveis estáticos da água subterrânea na Sabana de Bogotá, realizado por Beltran *et al.* (1999) para a CAR. Neste estudo apresentam-se medições do nível da água nos meses de julho, agosto, setembro e novembro de 1998 e março de 1999.

4.1.3. Verificação e análise de informação sobre pontos de água

O principal objetivo desta fase foi realizar uma seleção dos poços e outros pontos de água que apresentarem informação técnica confiável e fossem representativos das unidades aquíferas da região, para serem utilizados nas etapas posteriores, criação do modelo conceitual e a modelagem matemática. Os critérios de seleção de dados foram:

- Existência de informação que permitisse identificar o aquífero captado pelos poços. Para isto foram observados aspectos como localização espacial, desenho construtivo do poço, coluna litológica, níveis estáticos e dinâmicos, vazões e regimes de exploração. Como resultado deste processo, de um total de mais de 800 poços analisados, foram pré-selecionados apenas 100 que apresentaram algum tipo de informação.
- Confiabilidade dos dados. Para isto foram integradas e comparadas as diversas informações de cada poço pré-selecionado. Neste processo foram encontradas demasiadas inconsistências nos estudos consultados; os erros mais freqüentes estavam relacionados com a localização espacial, a nivelção dos poços (em alguns casos superou os 100m), níveis estáticos incompatíveis, diferenças nos dados técnicos como coluna litológica, desenho construtivo, e diferenças nas fichas de cadastro dos poços. No Anexo 1, é apresentado um resumo das principais inconsistências encontradas e em alguns casos foi discutida a possível causa destes erros.
- Critério de distribuição espacial dos dados. Esta atividade teve como objetivo selecionar os poços mais representativos em áreas com elevada densidade de informação e procurar dados nas áreas com deficiente cobertura de poços. Neste último caso foram utilizados poços que não reuniram suficiente informação, mas foi possível deduzi-la com auxílio de dados complementares.

4.1.4. Análise dos níveis potenciométricos e do sistema de circulação das águas subterrâneas

Inicialmente realizou-se uma análise dos dados do nível da água apresentados nos estudos dos anos 1990, 1991-1992, 1995 e 1998-1999, baseados numa estatística simples, que permitiu identificar rapidamente os valores “anômalos”. Nestes poços foi analisada a informação sobre a profundidade, a localização dos filtros, o aquífero captado, a vazão de exploração, o uso diário e ano de construção dos poços. Procurou-se identificar as fontes de erro e/ou as verdadeiras causas da variação dos níveis (Anexo 2).

Posteriormente, foi realizada uma análise geoestatística para observar a tendência dos dados e seu grau de correlação espacial, que em geral mostrou ser satisfatório.

Os dados fornecidos pela análise geoestatística foram utilizados para a construção de mapas equipotenciais para as diferentes épocas analisadas, mediante a interpolação de níveis potenciométricos com auxílio do módulo de krigagem do programa Surfer (Golden Software, versão 7). Com estes mapas foi possível reconhecer o sistema de fluxo e identificar setores com variações importantes dos níveis.

Os gráficos de nível vs. tempo de cada época analisada permitiram quantificar as variações individuais dos níveis de alguns poços e comparar estas variações em grupos de poços localizados em setores específicos.

4.1.5. Seleção de parâmetros para a modelagem matemática

Frente à deficiência de informação sobre parâmetros hidráulicos tentou-se estima-los de forma indireta, através de sua capacidade específica (Q/s) que é um dado encontrado com muita mais frequência. Com este propósito foram construídos gráficos de capacidade específica (Q/s) vs. transmissividade (T) ou vs. condutividade hidráulica (K). No Anexo 3. Podem ser vistos os dados de testes de bombeamento compilados.

4.2. MODELAGEM NUMÉRICA DO FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA.

A fase de modelagem matemática compreendeu as seguintes atividades:

- Preparação da informação técnica necessária, nos formatos aceitos pelo programa de modelagem matemática, Visual Modflow, da Waterloo Hydrogeologic Inc, versão pré e pós-processamento do código numérico desenvolvido pelo US Geological Survey.
- Preparação de mapas temáticos, incluindo mapa base com corpos de água superficial, topográfico, geológico, de localização de poços e perfis geológicos da zona.
- Análises de sensibilidade preliminares para a definição da área de domínio do modelo, número de camadas e profundidade de análise do sistema aquífero.
- Construção do modelo numérico para a bacia do rio Chicú

- Calibração do modelo numérico em 3D.
- Testes de sensibilidade dos parâmetros
- Resultados do modelo matemático
- Aplicação do modelo matemático na criação de cenários de exploração.

A seguir apresenta-se uma descrição detalhada das etapas desenvolvidas nesta fase.

4.2.1. Preparação da informação técnica

Toda a informação técnica analisada na fase anterior foi colocada numa base de dados em Microsoft Excel para facilitar sua posterior utilização e vincular as informações de diferentes parâmetros para um mesmo ponto de água.

4.2.2. Geração de Camadas

- **Mapa Base.** Este mapa mostra a localização de poços, o sistema de drenagem e os corpos de água superficial, além das estradas, curvas topográficas e centros urbanos na zona de estudo.
- **Topografia.** Foram digitalizadas as curvas topográficas das folhas do Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), na escala 1:25000 (227-II-B, 227-II-C, 227-II-D, 228-I-A, 228-I-C e 228-II-A), com o auxílio do programa AutoCAD Release 14. Para melhorar a informação das zonas planas (com altitude inferior aos 2600msnm), foram utilizados os dados de pontos gravimétricos, estereoscópicos, de triangulação e de nivelção topográfica; além dos próprios poços nivelados. Estes dados foram interpolados no programa SURFER, versão 7,0 da Golden Software Inc., e colocados em arquivos *.GRD ou *.TXT que posteriormente foram reconhecidos pelo programa Visual MODFLOW for Windows, Versão 2.5 da Waterloo Hydrogeology Inc.
- **Espessura do Aquífero Neógeno-Quaternário.** Para a definição da espessura deste aquífero, foi usada a re-interpretação da informação geológica de poços e de geofísica, realizada por Ingeominas (2000). Na zona de estudo esta informação foi complementada com algumas colunas litológicas de poços.
- **Geometria dos aquitardes e do Aquífero Guadalupe.** Para a definição da continuidade lateral das camadas que infrajazem o Aquífero Neógeno-Quaternário (Formação Guaduas e/ou Grupo Guadalupe), foram construídas

uma série de 12 perfis geológicos esquemáticos e cinco mapas de distribuição de unidades geológicas a diferentes profundidades, baseados nas informações estruturais de superfície da carta geológica 227 (Ingeominas, 1990), mapa geológico do Cuadrángulo Zipaquira-K11 (McLaughlin, 1975) e o modelo estrutural de Velandia (2000) (Figura 5).

4.2.3. Análises preliminares de sensibilidade

Foram realizadas várias análises de sensibilidade antes da montagem do modelo matemático, com o objetivo de definir a área de domínio do aquífero que melhor representasse as complexas relações hidrogeológicas dos aquíferos Neógeno-Quaternário e Guadalupe (Anexo 4).

Com estes testes, tentou-se estimar o tempo necessário para a ocorrência de aportes significativos desde o Aquífero Guadalupe para o Neógeno-quaternário, partindo da premissa da existência de potencial hidráulico para fluxos ascendentes desde o aquífero profundo, como foi reconhecido por Hirata (1998). Foram também testadas variáveis como a profundidade do modelo, o número de camadas e sua espessura.

As áreas de domínio testadas foram as seguintes (Figura 13):

- Bacia do rio Chicú, tendo como contornos laterais as divisórias de águas superficiais nas partes altas das serranias adjacentes.
- Bacia do rio Chicú, ampliada ao leste até o rio Bogotá, neste caso foi usado este último como contorno de tipo 1.
- Bacia do rio Chicú, ampliada ao oeste até o rio Subachoque, neste modelo foi utilizado o rio Subachoque como contorno tipo 1.
- Bacia do rio Chicú, ampliada ao oeste e leste até os rios Subachoque e Bogotá, respectivamente.

Para a realização dos testes de sensibilidade, o procedimento seguido incluiu a seleção do perfil geológico mais representativo, que posteriormente foi desenhado no Visual Modflow usando cada unidade estratigráfica como camada de diferente condutividade hidráulica. Posteriormente o perfil foi copiado “n” número de vezes, até conseguir uma área representativa, com objetivo de obter um modelo quase 3D, com a simplicidade de um modelo 2D. A seguir foram adicionadas todas as

(A)

(C)

- (A) Simulação incluindo o rio Subachoque
 (B) Simulação incluindo o rio Bogotá
 (C) Simulação incluindo os dois rios
 (D) Simulação na bacia do rio Chicú;

(B)

(D)

- Célula inativa
Celula seca
Zbudget(NgQ)
Fluxo d'água subterrânea

Figura 13. Testes preliminares de sensibilidade.

variáveis, como poços de bombeamento, recarga, contornos hidrogeológicos de carga conhecida, etc. Desta forma foram testados vários conjuntos de variáveis e contornos hidrogeológicos. Em todos os casos, os contornos norte e sul foram definidos com os níveis estáticos dos poços mais próximos.

Alguns exemplos dos resultados obtidos com estes testes podem ser vistos no Anexo 4.

4.2.4 Criação do Modelo Matemático

Neste item, serão apenas mencionadas as fases envolvidas na criação do modelo matemático, já que seus resultados serão amplamente discutidos no próximo capítulo.

Na construção do modelo matemático, de forma geral, foi seguido o protocolo apresentado no capítulo 3, Tabela 3:

- Discretização da malha, a qual inicialmente foi dividida de forma regular e posteriormente refinada nas zonas de interesse. Na discretização vertical foi definido um número de camadas apropriadas para facilitar o desenho manual da geometria do aquífero
- Entrada de Parâmetros: Condutividade hidráulica, recarga, poços de observação e poços de bombeamento.
- Definição das condições de contorno do modelo: Identificação das condições físicas que limitam a zona de domínio.
- Calibração do modelo: Realizada em duas situações, com e sem bombeamento
- Análise de sensibilidade: Realizada para os principais parâmetros, com o objetivo de verificar seu grau de influência nos resultados do modelo
- Criação de alguns cenários de exploração das águas subterrâneas e delimitação das zonas de captura dos principais poços, para determinar a potencialidade do modelo no gerenciamento de aquíferos.

5. RESULTADOS

5.1. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

Depois de terem sido descritas as características hidrogeológicas básicas dos principais sistemas aquíferos da zona de estudo no capítulo 3, neste item só serão discutidos alguns aspectos que mereceram um tratamento especial dentro do presente trabalho.

5.2.2. Geometria dos aquíferos

Este foi um dos aspectos mais sensíveis dentro da construção do modelo hidrogeológico conceitual da área de estudo, uma vez que é uma resposta direta das características particularmente complexas da zona, onde sedimentos plioceno-quadernários, bastante heterogêneos, preencheram uma pré-bacia tectônica irregular, constituída por rochas marinhas cretáceo-paleógenas, fortemente afetadas por falhas inversas, e que descansam sobre um embasamento de rochas metamórficas de idade paleozóica-mesozóica inferior.

Para a construção de modelo 3D, foram utilizadas tanto as re-interpretações de dados geofísicos (Ingeominas 2000), quanto a criação de novos perfis e mapas de distribuição de unidades a diferentes profundidades, baseados na informação geológica de superfície. Como resultado destes processos foram identificadas algumas características especiais, como as mencionadas a seguir:

- A Formação Guaduas, nas bacias dos rios Chicú e Bogotá, encontram-se imediatamente abaixo dos sedimentos neógeno-quadernários, apresentando uma geometria tabular e um baixo ângulo de inclinação. Na região sul, aparece somente nas proximidades da Serrania de Cota-Chía, uma vez que o Sinclinal do rio Frio, do qual faz parte, é cortado por este sistema montanhoso (segundo Acosta e Ulloa, 1997) e exibe somente seu flanco oeste.
- As rochas dos grupos Guadalupe e Villeta, na Serrania de Cota-Chía, constituem um anticlinal, invertido na zona sul, que é cortado ao oeste por falhas inversas.
- No setor sul da Serrania de Tabio-Tenjo, os dois flancos do “*Antiformal Stack*” apresentam falhamentos que repetem seqüências do Grupo Guadalupe. As

regiões centro e norte, estão limitadas por falhas inversas com planos de inclinação ao oeste, no flanco oriental e ao leste, no flanco ocidental. Neste caso há também repetição de seqüências do Grupo Guadalupe.

- O embasamento da zona, constituído pelas rochas do Grupo Villeta, apresenta uma configuração bastante irregular, devido a que é constantemente deslocado por falhas inversas e posto em contato com as rochas do Grupo Guadalupe. Este embasamento em profundidade parece dominar os núcleos das serranias, enquanto o Grupo Guadalupe começa a prevalecer na zona central, ocupada superficialmente pelos sedimentos neógeno-quaternários.

5.2.3. Comportamento dos níveis potenciométricos.

Uma das maiores deficiências dos estudos hidrogeológicos realizados na região é a ausência de dados quantitativos e históricos que permitam certificar as diversas hipóteses apresentadas sobre os efeitos do uso descontrolado dos recursos hídricos subterrâneos. Neste sentido, foi aproveitada a informação compilada para quantificar os rebaixamentos dos níveis na última década e para a identificação dos setores com problemas de exploração das águas subterrâneas, como descrito a seguir.

Inicialmente, foram identificadas zonas com rebaixamento constante dos níveis potenciométricos, com o auxílio dos diferentes mapas potenciométricos realizados em várias datas. Para confeccionar estes mapas foi realizada uma análise geoestatística dos dados, com o objetivo de conhecer seu grau de correlação e distâncias máximas de interpolação (ver figuras 14 e 15), encontrando-se os seguintes resultados:

- De acordo com o variograma experimental ajustado, os dados de nível estático apresentam um comportamento anisotrópico com uma maior correlação na direção 150 graus (azimute) e menor correlação com azimute de 60 graus (Figura 14).
- A amplitude máxima de correlação encontrada foi de 3.450 metros e a mínima de 1.250 metros.
- A interpolação por krigagem permitiu observar uma diminuição gradual do nível estático na direção N-S, indicando a tendência do fluxo de água subterrânea neste sentido (Figura 15).

Azimute 150 cor preta, azimuth 60 cor verde.

Figura 14. Variograma experimental dos dados de níveis estáticos para a década de 90.

Figura 15. Blocos de interpolação por krigagem, dos valores médios do nível estático.

- O gráfico do “desvio padrão de interpolação” mostra valores altos em setores isolados ao sul, na parte centro-leste e ao norte; o que pode indicar que o modelo de variograma não aplica-se à totalidade da zona.
- O gráfico de “desvio padrão de Krigagem” apresenta valores altos em setores ao sul e nas bordas SE e NW da bacia, coincidindo com os poucos poços nestas regiões.

Estes aspetos foram levados em consideração na realização dos mapas potenciométricos, nos quais pode-se observar que a Vereda El Estanco, localizada ao sul do município de Tenjo, apresentou os maiores rebaixamentos da zona. Outras zonas com rebaixamentos constantes localizam-se na flanco W da Serrania Tabio-Tenjo, ao sul do município de Tenjo e na Vereda Carrasquilla a SW da bacia. Os mapas potenciométricos para o período 1991-1992 e para a década do 90, apresentam-se nas Figuras 16 e 17.

Com respeito ao tempo, pode-se observar que a variação individual dos níveis no período 1991-1992, foi geralmente inferior aos 5 m (Figura 18a); já para toda a década do 90, os níveis se apresentam em geral rebaixamentos inferiores a 10m (Figura 19a). A localização dos poços incluídos nestas análises é apresentada nas Figuras 18a e 19a.

Para as zonas de maior rebaixamento, procurou-se analisar preliminarmente as possíveis causas desta situação. Observaram-se os parâmetros de densidade de poços, profundidade dos mesmos, suas vazões de exploração e horas de uso diário (Figura 20).

Na Vereda El Estanco, a densidade de poços pode chegar a 23 por km². Isto parece ser a causa dominante dos rebaixamentos dos níveis, apesar de que as vazões exploradas sejam pequenas, da ordem de 20 m³/h. Em outras regiões, como no flanco leste da Serrania Tabio-Tenjo, os rebaixamentos dos níveis são mais locais e parecem ser o resultado de altas vazões de exploração ou possivelmente de variações locais nos parâmetros hidráulicas, ou mesmo falhas que influenciam as captações (variáveis não analisadas neste estudo) .

figura 16. Mapa potenciométrico para os anos 1991-1992

A faixa de variação dos níveis potenciométricos do aquífero Neógeno-Quaternário da Bacia do Rio Chicú, entre os anos 1991 e 1992, é em geral inferior a 5 m. (dados de Martinez, 1993)

Os valores dos níveis acompanham de modo geral as variações da topografia, p.ex. os valores superiores pertencem aos poços localizados a norte da bacia e os inferiores aos poços do sul.

(a)

(b)

Figura 18 a. Variação dos níveis potenciométricos (1991 e 1992)

Figura 18 b. Localização dos poços analisados

Note-se que a variação dos níveis potenciométricos, pertencentes aos poços com melhor registro na década do 90, é geralmente inferior aos 10 m, exceto no poço 227-II-D-084, onde foi de mais de 30 m.

(a)

(b)

Figura 19 a. Variação dos níveis potenciométricos na década do 90
Figura 19 b. Localização dos poços analisados

Figura 20. Análise das possíveis causas dos rebaixamentos dos níveis potenciométricos

Uma conclusão importante desta análise é a quantificação dos rebaixamentos dos níveis que em termos gerais foram inferiores aos 10m, a exceção do poço 227-II-D-084, localizado na margem SW da bacia que apresentou uma diminuição de 30 m entre 1991 e 1999. Mas deve ser levado em consideração que os dados disponíveis podem não ser representativos da totalidade da área analisada e condições particulares podem ocorrer.

5.2.4. Sistema de circulação das águas subterrâneas.

O fluxo das águas subterrâneas na bacia do rio Chicú, como mostrado nos diferentes mapas potenciométricos realizados, tem uma tendência principal norte-sul e desde as margens das serras, principalmente a leste, para a parte central, seguindo grosseiramente a direção do sistema de drenagem superficial. Deste modo evidencia-se uma componente de fluxo lateral indicando possível recarga desde as formações cretáceas, localizadas nas margens das zonas montanhosas, especialmente a leste. A zona de descarga, segundo estes mapas, está associada à região sul da bacia e à desembocadura do rio Chicú no rio Bogotá, como é apresentado nas Figuras 16 e 17, correspondente ao período 1991-1992 e década do 90, respectivamente.

5.2.5. Relação hidráulica dos sistemas aquíferos.

Existem algumas características que fazem pensar na existência de uma componente vertical do fluxo ou de potencial hidráulico, desde o aquífero profundo ao superficial: i) Na bacia do rio Chicú a continuidade lateral das unidades terciárias que “separam” os sistemas aquíferos superficial e profundo, não é constante, permitindo o contato direto destes aquíferos, especialmente na parte SW da bacia, ii) Segundo os dados de Ingeominas (1990), em décadas passadas, existiam poços surgentes na área de estudo, indicando um potencial hidráulico para fluxos ascendentes desde o Guadalupe, iii) Na atualidade, apesar de não se apresentarem níveis surgentes, os níveis potenciométricos de ambos os aquíferos, mostram uma grande similaridade, e iv) Estes fatos são reforçados com a presença de fontes termais no município de Tabio, localizadas perto da margem NW da bacia, associadas aos sistemas de falhas, não sendo identificada ainda a proveniência das mesmas.

5.2.6. Parâmetros Hidráulicos

Na zona de estudo existem poucas informações sobre os parâmetros hidráulicos, o que faz com que sejam generalizados os dados para toda a zona de estudo. Com esta premissa, tentou-se estimar a transmissividade e a condutividade hidráulica, baseados em dados mais comuns na zona de estudo, como o rendimento específico dos poços.

Embora os resultados destes testes não tenham sido conclusivos, pode-se observar que as transmissividades são geralmente muito maiores para os poços que captam o Aquífero Guadalupe. Para os poços do Aquífero Neógeno-Quaternário independentemente ou misturado com o aquífero Guadalupe, as transmissividades são muito similares (Figura 21).

No modelo hidrogeológico conceitual apresentado, existem uma série de questionamentos relacionados ao sistema de fluxo, a existência de aportes laterais, a quantidade de água que passa por baixo dos sistemas montanhosos e chega à bacia do Chicú desde as bacias adjacentes, o quanto de água da descarga natural dos aquíferos é desviada pelo bombeamento intensivo. Estas foram algumas das razões pelas quais se optou pela modelagem matemática, que proporciona ferramentas para entender melhor o sistema.

5.2 MODELAÇÃO NUMÉRICA DO FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEA

No modelo hidrogeológico conceitual da bacia do rio Chicú, foram definidos os principais questionamentos a serem melhor analisados mediante a modelagem matemática. Entre outras se relacionam: a existência de fluxos ascendentes desde as unidades mais profundas; ou o possível aporte lateral desde as bacias adjacentes já que aparentemente existem as condições hidráulicas para tal fim, e também os efeitos da exploração tanto a nível local, quanto regional.

5.2.1. Discretização da área

A área de estudo que compreendeu inicialmente a bacia hidrográfica do rio Chicú foi ampliada lateralmente até atingir os limites físicos mais próximos, o rio

Figura 21. Transmissividade versus capacidade específica dos poços.

Subachoque a W e o rio Bogotá a E, como definido mediante os testes preliminares de sensibilidade, já discutidos. Também se considerou importante incluir o rio Bogotá, já que ele constitui a principal área de descarga natural da Sabana de Bogotá.

Com esse domínio, os novos limites da área correspondem às coordenadas UTM's com origem Bogotá: X_1 : 978.000 m, X_2 : 1.009.000 m, Y_1 : 1.017.000 m e Y_2 : 1.040.000 m.

No modelo matemático a área de domínio, onde posteriormente foram colocadas todas as informações, foi delimitada mediante células inativas como mostrado na Figura 22 a. Neste domínio, foi desenhada uma malha regular com espaçamento Δx e Δy de 250 m, e posteriormente foi feita uma discretização nas áreas de interesse: nas adjacências de poços de abastecimento público e na zona com maior densidade de poços e rebaixamento constante de níveis. Nestas zonas a malha foi subdividida 4 vezes, com Δx , Δy iguais a 62.5 m, totalizando 167 linhas e 178 colunas.

Com relação à profundidade máxima do modelo, foi selecionada a cota 1500 msnm, como sugerido nos testes preliminares de sensibilidade. Foram definidas 11 camadas, visando facilitar a construção do modelo em 3D, que conta com um alto

grau de complexidade. O z foi um pouco menor nas primeiras camadas, considerando que nelas se concentram as informações hidrogeológicas disponíveis, pela escassa profundidade dos poços que geralmente é inferior aos 100 m (Figura 22 b).

5.2.2. Parâmetros de entrada do modelo

a. Condutividade Hidráulica

As unidades geológicas foram consideradas unidades hidráulicas. Sua geometria foi definida com o auxílio de perfis geológicos, construídos a partir das informações de superfície e sondagens elétricas. Estes últimos de especial importância na determinação da espessura dos sedimentos recentes como o Aqüífero Neógeno-Quaternário (capítulo 4). As condutividades hidráulicas destas unidades foram definidas a partir dos testes de bombeamento disponíveis, cujos resultados apresentam-se no Anexo 3.

Os valores iniciais de condutividade hidráulica, corresponderam aos valores médios encontrados nesses testes de bombeamento (Tabela 4). Foi assumida uma isotropia nos vetores K_x , K_y e o vetor K_z foi considerado com uma ordem de magnitude inferior em todos os casos. A distribuição deste parâmetro na área de estudo, pode se ver na Figura 23.

Tabela 4. Condutividades hidráulicas iniciais.

Unidades	K_x (m/dia)			K_y (m/dia)			K_z (m/dia)		
	min.	max.	med.	min.	max.	med.	Min.	max.	med.
D. Neógeno-quaternário (NgQ)	0.4	4.5	2.7	0.4	4.5	2.7	0.04	0.45	0.27
Formação Guaduas (KTg)	0.008	0.01	0.054	0.008	0.01	0.054	0.008	0.001	0.0054
Grupo Guadalué (Ksg)	0.3	3.5	1.9	0.3	3.5	1.9	0.3	0.35	0.19
Formação Chipaque (Ksch)			0.0001			0.0001			0.00001

Figura 22: (a) Discretização horizontal da malha; (b) Discretização vertical da malha.

Figura 23. Distribuição espacial da condutividade hidráulica.

b. Recarga

Os valores da recarga por precipitação foram tomados dos balanços hídricos realizados por Ingeominas (1990). Nesse estudo foram utilizados dados de 14 estações meteorológicas, duas localizadas dentro da bacia, com um período de medição de precipitação de 1969 a 1988. A evapotranspiração potencial foi calculada mediante a fórmula de Turk, e como havia deficiência de dados, já que somente existiam registros de evapotranspiração na estação Tablo, esses foram completados com informações de estações vizinhas. No cálculo do escoamento foi usada a fórmula empírica de Mejía e Perry (1985), já que somente se contavam com medições de vazões dos rios de 2 ou 3 anos, e, adicionalmente, estas estavam afetadas pela presença de represas e captações na região.

Como conclusões desse estudo menciona-se que a maior infiltração ocorre nos meses de maior pluviosidade, embora em alguns tipos de solos não aconteça no primeiro período de chuvas. Existe déficit anual nos balanços hídricos, mas não se descarta a existência de infiltração localizada ou em alguns eventos de chuvas. Os dados gerados neste estudo e que foram usados na modelagem matemática são apresentados na tabela 5.

Tabela 5. Dados de recarga usados na modelagem numérica

Unidades	Recarga (mm/ano)		
	Mínima	máxima	media
A. Neógeno-Quaternário (NgQ)	10.92	25.71	20.39
Formação Guaduas (KTg)	2.7	45.4	14
A. Guadalupe (Ksg)	129	285	218

A distribuição da recarga foi feita por unidades hidrogeológicas, baseada nos balanços hídricos de Ingeominas (1990). No caso do aquífero Guadalupe, que domina as zonas montanhosas, foi feito um incremento gradual até atingir as regiões

de maiores altitudes. No caso do aquífero Neógeno-Quaternário foi considerada uma leve diminuição da recarga nos leitos dos rios, onde segundo o mapa de Van Der Hammen (1995), existe uma menor condutividade hidráulica. A distribuição espacial deste parâmetro pode observar-se na Figura 24.

c. Poços

O modelo matemático da bacia do rio Chicú foi simulado e calibrado em dois estados, sem bombeamento e com bombeamento. No caso da primeira situação foram usados os níveis estáticos dos poços e no segundo os níveis dinâmicos.

Tanto os poços de extração quanto os de observação foram selecionados a partir da base de dados criada para o estudo, cujas informações foram verificadas cuidadosamente nas fases anteriores do projeto, como descrito no capítulo 4.

Para a seleção dos poços de bombeamento foram observados critérios como localização, coluna construtiva, vazão de exploração, aquífero de captação, horas de uso diário e ano de perfuração. Os poços selecionados têm profundidades entre 100 e 340 m, e excepcionalmente um poço de mais de 1000 m de profundidade (227-II-D-021). Estes poços captam os dois principais aquíferos de forma independente ou nalguns casos restritos, uma mistura de ambos.

No caso dos poços de observação os critérios de seleção foram mais rigorosos, sendo imprescindíveis a coluna construtiva e a cota dos poços. Tais informações foram importantes para inferir a altitude dos pontos de observação do nível potenciométrico, que em todos os casos foi assumida na parte média dos filtros; e para definir a carga hidráulica do ponto em metros sobre o nível do mar. Para a simulação com bombeamento, se procuraram poços com níveis dinâmicos, os quais foram muito mais restritos, já que na maioria dos casos os poços não contavam com nivelação topográfica. Foram escolhidos 39 poços para o estado sem bombeamento e 11 para o estado com bombeamento. A localização destes poços pode-se observar nas Figuras 25a e 25b.

d. Condições de Contorno

Como contornos do modelo foram selecionadas preferencialmente condições naturais presentes na área de estudo, e não limites impostos ou artificiais, tentando reduzir algumas possíveis fontes de erros na modelagem. Desta forma, os limites

Precipitação

Figura 24: Distribuição da recarga por precipitação.

(a)

(b)

Figura 25 a. Poços de Observação estado “sem bombeamento”
 Figura 25 b. Poços de Observação e bombeamento “estado com bombeamento”

oeste e leste do modelo correspondem ao traçado dos rios Subachoque e Bogotá, respectivamente. Nestes casos a condutância dos rios foi calculada assumindo para o leito dos rios a mesma condutividade hidráulica dos aquíferos que atravessam, a largura dos rios de 10 m., a espessura dos materiais da base do rio de 1 m. Os valores de condutância de entrada do modelo foram de 0,1 para os rios Subachoque e Bogotá, mas deve se mencionar que estes valores foram ajustados no processo de calibração do modelo, como será descrito nos próximos itens.

Na zona norte foram estabelecidos limites de carga conhecida nas adjacências dos rios Subachoque e Bogotá (extremos oeste e leste respectivamente) assumindo cargas hidráulicas similares às apresentadas pelos rios nessas seções; na parte central foi definida uma condição de contorno de fluxo zero, correspondente ao divisor de águas das bacias Chicú e Frio. Na zona sul foi determinado um limite de carga conhecida, baseado nas cargas dos rios e dos corpos de água superficiais (wetlands) presentes nesta região. É importante mencionar que os limites de carga conhecida foram assumidos para a totalidade das camadas do modelo.

Na Figura 26 esquematizam-se todos os limites utilizados, e os valores de entrada do modelo, os quais posteriormente foram otimizados no processo de calibração.

5.2.3. Calibração do modelo

No processo de calibração da modelagem matemática são ajustados os parâmetros hidrogeológicos e as condições de contorno do modelo, procurando obter a menor diferença possível entre as cargas hidráulicas calculadas e as medidas na área estudada. Esta considera-se uma das fases mais importantes e no caso particular da bacia do rio Chicú, a que demandou maiores esforços por ser um processo manual e pela complexidade hidrogeológica da zona.

Como parâmetros de calibração foram usados os níveis estáticos no estado sem bombeamento e os níveis dinâmicos para o estado com bombeamento. O critério de avaliação adotado foi o RMS (root mean squared) normalizado, procurando chegar a um valor inferior ao 10%, que é considerado aceitável. Também foram checados os balanços hídricos e o formato das linhas equipotenciais obtidas. O procedimento de calibração foi como descrito a seguir:

Figura 26. Condições de contorno do modelo matemático

a. Estado natural ou sem bombeamento

As simulações foram iniciadas com os valores médios dos parâmetros hidrogeológicos como condutividades hidráulicas e recarga, conductâncias mínimas e as condições de contorno mais simples. Posteriormente foram testadas combinações de parâmetros, utilizando seus valores máximos e mínimos e modificando o tipo e os valores das condições de contorno inicialmente definidas. Nos melhores modelos obtidos, foram modificados sucessivamente os parâmetros na seguinte ordem:

- **Recarga:** em todos os casos analisados os melhores resultados foram obtidos com pequenos valores de recarga, inclusive inferiores aos valores médios.
- **Condutividade hidráulica:** as condutividades hidráulicas das diferentes unidades mostram grandes diferenças de até 5 ordens de magnitude; e por este motivo foram muitas as possibilidades de combinação de valores, analisadas. Em geral os melhores resultados obtiveram-se com condutividades muito baixas para os aquíferos (entre $1e^{-8}$ e $1e^{-10}$) e condutividades médias para os dois complexos aquíferos ($1e^{-5}$).
- **Condições de contorno:** nos limites laterais do modelo foram testados condições de contorno tipo *Rio* e tipo *Dreno*, também foram incrementadas e diminuídas sucessivamente as condutâncias dos leitos dos rios, encontrando melhores resultados com valores de até duas ordens de magnitude. As cargas hidráulicas destes rios foram modificadas até limites razoáveis. Com relação aos limites norte e sul, foram modificadas as cargas hidráulicas, mostrando melhores resultados com valores um pouco inferiores aos iniciais.
- **Geometria do aquífero:** Como última alternativa para a calibração do modelo foram testadas algumas variações na geometria dos aquíferos, já que pela complexidade da zona, foi adotado um modelo geológico generalizado para toda a bacia. As principais variações foram feitas na Serrania de Cota-Chía, cujo flanco oeste é cortado abruptamente por falhas inversas, mas não se tem clareza sobre a continuidade desta falha na zona norte, sendo que seu traço é coberto pelos sedimentos recentes. Por este motivo foram testadas algumas alternativas. Também foram suavizadas levemente as inclinações das unidades a

maiores profundidades, o que poderia realmente ocorrer, para ver a reação do modelo, mas neste sentido as variações foram mínimas.

Depois deste processo, no modelo com melhores resultados, foi utilizado o programa PEST para otimizar os parâmetros condutividade hidráulica e recarga, uma vez que ele consegue esgotar as alternativas até encontrar o melhor resultado possível, dentro da faixa de dados introduzidos. O PEST, geralmente sugeriu recargas muito baixas e condutividades hidráulicas muito contrastantes, o que gerava alguns problemas locais na configuração do sistema de fluxo das águas subterrâneas.

b. Estado com bombeamento

Neste caso foram usados como parâmetros iniciais os melhores resultados do modelo sem bombeamento, e posteriormente se fez um ajuste manual até obter a melhor solução. Os parâmetros obtidos foram novamente aplicados no modelo em estado de não bombeamento e verificou-se simultaneamente os resultados em ambas simulações, procurando encontrar a melhor solução para os dois casos.

Com as simulações nos dois estados, com e sem bombeamento, foram atingidos valores de RMS normalizado, próximos a 10%, sendo melhores os resultados na simulação sem bombeamento, provavelmente porque se contava com maior número de poços de observação e com informações mais confiáveis. Nas Figuras 27a e 27b podem ser apreciadas as curvas de calibração destas simulações. No estado sem bombeamento pode-se observar que em geral os pontos aparecem um pouco acima da reta de calibração, mostrando uma pequena diferença positiva entre as cargas hidráulicas calculadas e observadas ($H(\text{cal.}) > H(\text{obs.})$). Isto pode ser explicado por perdas de carga nos próprios poços, por erros nas medições nos níveis estáticos ou por interferência dos níveis por poços próximos em funcionamento. No estado com bombeamento, apresenta-se uma maior dispersão dos dados, encontrando-se diferenças positivas e negativas entre as cargas calculadas e as observadas, mas, em geral, com erros aceitáveis.

Figura 27 a. Gráfico de calibração estado “sem bombeamento”

Figura 27 b. Gráfico de calibração estado “com bombeamento”

5.2.4. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é uma fase fundamental da modelagem matemática, que procura identificar os parâmetros cujas mínimas variações podem mudar substancialmente os resultados do modelo. Estas mudanças nos resultados, devem-se em parte à necessidade de assumir ou estimar certos valores, frente a ausência de dados ou à impossibilidade de conhecer os sistemas aquíferos completamente.

A análise de sensibilidade foi feita para os principais parâmetros de entrada do modelo e para ambas situações, com bombeamento e sem bombeamento. Foram tomados como critérios de avaliação os mesmos que para o processo de calibração, RMS normalizado, balanço de massa e formato das linhas equipotenciais (Tabela 6).

A **condutividade hidráulica** de cada unidade foi incrementada e diminuída em meia e em uma ordem de magnitude. Com estes dados, o RMS normalizado alcançou valores de até 20,54% no estado sem bombeamento, e de 47,97% no estado com bombeamento. As simulações no estado com bombeamento mostraram serem muito menos estáveis, sendo necessária a desativação da opção de "*rewetting*" para lograr que o modelo convergisse, permitindo avaliar a sensibilidade do parâmetro.

Os valores da **recarga** foram diminuídos até a metade e novamente aumentados até o dobro, obtendo-se pequenas mudanças nos RMS normalizados, que foi no máximo de 12,31% para o estado sem bombeamento e de 17,86% para o estado com bombeamento, que não convergiu com os valores máximos de recarga.

Os valores de **condutância** dos rios Subachoque e Bogotá foram mudados de 0,1 m²/dia até 1000 m²/dia, mas o efeito no RMS normalizados foi muito pequeno, sendo no máximo de 11,59% para o estado sem bombeamento e de 17,48% para o estado com bombeamento. Estes resultados foram muito similares aos obtidos no modelo calibrado, mostrando que o parâmetro tem uma pequena influência no modelo. Os maiores efeitos observados foram com relação ao sistema de fluxo no extremo NE do modelo, que, com condutâncias mínimas do rio Bogotá, apresentava-se uma tendência do fluxo na direção norte e não no sentido deste rio, como era de se esperar.

Tabela 6. Resultados da análise de sensibilidade

[illegible]

5.2.5. Resultados do modelo matemático

A modelagem matemática da bacia do rio Chicú foi realizada visando melhorar o conhecimento sobre o sistema de circulação das águas subterrâneas, e visualizar e quantificar os efeitos da exploração na bacia. Com os resultados do modelo foi possível alcançar estes objetivos, embora se considere que ele é apenas de caráter “orientativo”, necessitando-se de mais dados de campo e estudos detalhados.

De forma geral, as simulações com e sem bombeamento mostraram tendências muito similares às observadas nos mapas potenciométricos realizados para diferentes épocas. Existe um componente principal de fluxo no sentido norte-sul e aporte lateral, especialmente desde a zona leste, Serrania de Tabio-Tenjo, para o centro da bacia. Na zona norte o fluxo traspassa a bacia do rio Chicú, acompanhando a direção do rio Frio, que posteriormente sofre um desvio ao sul, até encontrar o rio Bogotá. Na zona sul, o fluxo d'água subterrânea, apresenta uma maior tendência para leste, buscando a saída no rio Bogotá. A Serrania Cota-Chía aparece na maior parte de sua extensão, como uma “barreira” de fluxo, com linhas equipotenciais perpendiculares, pela predominância de rochas sedimentares da Formação Chipaque, que possui a condutividade hidráulica mais baixa da zona (Figuras 28a e 28b).

Com o modelo, também foi possível apreciar a existência de fluxos ascendentes no centro da bacia, desde os aquíferos mais profundos, e atravessando, inclusive, os aquitardes, mas com tempos de trânsito lentos, de várias centenas de anos.

Comparando os modelos com e sem bombeamento é possível observar que o efeito da exploração (com os poços colocados no modelo e as vazões assumidas) é uma diminuição na carga hidráulica em geral. Não foram apreciados muitos efeitos locais, o que pode ser o resultado das baixas taxas de bombeamento da zona, apesar da existência de alta densidade de poços, ou da distribuição dos poços analisados.

- Célula Seca
- Nível d'água subterrânea
- Linha Equipotencial
- Direção do fluxo

Figura 28 a. Mapa potenciométrico simulado “estado sem bombeamento”

- Célula Seca
- Nível d'água subterrânea
- Linha Equipotencial
- Direção do fluxo

Figura 28 b. Mapa potenciométrico simulado “estado com bombeamento”

Do balanço de água para a bacia em estado estacionário, obteve-se que a recarga a partir da precipitação para os aquíferos é de $4,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, que é da mesma ordem de magnitude dos balanços hídricos realizado por Ingeominas (1990). O fluxo para os rios e drenos, em estado natural, ou seja sem intervenção do homem, é de $3,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. Deve-se lembrar que no cálculo, estão incluídos não somente os aportes às drenagens da bacia do Chicú, mas dos rios Subachoque e Bogotá, limites oeste e leste do modelo, respectivamente. No estado com bombeamento, os aportes aos drenos e rios diminuem consideravelmente, estando na faixa do $1,76 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{ano}$. Nesta análise foram também incluídos alguns dos principais poços das duas bacias vizinhas, do rio Subachoque e do rio Bogotá.

Com respeito ao volume de água extraída pelos poços, deve ser considerado que, por carecer de dados atualizados que envolvessem todas as captações, foi assumido que os poços selecionados bombeavam durante as 24 horas do dia, com as vazões registradas no ano 1990, que é a única data com tais registros. Deste modo os volumes extraídos seriam da ordem de $8,1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, estando acima da recarga anual por precipitação obtida, mais como foi discutido no capítulo 3, este fato não indica necessariamente que exista super-exploração, devendo ser realizada uma série de estudos detalhados que incluam monitoramento permanente dos níveis e medição dos efeitos negativos apresentados, além de balanços hídricos reais e com dados mais confiáveis. Os valores obtidos nos balanços de massa, podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7. Balanços de massa para as simulações em estado com bombeamento e sem bombeamento.

SIMULAÇÃO	ERROS CALCULADOS					BALANÇO DE MASSA						
	ME (m)	MA (m)	SEE (m)	RMS (m)	RMS N. (%)	ENTRADA (m^3/dia)			SAÍDA (m^3/dia)			
						C.C	REC	TOTAL	C.C	DRENOS	WELLS	TOTAL
SEM BOMBEAMENTO	3,77	5,48	0,86	6,41	10,17	58281,43	12500,00	70782,16	61016,12	9766,19	0,00	70782,31
COM BOMBEAMENTO	4,17	8,44	2,62	9,27	15,46	66590,20	12500,00	79090,20	51014,01	5732,49	22343,83	79090,31

ME Mean Error

MA Mean Absolute

SEE Standar Error of Estimate

RMS Root Mean Squared

RMS N. Root Mean Squared Normalized

CC limite de Carga Constante

REC Recarga

5.3. APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO COMO FERRAMENTA DE GERENCIAMENTO

Uma das principais aplicações e vantagens da modelagem matemática de fluxo das águas subterrâneas é auxiliar nas atividades de gerenciamento dos aquíferos, quanto à determinação de vazões máximas de bombeamento permitidas e à delimitação de áreas de proteção de aquíferos e captações.

Neste sentido, na área de estudo, foram simulados alguns cenários para avaliar a resposta dos aquíferos frente ao aumento gradual nos regimes de exploração regional e local nas zonas de maior interesse. Também foram delimitadas as zonas de contribuição e transporte de alguns poços de abastecimento público, com o objetivo de estabelecer áreas onde devem ser controladas certas atividades potencialmente contaminantes.

5.3.1. Cenários de Exploração

Para uma avaliação regional dos efeitos do aumento gradual dos volumes de água extraídos da bacia, foram selecionados 10 poços com suas colunas construtivas típicas, procurando uma distribuição razoavelmente regular ao longo da bacia. Nestes poços foi aumentada gradualmente a vazão de exploração, desde os 500 m³/dia até 3000 m³/dia; valor para o qual o modelo não mais convergiu. Na Figura 29, foram plotados os valores de aporte a drenos versus a vazão total de exploração, encontrando-se um rápido decaimento da curva, a qual, aparentemente, tinha a tendência a estabilizar a partir dos 30000 m³/dia. Apesar do exercício não ter sido completo, foi possível evidenciar os efeitos negativos de uma exploração inadequada sobre a descarga natural dos aquíferos na bacia. Como foi descrito no início do projeto, muitos dos riachos que cortavam a zona perderam quase completamente suas vazões, e ao juízo de muitos especialistas é o efeito das captações de águas subterrâneas na região, sem o adequado planejamento.

Com esta exploração máxima simulada (30.000 m³/dia), que é superior a recarga por precipitação utilizada no modelo (12.500 m³/dia), os descensos dos níveis potenciométricos com relação ao "estado natural" ou sem bombeamento, são em geral superiores a 5 m, sendo mais acentuados na zona norte da bacia, onde

Figura 29. Efeitos regionais do bombeamento intensivo

podem alcançar 10 m. Com este regime de exploração incrementa-se substancialmente a área com células secas na zona montanhosa. Apresentam-se igualmente rebaixamento dos níveis ao redor dos poços, e, em alguns casos, chega a se secar a célula superior que tem uma espessura média, na zona plana, de 15 m a 20 m. Isso indica que poços rasos com profundidades menores que 15 m poderiam secar.

Para a **avaliação local**, foram selecionadas 3 áreas de interesse: zona I, de pouca densidade de poços, zona II, poços de abastecimento público, e zona III, de maior densidade de poços. Nestas zonas foram analisados os rebaixamentos dos níveis, como resposta à distância entre poços e ao aumento gradual dos volumes de água extraídos.

Nos três casos foram selecionados poços típicos das zonas e suas vazões foram incrementadas a partir das comumente usadas, que são de aproximadamente, 500 m³/dia, 1000 m³/dia e 100 m³/dia para as zonas I, II e III, respectivamente. As distâncias foram aumentadas gradualmente desde os 62,5m (que corresponde à maior resolução da malha desenhada) até os 500m. A localização das zonas analisadas e os gráficos de rebaixamento versus distância, para diferentes vazões, podem ser observados na Figura 30.

Na zona I, os rebaixamentos máximos foram de 4,8 m, para a uma distância entre poços de 62,5 m e vazão de 1500 m³/dia. Com estas vazões mesmo para distâncias de 500 m, geram-se rebaixamento de níveis maiores que 3 m.

Na zona II, é apresentado o pior dos cenários de exploração, já que mesmo com vazões típicas, os rebaixamentos dos níveis foram de 1,4 m e 2,9 m, para espaçamento de poços entre 500 m e 62,5 m. Nesta zona, com aumento em 4 vezes das vazões, em poços distantes 62,5 m (o que atualmente é pouco provável), os rebaixamentos dos níveis potenciométricos alcançariam 12,6 m.

Na zona III, onde as vazões típicas são menores, no caso de aumentar as vazões 5 vezes (até 500 m/dia), os rebaixamentos dos níveis para os poços menos distantes, seria de apenas 1.3 m, muito inferiores aos apresentados nas outras zonas. Não obstante, deve ser considerado que este é o efeito da interferência dos cones de rebaixamento entre dois poços, e nesta zona a densidade de poços pode ser maior que 20 por km².

Figura 30. Efeitos locais do bombeamento intensivo

Com esse último exercício, foi possível observar que em todas as zonas selecionadas, a proximidade de poços pode causar certos rebaixamentos localizados dos níveis potenciométricos. Na zona III, com maior densidade de poços e onde os mapas potenciométricos já revelaram um rebaixamento constante dos níveis (Figuras 16 e 17), muito provavelmente a interferência dos cones de abatimento seja a principal causante deste fenômeno.

De modo geral na bacia do rio Chicú os fenômenos de descida continuada dos níveis potenciométricos se deve a resultados da interferência de poços próximos, apesar de que geralmente suas vazões sejam baixas.

A bacia do rio Chicú esta submetida a exploração intensiva e como todas as exploração de recursos naturais tem seus efeitos no meio ambiente. Como mencionado no capítulo 3, deve ser analisado o que, e o quanto pode ser permitido, em virtude dos benefícios que a água subterrânea tem para a sociedade e na impossibilidade de satisfazê-los na atualidade através de outros meios. A simulação de uma vazão total explorada de 30.000 m³/dia, aproximadamente de 5 vezes a registrada em 1990, mostrou que os feitos negativos, como descenso dos níveis e perda de vazão nas drenagens seriam incrementados. Não obstante, considera-se que a exploração do recurso deve continuar, e o modelo pode ser usado no sentido a localizar os novos poços, evitando interferências, identificando regiões com menos sensibilidade a exploração, ou mesmo estabelecendo mudanças de regimes de bombeamento, como a diminuição de horas de uso ou alternância de uso de poços próximos.

5.3.2. Zonas de contribuição dos poços de abastecimento público

Como mencionado anteriormente, a modelagem matemática é aplicada para o traçado de perímetros de proteção de aquíferos e captações.

Na zona de estudo foram identificados os poços de abastecimento público, localizados no município de Tenjo, com o objetivo de definir suas Zonas de Contribuição (ZC) e Zonas de Transporte (ZT). Nestas zonas, deve ser exercido um

controle apropriado das atividades potencialmente contaminantes, precisando ser mais protegidas as áreas mais próximas ao poço.

Para definir as ZC e ZT, utilizou-se o programa MODPATH (Pollok, 1989), que permite visualizar a trajetória reversa de partículas colocadas ao redor dos poços, até atingir alguma das condições de contorno do modelo, permitindo a delimitação das suas zona de contribuição. As partículas foram adicionadas nas camadas onde se localizam os filtros dos poços selecionados, da seguinte forma:

Poço municipal 227-II-D-021	camadas 9 e 10
Poço municipal 227-II-D-587	camadas 4,5 e 6
Poço municipal 227-II-D-1112	camadas 2 e 3

Na figura 31 podem ser observadas as ZC totais dos três poços, as quais em todos os casos atingiram a condição de contorno noroeste, onde as cargas hidráulicas são maiores. Para o caso do poço 227-II-D-1112, o formato das linhas de trajetória de partículas mostrou-se ser mais largo e não atingiu a condição de contorno oeste (rio Subachoque), mais próxima. Isto ocorreu devido a que este rio foi definido como dreno. Neste exercício também foi possível observar que o tempo de transporte, junto ao poço até as condições de contorno, é de 400 a 500 anos.

As ZT foram definidas para um tempo de trânsito das partículas de 10 e 50 anos, tomando como exemplo o estudo de Iritani (2000). Os raios máximos das áreas de transporte analisadas são apresentados na Tabela 8. Como mostra esta tabela, as ZT, para estes períodos de tempo, são muito grandes especialmente para o poço 227-II-D-587, que em 50 anos pode atingir uma área superior a 3 km. Assim incluiu-se uma ZT menor, correspondente ao tempo de trânsito de 5 anos, na qual possivelmente será mais fácil exercer controles adequados das atividades potencialmente contaminantes.

Para o poço 227-II-D-021, onde também se obtiveram áreas de trânsito muito grandes, deve se considerar que os filtros estão em profundidades superiores aos 1000 m, já que o poço foi inicialmente construído por companhias de petróleo, para estudos estratigráficos, e posteriormente cedido ao aqueduto municipal de Tenjo.

Figura 31. Zonas de contribuição total dos poços municipais

Tabela 8. Raios máximos das zonas de trânsito dos poços municipais.

Poço	Raio máximo, para todas as camadas (m)	Tempo de Trânsito (anos)
227-II-D-587 Filtros nas camadas 4,5 e 6	458.38	5
	737.083	10
	3533.383	50
227-II-D-021 Filtros nas camadas 10 e 11	431.185	5
	626.739	10
	2062.713	50
227-II-D-1112 Filtros nas camadas 2 e 3	291.995	5
	662.59	10
	1100.233	50

A classificação das atividades contaminantes apresentada por Hirata e Rebouças (1999), que reúne algumas publicações anteriores, dá uma idéia generalizada sobre aquelas que devem ser restringidas ou analisadas com maior detalhamento nos diferentes perímetros de proteção. Deve ser lembrado que estas são apenas recomendações e todos os casos devem ser analisados independentemente (Tabela 9).

Na zona de estudo, não foram delimitadas as zonas de operação (Zona I), nem o perímetro bacteriológico (Zona II), já que não se tem a resolução suficiente na malha do modelo para delimitá-las. As zonas de trânsito podem corresponder às Zonas Intermediárias (Zona III) e as Zonas de Captura à Zona IV.

As ZT dos poços municipais 227-II-D-021 e 227-II-D-587 abrangem parte do flanco leste da Serrania de Tabio-Tenjo. De modo geral as principais atividades destas zonas estão associadas à agroindústria e à criação de gado. Segundo Hirata e Rebouças (1999), nas ZT devem ser restringidos, com respeito a este tipo de atividades, o uso de fertilizantes sem controle adequado e a disposição de efluentes em lagoas. Para aceitar atividades como desagüe de currais e uso e/ou armazenamento de pesticidas, devem ser realizados estudos detalhados.

Tabela 9. Restrição de atividades potencialmente contaminantes, nos perímetros de proteção de poços.(Hirata e Rebouças, 1999)

ATIVIDADE POTENCIALMENTE CONTAMINANTE	PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DO POÇO				VULNERABILIDADE NATURAL		
	I	II	III	IV	ALTA	MEDIA	BAJA
Saneamento <i>in situ</i>							
Familiar	N	N	A	A	A	A	A
Edifício, coletivos, públicos	N	N	PA	A	A	A	A
Posto de gasolina	N	N	PN	PA	PA	A	A
Aeroportos	N	N	PN	PA	PA	A	A
Disposição de resíduos sólidos							
Doméstico municipal	N	N	N	PN	PN	PA	A
Materiais de construção (inerte)	N	N	PA	PA	A	A	A
Resíduos perigosos	N	N	N	N	N	N	PA
Industrial (classe I)	N	N	N	PN	PN	PA	A
Industrial (classe II e III)	N	N	N	N	N	N	PA
Cemitérios	N	N	PN	A	PA	A	A
Incinerador de resíduos sólidos	N	N	N	PN	N	PN	PA
Mineração							
Material construção	N	N	PN	PA	PA	PA	A
Outros, incluindo petróleo e gás	N	N	N	N	N	PA	A
Linhas de combustíveis	N	N	N	PN	N	PA	A
Indústrias							
Classe I	N	N	PN	PA	PA	PA	A
Classe II e III	N	N	N	N	PN/N	PA/N	PA/PN
Instalações militares	N	N	N	N	PN	PA	PA
Lagunas de efluentes							
Municipal/água resfriamento	N	N	PA	A	A	A	A
Industrial	N	N	N	N	PN	PA	PA
Drenagem/infiltração/Acidentes							
águas de chuva (tetos de casas)	PA	A	A	A	A	A	A
Rodovias principais	N	N	N	PN	PN	PA	A
Secundárias	N	PN	PA	PA	PA	A	A
áreas de recreação	N	PA	PA	A	A	A	A
Estacionamentos	N	N	PN	PA	PA	A	A
áreas industriais	N	N	N	PN	PN*	PA	A
Ferrovária e aeroportos	N	N	N	PN	PN	PA	A
Infiltração efluente no solo							
Indústria alimentícia	N	N	PN	PA	PA	A	A
outras indústrias	N	N	N	N	PU	PA	A
Efluentes de deságüe	N	N	N	PN	PA	A	A
lodo de deságüe	N	N	PN	PA	PA	A	A
Escorrimento de currais	N	N	PN	A	A	A	A
Gado Intensivo							
Efluentes em lagoas	N	N	N	PN	PA	A	A
Deságüe de currais	N	N	PN	PA	PA	A	A
Atividade agrícola							
Uso de pesticidas	N	N	PN	A	PN	A	A
Uso no controlado de Fertilizante ou disposição aberta	N	N	N	PN	PN	A	A
Armazenamento de pesticidas	N	N	PN	PA	PN	PA	A

N	não aceitável em virtualmente todos os casos	I	perímetro imediato de proteção (poucos metros do poço)
PN	provavelmente não aceitável, exceto em alguns casos com estudos detalhados e projetos especiais	III	perímetro de produtos químicos
PA	provavelmente aceitável, sujeito a estudo e projetos especiais	II	perímetro bacteriológico
*PA	com conexões à rede de esgoto	IV	área de recarga do aquífero
A	aceitável, com projetos especiais		

Nas adjacências da ZT do poço 227-II-D-1112 é conhecida a existência de frentes de exploração de areia e seixos, usados como materiais de construção; segundo estes autores, esta atividade é provavelmente aceitável, mas sujeita a estudos e projetos especiais.

Para avaliar outras atividades relacionadas ao saneamento *in situ*, disposição de resíduos sólidos, diferentes classes de indústrias e lagunas de efluentes, entre outras; é necessário um cadastro atualizado de todas as atividades, no qual seja verificada sua localização nas ZT delimitadas. Também seria útil conhecer se existem projetos de instalação futura destas atividades próximas às ZT, para tomar as medidas pertinentes. Na figura 32, podem ser observadas as ZC e ZT dos poços analisados.

- Células inativas
- Linhas de trajetória de partículas
- Linhas de trajetória de partículas
- Drenagens
- Vias
- Poços de bombeamento
- Raios das ZT para 5, 10 e 50 anos

Figura 32. Zonas de trânsito dos poços de abastecimento público.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em cada uma das fases do desenvolvimento do projeto foram encontrados pontos de destaque, como os mencionados a seguir.

Com relação às **fases de recopilação e análise de informação**, foram encontradas várias inconsistências nos dados hidráulicos, já que as informações provieram de diferentes estudos e entidades. Isto evidencia a necessidade de consolidar em uma única base os dados hidrogeológicos da bacia, beneficiando não somente as entidades investigadoras dos recursos hídricos, mas as autoridades encarregadas de seu controle e os usuários.

Devido ao alto grau de complexidade **geológico-estrutural** apresentado na zona de estudo e à existência de diversos modelos conceituais, impossíveis de comprovar com o estado atual do conhecimento, foi adotado um modelo generalizado para a bacia, baseado nas informações de superfície e em sondagens elétricas. Com o avanço das investigações este modelo poderá variar. Neste modelo os sistemas de falhas inversas e transversais foram avaliados para a configuração geométrica das unidades, interrompendo estruturas anticlinais e sinclinais e sendo responsáveis pela sucessiva repetição de unidades cretáceas, especialmente na Serrania de Tabio-Tenjo.

Com relação ao **modelo hidrogeológico**, apresentam-se dois principais complexos aquíferos, conformado o primeiro por sedimentos não consolidados, Neógeno-Quaternário e o segundo por rochas sedimentares de idade cretácea, separados geralmente por sedimentos argilosos da Formação Guaduas. A configuração espacial e a alta variabilidade dos parâmetros hidráulicos é relacionada à complexa tectônica que afeito à formação da Cordilheira Oriental da Colômbia.

O sistema de fluxo dos aquíferos, evidenciado através dos mapas potenciométricos realizados para diferentes épocas da década do 90, mostra como principal área de recarga a Serrania de Tabio-Tenjo, especialmente na sua zona central, e a zona de descarga natural, ao sul da bacia. Com estes mapas também foram identificadas as zonas com rebaixamentos constantes dos níveis, localizadas

principalmente na Serrania de Tabio-Tenjo, Veredas Carrasquilla e El Estanco. Os rebaixamentos neste período foram geralmente inferiores a 10 m, exceto para um poço onde se registraram descenso dos níveis de 30 m. Uma análise preliminar mostrou que a densidade de poços era a causa mais provável destes rebaixamentos.

No modelo conceitual foram definidos uma série de questionamentos a serem melhor analisados com o auxílio do modelo numérico, como a existência de fluxos verticais desde os aquíferos profundos, de aportes laterais desde as bacias adjacentes, e os efeitos dos bombeamentos intensivos locais e regionais.

A **zona de domínio** foi ampliada lateralmente incluindo os rios Subachoque a oeste e Bogotá a leste, como condições de contorno. Com estes contornos procurou-se analisar a existência de aportes significativos desde estas zonas. Na definição destas condições de contorno foi utilizada uma análise preliminar de sensibilidade, com a qual foram também definidos a profundidade do modelo e o número de camadas a serem discretizadas.

A **calibração do modelo numérico** foi realizada para o estados natural ou sem bombeamento e para o estado com bombeamento. Nesta fase foram testados diferentes combinações dos parâmetros hidráulicos e condições de contorno. As melhores soluções com os contornos laterais foram os drenos ou sumidouros de água, com conductâncias de (10 a 150 m²/d), recargas um pouco inferiores às médias obtidas nos balanços hídricos de Ingeominas (1990), sendo de 3 a 5 mm/ano para o Aquífero Neógeno-Quaternário, e entre 30 e 80 mm/ano para o Aquífero Guadalupe. As condutividades hidráulicas para os aquitardes entre 1x10⁻⁸ m²/dia e 1x10⁻¹⁰ m²/dia e para os aquíferos de 1x10⁻⁵m²/dia (em todas as unidades a condutividade hidráulica vertical foi assumida com uma ordem de magnitude inferior).

No processo de calibração procurou-se a melhor solução para os dois estados analisados, sendo o estado com bombeamento muito mais instável, e, que definiu, em última instância, os valores da condutividade hidráulica utilizados.

Deve também ser considerado que outras combinações de parâmetros proporcionaram, para um dos estados simulados, erros não muito distantes dos

encontrados no modelo simulado. Este fato evidencia que existem outras possíveis soluções para o modelo.

A **análise de sensibilidade** foi realizada para os parâmetros, condutividade hidráulica, recarga e conductância dos drenos, cujos valores foram otimizados no processo de calibração. Esta análise mostrou que o parâmetro que mais influencia os resultados do modelo é a condutividade hidráulica, especialmente no estado com bombeamento, no qual condutividades inferiores às calibradas provocavam erros (RMS normalizado) de quase 50%.

O modelo calibrado permitiu verificar a existência de aportes laterais principalmente desde a Serrania de Tabio-Tenjo, mostrando que as águas na zona norte migram para leste, para a bacia do rio Bogotá, acompanhando a direção do rio Frio, e também foi possível verificar a existência de fluxos ascendentes com tempos de trânsito de várias centenas de anos.

Foram analisados vários cenários de **exploração intensiva local**, para diferentes áreas de interesse, encontrando maiores efeitos da interferência de poços na zona de abastecimento público, localizada na Serrania de Tabio-Tenjo e a sul do município de Tenjo, uma vez que são extraídos volumes de água consideráveis (da ordem de 1000 m³/dia). Já na zona de maior densidade de poços os descensos dos níveis foram menores, devido as vazões de exploração pequenas (menores de 100 m³/dia). Deve ser considerado também que somados os cones de depressão de mais poços, como deve ocorrer na realidade, estes rebaixamentos podem ser muito maiores.

A **exploração intensiva regional** mostrou que com o aumento dos volumes extraídos, os fenômenos como diminuição dos aportes às drenagens da região, o descenso regional de níveis potenciométricos, e em alguns casos descensos locais, continuariam se agravando. Isso indicaria mais uma necessidade urgente de gerenciar adequadamente o recurso.

Foram traçadas as **zonas de contribuição** dos poços de abastecimento público, localizados próximos ao flanco leste da Serrania Tabio-Tenjo, as quais

atingiram em todos os casos o limite noroeste da zona de estudo, que é a zona com maior carga hidráulica do modelo. A condição de contorno oeste do modelo, o rio subachoque, não foi atingida, apesar de estar mais próxima do poço municipal 227-II-D-021, por ter sido definida como dreno ou sumidouro de água, mais possivelmente seria atingida em caso de ter sido definida como rio.

As **zonas de trânsito** destes poços municipais foram definidas para tempos de transporte de 5, 10 e 50 anos, sendo provavelmente mais fácil de exercer controle sobre as atividades instaladas nas zona de 5 anos. De modo geral estas zonas envolvem parte do flanco leste da Serrania de Tabio-Tenjo, na qual as principais atividades relacionam-se à agroindústria e criação de gado. No setor sul encontra-se uma exploração de areias e seixos usados como materiais para construção. Com respeito a estas atividades foram recomendadas algumas medidas preventivas, baseadas na classificação de Hirata e Rebouças (1999).

De modo geral o modelo numérico calibrado, mostrou-se concordante com os dados existentes na zona de estudo. Provou ser uma ferramenta útil para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, especialmente na definição da localização dos poços de exploração, evitando fenômenos de interferência entre poços. O modelo numérico, não obstante, deve evoluir com o avanço das investigações, permitindo obter dados cada vez mais acurados e úteis no gerenciamento dos recursos hídricos da bacia.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOSTA J, ULLOA C, RODRIGUEZ, E (1993) Mapa Geológico de la plancha 227, a escala 1: 100.000. Ingeominas.
- ACOSTA J, ULLOA C, MARTINEZ J (1997) Memorias de la Plancha geológica 227 a escala 1:100.000. Ingeominas, Santafé de Bogotá.
- ALVAREZ A (1997). Gestión del agua subterránea en la Sabana de Bogotá. Geología Colombiana 22.
- ANDERSON M, WOESSNER W (1992) Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, Inc. San Diego, California. 381 p.
- BELTRAN J, ACOSTA A & HIDROGEOLOGOS ASOCIADOS LTDA (1999) Estudio de los niveles estáticos del agua subterránea en la Sabana de Bogotá. Informe elaborado para la CAR. Santafé de Bogotá. D.C.
- BERMUDEZ O, CASTRILLON F (1999) Hydrochemical and isotopical study in the aquifers of Sabana de Bogotá (Colombia). Informe inédito, Bogotá.
- CAR CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA (2000) Sistema de atendimento al usuario: oficinas regionales Funza y Zipaquirá. URL <http://www.car.gov.co/25785.htm>, <http://www.car.gov.co/25799.htm>
- CARO P, PADILLA JP, VERGARA H (1996) Geología de Santafé de Bogotá y alrededores. Memorias del VII Congreso Colombiano de Geología, Santafé de Bogotá, p 278-288.
- CASTRILLON F & BERMOUDEZ O (1999) Hydrochemical isotopical study in the aquifers of Sabana de Bogotá. Informe en preparación. Bogotá, D. E.
- CLEARY R (1998) Introdução a modelos matemáticos de Fluxo. Waterloo Hidrologic's - USP: Curso de modelagem matemático de fluxo e transporte em águas subterrâneas. São Paulo SP, Setembro do 1998.
- COOPER M, ADDISON F, ALVAREZ R, CORAL M, GRAHAM R, HAYWARD A, HOWE S, MARTINEZ J, NAAR J, PEÑAS R, PULHAM A, TABORDA A (1995) Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. AAPG Bulletin, 79(10): 1421-1443.
- CUSTODIO E (2002) Aquifer Overexploitation: What does it mean?. Hydrogeology Journal, 10:254-227.
- DIEZEMANN W (1959) Aguas subterráneas en Bogotá y sus alrededores. Informe Ingeominas, Bogotá.

- EAAB EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTA (2000).
URL <http://www.eaab.com.co/clientesespeciales/municipios/municipios.htm>
- FETTER C W (2001) Applied Hydrogeology, Fourth Edition, Prentice Hall, Inc. United States of America.
- FOSTER S & HIRATA R (1988) Groundwater pollution risk evaluation: The methodology using available data. CEPIS Tech. Report (WHO-PAHO-CEPIS), Lima –Perú.
- FOSTER S, ADAMS B, MORALES M, TENJO S (1992) Estrategias para la protección de las aguas subterráneas: Una guía para su implementación. OMS-OPS/HPE-CEPIS, BGS, Estado libre asociado de Puerto Rico.
- FUZEIRA V & MOREIRA R (1992) Gerenciamento de recursos hídricos. Memórias da semana de debate sobre recursos hídricos e meio ambiente, etapa Piracicava. (4 a 6 de maio).
- GAVIRIA S (1998) Aspectos Sobre la Relación Suelo-Agua en la Sabana de Bogotá. Informe interno área de química Ingeominas. Bogotá D.E.
- GARCIA A & MARTINEZ P (1996) Estudio de los niveles piezométricos de tres cuencas hidrográficas de la Sabana de Bogotá. Tesis de graduación, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias. Santa fe de Bogotá, D.C.
- GARCIA A & ORTEGA (1996) La importancia del Agua Subterránea para el Sector Floricultor y Acciones al Respeto. VI Foro Sobre el Agua Subterránea. ACOAGUA, Santafé de Bogotá, Octubre de 1996.
- GOMEZ H (1985) Principales rasgos estructurales al suroccidente de la Sabana de Bogotá. Revista CIAF, 10 (1). Bogotá.
- HETTNER H (1892) La Cordillera de Bogotá, resultados y estudios. Primera versión castellana de E. Guhl, Banco de la República. Bogotá.
- HIRATA R (1998) Informe del Viaje a Colombia. Proyecto COL/9/019: Aplicación de Técnicas Isotópicas en los Estudios de Aguas Subterráneas, Sabana de Bogotá. INGEOMINAS-OIEA.
- HIRATA R & REBOUÇAS A (1999) La protección de los recursos hídricos subterráneos: Una visión integrada, basada en los perímetros de protección y vulnerabilidad de acuíferos. Boletín Geológico y Minero, Vol. 110-4, año 1999 (423-436) p:79-92.
- HUBACH (1931) Exploración en la región de Apulo-San Antonio-Viotá. Bol. Min. Petrol. No. 25-27, p:41-60.

- HUBACH (1957) Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. Ingeominas, Bol.Geol. 5(2), p:93-113.
- IDEAM (2000) Modelo Hidrogeológico para los Acuíferos de Bogotá. Santa fe de Bogotá.
- INGEOMINAS (1983) Mapa de terrenos geológicos de Colombia. Ingeominas-US Geological Survey. Pub. Geol. Esp. Ingeominas, No. 14-1 -1983. Bogotá.
- INGEOMINAS (1990) Estudio hidrogeológico cuantitativo de la Sabana de Bogotá: Cuenca del Río Chicú. Convenio INGEOMINAS-CAR. Informes Técnicos, Ingeominas, Santafé de Bogotá.
- IRITANI M (1998) Modelação matemática tridimensional para a proteção de captações de água subterrânea. Tese de Doutorado, Progma de Recursos Minerais e Hidrogeologia, USP.
- LOBO-GUERRERO A (1992) Geología e hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana. VII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería de Colombia, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Santafé de Bogotá, Tomo II.
- LOBO-GUERRERO A (1995) Descenso de niveles de agua subterrânea en la Sabana de Bogotá. II Foro sobre de Geotecnia de la Sabana de Bogotá, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Santafé de Bogotá.
- MARTINEZ C & HINCAPIE G (1991) Modelación numérica del acuífero de la Formación Labor y Tierna (Grupo Guadalupe) en la vereda de la Punta, Municipio de Tenjo, Cundinamarca. Proyecto: Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá. Informe, Ingeominas, Bogotá.
- MARTINEZ C (1993) Modelación numérica de la cuenca del río Chicó. Ingeominas, Santafé de Bogotá, D.E.
- McLAUGHLIN D & ARCE M (1975) Mapa Geológico del Cuadrángulo Zipaquirá K-11, Colombia. Ingeominas, Bogotá D. E.
- McDONALDS & HARBAUGH (1988) A modular three dimensional finite-difference groundwater flow model of U.S. Geological Survey. Washigton, EUA, 576 p.
- MEDINA B & PRIETO J (1996) Investigación de direcciones de flujo y origen del agua Subterrânea en la cuenca del río Chicú. Tesis de graduación en Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá.
- MEJIA M & PERRY LTDA (1985) Estudio Nacional de aguas, segunda fase. Primer informe de progreso correspondiente a la cuenca del río Bogotá. FONADE-DPN. Bogotá D. E.
- MINISTERIO DE SALUD DE COLOMBIA (1983). Decreto 2105 del 26 de julio de 1983, sobre la potabilidad del agua para consumo humano. Santafé de Bogotá.

- MOLANO C & DOMINGUEZ C (1988) Modelo de simulación del Acuífero Guadalupe en el sector Madrid (Cundinamarca). III Simposio Colombiano de Hidrogeología.
- ORTEGA L & GARCIA A (1996) Importancia del agua subterránea para el sector floricultor y acciones al respecto. VII Foro Institucional Sobre el Agua Subterránea, ACOAGUA. Santafé de Bogotá, D.E.
- PEREZ G & SALAZAR A (1978). Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. Geologia Colombiana, 10: 7-85, p:1-10.
- POLLOK (1989) Documentation of computer programs to complete and display pathlines using results from U.S. Geological Survey modular three dimensional finite-difference groundwater model. USGS open report 89-381. 81p.
- RENZONI G (1962) Apuntes acerca de la litología y tectónica al este y sureste de Bogotá. Servicio Geológico Nacional. Bol. Geol. Vol. X No. 1-3. Bogotá D.E.
- RENZONI G (1968) Geología del Macizo de Quetame. Geologia Colombiana No. 5, p: 75-127. Bogotá D.E.
- REYES I (1993) La tectónica y su influencia en la recarga de los acuíferos de la Sabana de Bogotá. IV Simposio Colombiano de Hidrogeología, Cartagena, Memorias.
- RODRIGUEZ C & JIMENEZ G (1986) Datación del agua subterránea en la Sabana de Bogotá y sus implicaciones en hidrogeología. Bogotá.
- SARMIENTO G (1992) Estratigrafía y medios de depósito de la Formación Guaduas. Boletín Geológico de Ingeominas, Vol. 32, No. 1-3, p: 3-44.
- SCHEIBE R (1918) Las fuentes de Tabio. Compilacion de Estudios Geológicos Oficiales de Colombia 1917 a 1933, Bogotá, Tomo 1.
- SPITZ K & MORENO J (1996) A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling. Wiley and Sons.
- TORRES E, JIMENEZ G, OBANDO E, SANCHEZ L, ALAYON E (1987) Evaluación del acuífero de la Sabana de Bogotá utilizando técnicas isotópicas. Instituto de Asuntos Nucleares, Bogotá D. E.
- UNIVERSIDAD NACIONAL - SENA (1992) Hacia Dónde va la Sabana?, Conflicto, Ambiente y Sociedad. Santa fe de Bogotá, D.C.
- VAN DER HAMMEN T (1957) Estratigrafía palinológica de la Sabana de Bogotá (Cordillera Oriental de Colombia). Boletín Geológico, Ingeominas, 5(2).
- VAN DER HAMMEN T (1995) Plioceno y Cuaternario del altiplano de Bogotá y alrededores. IGAC, Subdirección de Geografía. Santafé de Bogotá.

- VAN DER HAMMEN T (1998) Plan ambiental de la cuenca alta del río Bogotá: análisis y orientaciones para el ordenamiento territorial. Informe elaborado para la CAR. Santa fe de Bogotá. D.C.
- VELANDIA F (2000) Informe del Área de Geología sobre los aspectos estructurales de la Sabana de Bogotá, dentro del proyecto de exploración de aguas subterráneas del Área de Minería. Informe interno, Ingeominas, Bogotá.
- WHI-WATERLOO HYDROGEOLOGIC, INC. User Manual of Visual Modflow. Waterloo Hydrogeologic Inc, Waterloo, Canada.

**ANEXO 1. Níveis potenciométricos dos anos 1990, 1991-
1992,1995, e 1998-1999.**

**ANEXO 1. NIVEIS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA
ANO 1990**

POÇO	NORTE	ESTE	COTA	1990					MÉDIA
				FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	
227-II-B-045	1030150.15	991055.99	2586.55	2,569.55					2569.55
227-II-B-046	1030313.31	991295.50	2600.32	2,589.52					2589.52
227-II-B-048	1030520.00	991890.00	2631.00	2,626.60					2626.6
227-II-B-085	1030960.60	993765.00	2580.62	2,570.12					2570.12
227-II-B-103	1030389.25	995821.54	2571.37	2,558.52					2558.52
227-II-B-143	1030055.12	998534.25	2579.72	2,573.82					2573.82
227-II-B-175	1032435.35	997911.10	2578.69	2,561.19					2561.19
227-II-B-177	1032853.27	997879.90	2576.58	2,560.38					2560.38
227-II-B-188	1033049.50	997941.00	2579.56	2,579.16					2579.16
227-II-B-191	1032810.32	997498.52	2579.09	2,562.79					2562.79
227-II-B-249	1035504.06	999175.93	2586.35	2,572.68					2572.68
227-II-B-251	1032778.78	995093.32	2668.91					2,647.91	2647.91
227-II-D-020	1029699.90	990915.45	2578.74	2,545.94					2545.94
227-II-D-043	1028487.62	988985.77	2584.89	2,572.89					2572.89
227-II-D-046	1028423.00	989092.45	2578.26	2,566.26					2566.26
227-II-D-084	1027722.25	988231.49	2575.41	2,554.01					2554.01
227-II-D-086	1027001.07	988323.87	2570.09	2,554.69					2554.69
227-II-D-161	1026492.32	988482.25	2561.64	2,558.74					2558.74
227-II-D-186	1026605.20	990159.48	2568.03	2,544.63					2544.63
227-II-D-187	1025988.25	990226.32	2567.08	2,543.98					2543.98
227-II-D-230	1024610.63	988645.49	2564.44	2,552.44					2552.44
227-II-D-286	1025480.22	990829.56	2566.94	2,545.39					2545.39
227-II-D-321	1024099.02	987687.42	2566.27		2546.17				2546.17
227-II-D-347	1024124.47	991264.48	2563.43	2,540.79					2540.79
227-II-D-383	1023894.78	991158.02	2563.99	2,563.69					2563.69
227-II-D-439	1023119.00	989486.95	2562.19		2529.06				2529.06
227-II-D-590	1029450.05	990348.51	2576.21	2,574.21					2574.21
227-II-D-598	1029547.77	990414.12	2578.74	2,542.74					2542.74
227-II-D-599	1028954.45	989597.78	2587.01	2,579.01					2579.01
227-II-D-601	1028682.54	989510.05	2578.69	2,573.49					2573.49
227-II-D-604	1028630.30	989364.02	2578.22	2,548.22					2548.22
227-II-D-605	1028641.45	989275.21	2578.31	2,573.31					2573.31
227-II-D-609	1027823.01	989343.34	2570.72	2,555.72					2555.72
227-II-D-612	1028005.02	988814.93	2571.45	2,571.25					2571.25
227-II-D-613	1027256.70	989323.51	2568.57	2,556.07					2556.07
227-II-D-628	1025767.45	989097.16	2567.08	2,537.08					2537.08
227-II-D-663	1026108.45	990199.66	2566.56	2,543.46					2543.46
227-II-D-665	1026013.31	989915.22	2566.62	2,548.23					2548.23
227-II-D-670	1021030.00	991905.00	2557.91	2,549.03					2549.03
227-II-D-786	1027538.62	992258.89	2572.79			2549.21			2549.21
227-II-D-787	1027478.65	992384.15	2572.62			2549.12			2549.12
227-IV-B-041	1019274.57	991847.48	2553.32	2,538.32					2538.32

FONTE: INGEOMINAS, (1990)

	NORTE	ESTE	COTA	1991							1992					média	mediana	máximo	mínimo	variação
				AB-MAIO	JUN	JUL-AU	SET	OUT	NOV	DEZ	FEV	MAR	A-MAIO	JUN	JUL					
227-II-B-079a	1031093.00	994167.00	2584.26		2565.65	2565.76	2565.88	2566.02	2565.79							2565.82	2565.79	2566.02	2565.65	0.37
227-II-B-068	1037272.73	998364.63	2612.28									2606.93	2602.15			2604.54	2604.54	2606.93	2602.15	4.78
227-II-B-069a	1037160.00	997930.00	2598.00	2593.60	2593.61	2593.53	2593.41	2593.63	2593.38	2593.47	2593.20	2592.65				2593.39	2593.47	2593.63	2592.65	0.98
227-II-B-085	1030960.60	993765.00	2580.62	2570.62		2570.46	2570.14	2570.33	2570.10	2570.07	2569.50		2569	2568.77	2564.12	2569.31	2570.09	2570.62	2564.12	6.5
227-II-B-103	1030389.25	995821.54	2571.37		2558.38	2558.31	2558.40	2558.36	2558.13	2558.30	2557.92	2556.72		2557.52		2558	2558.3	2558.4	2556.72	1.68
227-II-B-143	1030055.12	998534.25	2579.72	2574.81	2574.56	2573.89	2574.03		2574.11		2574.37	2573.7		2573.95	2573.64	2574.12	2574.03	2574.81	2573.64	1.17
227-II-B-150	1031044.21	997918.74	2574.88	2557.32	2557.25	2557.13	2557.12	2557.11	2557.06	2557.22	2557.14	2556.56	2556.78	2558.55	2558.48	2557.31	2557.14	2558.55	2556.56	1.99
227-II-B-175	1032435.35	997911.10	2578.69		2559.99	2559.77	2560.49	2560.23	2560.34	2560.50	2560.11	2559.29	2559.67	2558.80	2558.69	2559.81	2559.99	2560.5	2558.69	1.81
227-II-B-177	1032853.27	997879.90	2576.58	2559.89	2559.20	2559.11	2559.78	2559.70	2559.39	2559.99	2558.90	2558.7	2559.08	2558.18	2558.60	2559.21	2559.16	2559.99	2558.18	1.81
227-II-B-191	1032810.32	997498.52	2579.09	2559.78	2559.85	2560.03	2560.43	2560.39	2559.89	2560.62	2560.32	2560.53	2560.15	2559.36	2560.37	2560.14	2560.24	2560.62	2559.36	1.26
227-II-B-249	1035504.06	999175.93	2586.35	2576.57	2573.12	2572.53	2572.13	2571.68	2571.34	2572.16	2571.42	2570.9	2571.11	2570.56	2570.89	2572.03	2571.55	2576.57	2570.56	6.01
227-II-D-020	1029699.90	990915.45	2578.74	2552.92	2556.53	2554.74	2552.99	2555.19	2553.13	2555.33	2553.85	2551.79	2551.84			2553.83	2553.49	2556.53	2551.79	4.74
227-II-D-041	1028484.44	988839.68	2598.99									2575.87				2575.87	2575.87	2575.87	2575.87	
227-II-D-043	1028487.62	988985.77	2584.89	2569.69	2569.29	2568.97	2568.31	2567.72	2566.41	2567.29	2561.07	2558.43	2558.66	2558.03	2557.61	2564.29	2566.85	2569.69	2557.61	12.08
227-II-D-045	1028410.14	989063.32	2578.90	2568.22	2565.12	2567.88	2567.50	2566.75	2566.00	2568.42	2562.38	2559.53	2560.5	2559.75	2559.50	2564.3	2565.56	2568.42	2559.5	8.92
227-II-D-084	1027722.25	988231.49	2575.41	2561.37	2560.98	2561.55	2561.32	2560.76	2560.43	2560.03	2558.70	2557.2	2556.75	2558.14	2555.66	2559.41	2560.23	2561.55	2555.66	5.89
227-II-D-086	1027001.07	988323.87	2570.09	2550.27	2552.69	2553.03	2552.76	2552.01	2552.20	2552.26						2552.17	2552.26	2553.03	2550.27	2.76
227-II-D-103	1027040.00	989435.00	2568.58			2545.72							2541.01			2543.37	2543.37	2545.72	2541.01	4.71
227-II-D-110	1027940.15	990088.20	2571.70	2558.37	2558.39	2558.40	2558.30	2558.11	2557.96	2557.84	2557.46	2556.82	2557.12	2557.05		2557.8	2557.96	2558.4	2556.82	1.58
227-II-D-161	1026492.32	988482.25	2561.64	2558.37	2558.24	2558.07	2558.00	2557.94	2557.90	2557.81	2557.58	2556.84		2558.78	2555.86	2557.76	2557.94	2558.78	2555.86	2.92
227-II-D-165	1026474.42	988740.21	2558.85	2558.20	2558.52	2558.25	2558.14	2558.07	2557.01	2556.00	2555.72	2554.93	2555.23	2555.41	2555.16	2556.72	2556.51	2558.52	2554.93	3.59
227-II-D-186	1026605.20	990159.48	2568.03	2546.68	2546.80	2545.69	2546.29	2548.55	2548.58	2546.80	2545.88					2546.91	2546.74	2548.58	2545.69	2.89
227-II-D-187	1025988.25	990226.32	2567.08	2548.48	2548.65	2543.94	2544.10	2544.22	2548.20	2544.60	2544.07			2549.23	2549.69	2546.52	2546.4	2549.69	2543.94	5.75
227-II-D-273	1025603.45	989399.56	2566.27	2546.47	2545.94	2546.25	2548.25	2546.09	2546.16	2546.23	2545.77	2544.92	2543.87	2544.36	2544.55	2545.74	2546.02	2548.25	2543.87	4.38
227-II-D-312	1024096.88	986605.25	2573.33									2545.14				2545.14	2545.14	2545.14	2545.14	0
227-II-D-321	1024099.02	987687.42	2566.27	2546.58	2546.85	2546.64	2546.40	2546.45	2546.63	2546.70	2546.52	2545.79	2546.42	2546.62	2546.32	2546.49	2546.55	2546.85	2545.79	1.06
227-II-D-347	1024124.47	991264.48	2563.43									2539.26	2533.01			2536.14	2536.14	2539.26	2533.01	6.25
227-II-D-384	1024010.00	991180.02	2564.11									2539.69	2539.68			2539.69	2539.69	2539.69	2539.68	0.01
227-II-D-431	1022320.00	987844.00	2562.95	2545.07	2546.05	2545.90	2545.86	2545.94	2545.96	2545.94	2545.78	2545.2	2545.68	2545.75	2545.81	2545.75	2545.84	2546.05	2545.07	0.98
227-II-D-439	1023119.00	989486.95	2562.19										2539.07			2539.07	2539.07	2539.07	2539.07	0
227-II-D-600	1027740.00	990015.00	2566.87	2547.58	2548.00	2548.20	2548.06	2548.01	2547.73	2547.96	2547.11		2544.38		2546.28	2547.33	2547.85	2548.2	2544.38	3.82
227-II-D-609	1027823.01	989343.34	2570.72	2559.57	2557.75	2558.86	2558.48	2558.91	2558.88	2559.05	2558.75	2558.18	2558.17		2558.05	2558.6	2558.75	2559.57	2557.75	1.82
227-II-D-613	1027256.70	989323.51	2568.57										2548.04			2548.04	2548.04	2548.04	2548.04	0
227-II-D-614	1027036.39	989879.46	2568.49										2546.19			2546.19	2546.19	2546.19	2546.19	0
227-II-D-663	1026108.45	990199.66	2566.56			2547.92	2547.68	2547.61		2548.05	2547.66					2547.78	2547.68	2548.05	2547.61	0.44
227-II-D-724	1023328.41	989060.06	2563.80	2533.76		2533.98	2533.59	2533.37	2533.05	2533.15	2532.18	2531.76	2531.79	2531.43	2531.61	2532.7	2533.05	2533.98	2531.43	2.55
227-II-D-727	1023528.57	988917.04	2564.04	2535.35		2535.18	2535.06	2535.71	2534.74	2535.61		2533.39	2533.91		2533.62	2534.73	2535.06	2535.71	2533.39	2.32
227-II-D-785	1027404.40	992188.87	2572.98										2547.28			2547.28	2547.28	2547.28	2547.28	0
227-IV-B-033	1019850.00	990911.00	2555.22									2527.52				2527.52	2527.52	2527.52	2527.52	0
227-IV-B-033	1019845.75	990911.06	2555.22	2530.97	2528.27	2529.46	2533.15	2529.26	2529.30	2530.92	2530.92		2528.5	2531.02	2530.22	2530.18	2530.22	2533.15	2528.27	4.88
227-IV-B-034	1019694.91	991117.24	2555.09	2531.09	2528.28	2528.06			2527.07	2531.11			2524.09			2528.28	2528.17	2531.11	2524.09	7.02
227-IV-B-041	1019274.57	991847.48	2553.32	2532.06	2532.59	2532.10	2532.26	2531.51	2531.85	2532.86	2531.02	2530.2	2529.49	2532.29	2530.68	2531.58	2531.96	2532.86	2529.49	3.37
227-IV-B-347	1019502.85	992049.28	2554.17										2530.63			2530.63	2530.63	2530.63	2530.63	0

*** Datos BDHI

FONTE: MARTINEZ, (1993)

ANEXO 1. NIVEIS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA, ANO 1995

	NORTE	ESTE	COTA	1995									media	mediana	maximo	minimo	variação
				MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AUG	SET	OUT	NOV					
227-II-B-085	1030960.60	993765.00	2580.62				2567.76	2568.10	2568.10	2567.88	2568.09	2567.96	2567.98167	2568.025	2568.1	2567.76	0.34
227-II-B-103	1030389.25	995821.54	2571.37	2554.82	2554.47	2554.64	2554.80	2554.81	2554.81	2554.90	2554.89	2554.83	2554.77444	2554.81	2554.9	2554.47	0.43
227-II-B-195	1032826.54	997376.45	2579.94	2560.57	2560.80	2561.20	2561.21	2561.03	2561.03	2560.68	2561.01	2561.04	2560.95222	2561.03	2561.21	2560.57	0.64
227-II-D-011	1029276.89	990012.54	2576.94	2551.09		2550.43		2550.43	2550.43	2550.14	2550.14	2550.91	2550.51	2550.43	2551.09	2550.14	0.95
227-II-D-020	1029699.90	990915.45	2578.74	2549.44	2549.30	2549.31	2549.27	2549.17	2549.17	2549.12	2547.88	2546.69	2548.81667	2549.17	2549.44	2546.69	2.75
227-II-D-084	1027722.25	988231.49	2575.41	2545.96	2545.23	2545.19	2545.49	2545.23	2545.23	2544.64	2544.88	2544.68	2545.17	2545.23	2545.96	2544.64	1.32
227-II-D-103	1027040.00	989435.00	2568.58									2542.29	2542.29	2542.29	2542.29	2542.29	
227-II-D-187	1025988.25	990226.32	2567.08			2545.66	2545.78	2545.47	2545.47		2545.45	2545.51	2545.55667	2545.49	2545.78	2545.45	0.33
227-II-D-230	1024610.63	988645.49	2564.44	2540.59		2540.78	2540.65	2540.71	2540.71	2540.79	2540.71	2540.28	2540.6525	2540.71	2540.79	2540.28	0.51
227-II-D-273	1025603.45	989399.56	2566.27	2546.32	2546.32	2546.98	2547.08	2546.78	2546.78	2546.29	2546.54	2546.69	2546.64222	2546.69	2547.08	2546.29	0.79
227-II-D-297	1025047.69	991535.87	2566.69	2541.34	2543.41	2543.59	2542.87	2543.63	2543.63		2546.84	2546.99	2544.0375	2543.61	2546.99	2541.34	5.65
227-II-D-321	1024099.02	987687.42	2566.27	2543.74	2544.36	2544.70	2544.88	2544.91	2544.91	2545.01	2544.91	2544.82	2544.69333	2544.88	2545.01	2543.74	1.27
227-II-D-439	1023119.00	989486.95	2562.19	2539.06	2538.69	2539.64	2539.86	2539.94	2539.94	2539.84	2539.76		2539.59125	2539.8	2539.94	2538.69	1.25
227-II-D-749	1024726.11	992870.68	2556.1/25	2535.08	2535.67	2534.43		2536.53	2536.53	2537.98	2537.90	2536.95	2536.38375	2536.53	2537.98	2534.43	3.55
227-IV-B-347	1019502.85	992049.28	2554.17	2529.77	2531.92	2532.60	2532.30	2531.77	2531.77		2531.57	2531.60	2531.6625	2531.77	2532.6	2529.77	2.83

FONTE: GARCIA MARTINEZ, (1996)

ANEXO 1. NÍVEIS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA, ANOS 1998-1999

	NORTE	ESTE	COTA	1998			1999	média	mediana	máximo	mínimo	variação
				JULHO	AUG-SET	NOV	MARÇO					
227-II-B-				2550.58	2550.50	2551.08	2557.38	2552.385	2550.83	2557.38	2550.5	6.88
227-II-B-046	1030313.31	991295.50	2600.32	2563.77	2562.16	2562.64	2563.33	2562.975	2562.985	2563.77	2562.16	1.61
227-II-B-048	1030520.00	991890.00	2631.00	2577.58	2577.57	2577.63	2576.97	2577.4375	2577.575	2577.63	2576.97	0.66
227-II-B-077	1030870.00	994525.00		2553.52	2552.80	2552.21	2552.27	2552.7	2552.535	2553.52	2552.21	1.31
227-II-B-089	1031220.00	993210.00		2502.84	2502.96	2503.42	2504.23	2503.3625	2503.19	2504.23	2502.84	1.39
227-II-B-101	1030550.00	995630.00		2553.94	2554.45		2554.21	2554.2	2554.21	2554.45	2553.94	0.51
227-II-B-103	1030389.25	995821.54	2571.37	2553.39	2553.95	2553.42	2555.03	2553.9475	2553.685	2555.03	2553.39	1.64
227-II-B-146	1031400.00	997287.00	2577.32	2552.53	2554.82	2555.75	2555.6	2554.675	2555.21	2555.75	2552.53	3.22
227-II-B-157	1030800.00	998425.00		2583.3	2582.86	2583.51	2583.84	2583.3775	2583.405	2583.84	2582.86	0.98
227-II-B-170	1032150.00	998300.00		2551.49	2551.71	2553.05	2552.05	2552.075	2551.88	2553.05	2551.49	1.56
227-II-B-176	1032485.45	997913.25	2578.76	2554.9	2554.96	2555.41	2556.79	2555.515	2555.185	2556.79	2554.9	1.89
227-II-B-181	1032430.00	998825.00		2555.94	2555.90	2556.95	2556.83	2556.405	2556.385	2556.95	2555.9	1.05
227-II-B-195	1032826.54	997376.45	2579.94	2554.96	2554.86	2554.69	2554.39	2554.725	2554.775	2554.96	2554.39	0.57
227-II-B-202	1032480.00	997125.00		2550.66	2550.92	2551.4	2551.44	2551.105	2551.16	2551.44	2550.66	0.78
227-II-B-223	1032473.32	996925.12	2581.17	2556.71	2555.21	2555.84	2556	2555.94	2555.92	2556.71	2555.21	1.5
227-II-B-225	1034010.00	999275.00		2564.45	2563.82	2563.52	2564.25	2564.01	2564.035	2564.45	2563.52	0.93
227-II-B-231	1034600.00	998500.00		2565.43	2565.13	2565.41	2565.35	2565.33	2565.38	2565.43	2565.13	0.3
227-II-B-250	1035720.00	998990.00	2581.17	2567.98	2567.81	2567.99	2567.43	2567.8025	2567.895	2567.99	2567.43	0.56
227-II-B-251	1032778.78	995093.32	2668.91			2512.45	2513.61	2513.03	2513.03	2513.61	2512.45	1.16
227-II-D-011	1029276.89	990012.54	2576.94	2547.39	2545.22	2545.34	2545.91	2545.965	2545.625	2547.39	2545.22	2.17
227-II-D-016	1029505.23	990420.15	2577.26	2529.19	2527.03	2527.6	2527.14	2527.74	2527.37	2529.19	2527.03	2.16
227-II-D-020	1029699.90	990915.45	2578.74				2554.69	2554.69	2554.69	2554.69	2554.69	
227-II-D-084	1027722.25	988231.49	2575.41	2532.74	2532.19	2532.94	2532.91	2532.695	2532.825	2532.94	2532.19	0.75
227-II-D-103	1027040.00	989435.00	2568.58	2552.98	2544.52	2545.12	2545.41	2547.0075	2545.265	2552.98	2544.52	8.46
227-II-D-195	1026382.11	990668.33	2567.50	2549.37	2546.59	2547.11	2547.12	2547.5475	2547.115	2549.37	2546.59	2.78
227-II-D-216	1026180.00	992700.00	2558.08	2540.44	2540.60	2541.2	2550.2	2543.11	2540.9	2550.2	2540.44	9.76
227-II-D-230	1024610.63	988645.49	2564.44	2543.83	2543.21	2544.79	2544.72	2544.1375	2544.275	2544.79	2543.21	1.58
227-II-D-273	1025803.45	989399.56	2566.27	2546.7	2547.24	2548.52	2548.25	2547.6775	2547.745	2548.52	2546.7	1.82
227-II-D-297	1025047.69	991535.87	2566.69	2539.7	2542.55	2545.37	2545.39	2543.2525	2543.96	2545.39	2539.7	5.69
227-II-D-321	1024099.02	987687.42	2566.27	2543.36	2544.43	2545.65	2550.79	2546.0575	2545.04	2550.79	2543.36	7.43
227-II-D-358	1023600.15	986923.25	2565.85	2537.45	2536.27	2536.76	2535.78	2536.565	2536.515	2537.45	2535.78	1.67
227-II-D-360	1023519.67	987065.32	2566.38	2542.27	2541.09	2541.83	2541.57	2541.69	2541.7	2542.27	2541.09	1.18
227-II-D-369	1023534.66	988571.13	2563.86	2532.41	2531.31	2532.1	2531.89	2531.8775	2531.895	2532.41	2531.31	1.1
227-II-D-439	1023119.00	989486.95	2562.19	2531.16	2530.12	2530.37	2529.83	2530.37	2530.245	2531.16	2529.83	1.33
227-II-D-446	1022080.00	990240.00	2557.32	2547.04	2544.29	2544.43	2544.42	2545.045	2544.425	2547.04	2544.29	2.75
227-II-D-586	1021133.26	991125.05	2548.05	2533.51	2533.49	2533.14	2532.27	2533.1025	2533.315	2533.51	2532.27	1.24
227-II-D-587	1029928.28	990885.58	2583.61	2546.33	2544.83	2537.46	2540.18	2542.2	2542.505	2546.33	2537.46	8.87
227-II-D-605	1028641.45	989275.21	2578.31	2532.5	2532.12	2533.13	2532	2532.4375	2532.31	2533.13	2532	1.13
227-II-D-613	1027256.70	989323.51	2568.57	2552.79	2546.36	2546.86	2548.4	2548.6025	2547.63	2552.79	2546.36	6.43
227-II-D-663	1026108.45	990199.66	2566.56	2541.94	2541.98	2542.23	2542.29	2542.11	2542.105	2542.29	2541.94	0.35
227-II-D-665	1026013.31	989915.22	2566.62	2541.58	2540.87	2540.53		2540.99333	2540.87	2541.58	2540.53	1.05
227-II-D-670	1021030.00	991905.00	2557.91	2491.73	2489.40	2489.89	2489.92	2490.235	2489.905	2491.73	2489.4	2.33
227-II-D-676	1023130.00	990750.00			2563.55	2564.03		2563.79	2563.79	2564.03	2563.55	0.48
227-II-D-749	1024726.11	992870.68	2556,1/25	2560.05	2553.49	2553.19	2553.53	2555.065	2553.51	2560.05	2553.19	6.86
227-II-D-779	1026100.00	993360.00		2544.57	2543.16	2543.93	2543.94	2543.9	2543.935	2544.57	2543.16	1.41
227-II-D-802	1026860.00	993680.00		2544.3	2543.00	2543.41	2543.32	2543.5075	2543.365	2544.3	2543	1.3
227-II-D-857	1029780.00	992880.00		2549.92	2549.64	2552.15	2551.97	2550.92	2550.945	2552.15	2549.64	2.51
227-II-D-873	1027950.00	996220.00		2555.16	2555.34	2556.73	2555.45	2555.67	2555.395	2556.73	2555.16	1.57
227-II-D-909	1029590.00	997630.00		2553.76	2552.10	2552.17	2552.2	2552.5575	2552.185	2553.76	2552.1	1.66
227-II-D-944	1020400.00	993125.00		2511.77	2511.84	2512.17	2512.15	2511.9825	2511.995	2512.17	2511.77	0.4
227-IV-B-347	1019502.85	992049.28	2554.17	2527.87	2524.65	2525.3	2524.87	2525.6725	2525.085	2527.87	2524.65	3.22
227-IV-B-389	1019180.00	994300.00		2525.84	2525.02	2525.4	2525.42	2525.42	2525.41	2525.84	2525.02	0.82

FONTE: BELTRAN ET AL. (1999)

ANEXO 2. Dados técnicos dos poços selecionados para o estudo.

POÇO	PROF	FILTROS	AQUIF.	INFORM.	PERIODO	DIFER	ERROS ENCONTRADOS		ERROS DE LOCALIZAÇÃO E COTA		ESTADÍSTICA NÍVEIS 1990-1999				COMENTÁRIO DIFERENÇA DE NÍVEIS	
	m	m			MEDICÃO	COTA (m)	COORDENADAS	COTA			maximo	minimo	média	diferença		
227-II-B-	94		s-m?		8,9						2557.38	2550.50	2552.39	6.88	variação entre 1998-1999	
227-II-B-045	38		s?		0										Valor único	
227-II-B-046	141.5	101-141,5?	g	d,	0,8,9	2.92		X			2589.52	2562.16	2568.28	27.36	variação entre 1990-1999 (> profundidade, >vazão extração)	
227-II-B-048	130	41-134,5?	m-g?	d,l	0,8,9	51.32		X	melhor coordenada CAR		2626.60	2576.97	2587.27	49.63	variação entre 1990-1999 (diferença de cotas BDHI, CAR)	
227-II-B-068	66				2				poço fora área estudada		2606.93	2602.15	2604.54	4.78	variação em 1992	
227-II-B-069a	66		s?		1.2				Sim informação na BDHI		2593.63	2592.65	2593.39	0.98	variação entre 1990-1992	
227-II-B-077	80	65-99	s	d	8,9						2553.52	2552.21	2552.70	1.31	variação entre 1998-1999	
227-II-B-079a	60		s-m?		1				Sim informação na BDHI		2566.02	2565.65	2565.82	0.37	variação em 1991	
227-II-B-085	68		s		0,1,2,5						2570.62	2564.12	2568.89	6.50	variação entre 1990-1995 (em 1990 poço de reserva)	
227-II-B-089	220	63-213	g	d	8,9						2504.23	2502.84	2503.36	1.39	variação entre 1998-1999 (>>> profundidade, >> vazão de extração)	
227-II-B-101	56		s		8,9						2554.45	2553.94	2554.20	0.51	variação entre 1998-1999	
227-II-B-103	40		s		0,1,2,5,8,9	1					2558.52	2553.39	2556.06	5.13	variação entre 1990-1999	
227-II-B-143	30		s		0,1,2						2574.81	2573.64	2574.09	1.17	variação entre 1990-1992	
227-II-B-146	30		s		8,9	3.7	ESTE	X	problemas com coordenadas		2555.75	2552.53	2554.68	3.22	variação entre 1998-1999 (diferença localização com BDHI)	
227-II-B-150	40		s		1.2						2558.55	2556.56	2557.31	1.99	variação entre 1990-1992	
227-II-B-157	71.5	58-65,5	g	d,l	0,8,9				problemas com cota		2583.84	2582.86	2583.38	0.98	variação entre 1990-1999	
227-II-B-170	40?	30-54	s	d	8,9						2553.05	2551.49	2552.08	1.56	variação entre 1998-1999	
227-II-B-175	32		s		1.2						2561.19	2558.69	2559.92	2.50	variação entre 1990-1992	
227-II-B-176	48		s		8,9	4,06**	X	X	problemas com coordenadas		2556.79	2554.90	2555.52	1.89	variação entre 1998-1999	
227-II-B-177	23.7		s		0,1,2						2560.38	2558.18	2559.30	2.20	variação entre 1990-1992	
227-II-B-181	120	37-118	m(s+g)	d,l	0,8,9						2556.95	2555.90	2556.41	1.05	(a pesar de > vazão extração, > uso diario, >profundidade, poca variação)	
227-II-B-188	40		s		0						2579.16	2579.16	2579.16		Nível estático em 1990 de 0,4m (poço muito antigo, 1963)	
227-II-B-191	48		s		0,1,2						2562.79	2559.36	2560.35	3.43	variação entre 1990-1992	
227-II-B-195	85		s		5,8,9	4.15		X			2561.21	2554.39	2559.04	6.82		
227-II-B-202	68	36-72	s	d,l	8,9						2551.44	2550.66	2551.11	0.78	variação entre 1998-1999	
227-II-B-223	70	10-73	s	d,l,pb	8,9	3.63		X			2556.71	2555.21	2555.94	1.50	variação entre 1998-1999	

POÇO	PROF	FILTROS	AQUIF	INFORM	PERÍODO	DIFER	ERROS ENCONTRADOS		ERROS DE LOCALIZAÇÃO E COTA	ESTADÍSTICA NIVELES 1990-1999				COMENTÁRIO DIFERENÇA DE NIVEIS
	m	m			MEDICAO	COTA (m)	COORDENADAS	COTA		maximo	minimo	média	diferença	
227-II-D-297	90		s		5,8,9	2,76		X		2546.99	2539.70	2543.78	7.29	
227-II-D-312	70			l	2									Valor único
227-II-D-321	75	39,6-72	s+guadu	d	0,1,2,5,8,9	0,29				2550.79	2543.36	2545.79	7.43	variação entre 1990-1999
227-II-D-347	62		s		0,2					2540.79	2533.01	2537.69	7.78	Variação entre 1990-1992
227-II-D-358	72	4-75	s	d,l	8,9	1,02				2537.45	2535.78	2536.57	1.67	variação entre 1998-1999
227-II-D-360	80	31-97	s	d,l	8,9	5,89**		X		2542.27	2541.09	2541.69	1.18	variação entre 1998-1999
227-II-D-369	290?	34-120?	s+guadu	d,l	8,9	0,8				2532.41	2531.31	2531.88	1.10	variação entre 1998-1999 (>> profundidade)
227-II-D-383	80		s		0									Valor único
227-II-D-384	70		s		2					2539.69	2539.68	2539.69	0.01	variação em 1992
227-II-D-431	80.00		s		1,2					2546.05	2545.07	2545.75	0.98	variação entre 1990-1992
227-II-D-439	75.00	43-70	s	d	0,5,8,9	1,24				2539.94	2529.06	2536.17	10.88	variação 1990-1999
227-II-D-446	95		s-m?		8,9	8,21	X	X	problemas com cota, pode corresponder à da CAR	2547.04	2544.29	2545.05	2.75	variação entre 1998-1999
227-II-D-586	125	52,6-111	s	d,l	8,9	15,9		X		2533.51	2532.27	2533.10	1.24	variação entre 1998-1999 (>> profundidade)
227-II-D-587	318	137-312	g	d,l,pb	8,9	4,06		X		2546.33	2537.46	2542.20	8.87	variação entre 1998-1999 (>>> profundidade, >> vazão de extração)
227-II-D-590	342.6	201-335	g	d,l,pb	0									Valor único, (>>>profundidade, >>> vazão de extração)
227-II-D-598	58		m-g?		0									Valor único
227-II-D-599	100	34-96	g	d,l	0									Valor único (> profundidade, > vazão de extração)
227-II-D-600	70		s		0,1,2				Não tem coordenadas	2548.20	2544.38	2547.33	3.82	variação entre 1990-1992
227-II-D-601	60		m-g?		0									Valor único (poço antigo: 1965)
227-II-D-604	52		m-g?		0									Nível diferente a poços próximos
227-II-D-605	165	29-156	g	d,l	0,8,9	4,71		X		2573.31	2532.00	2540.61	41.31	alta variação do nível 1990-1999 (> profundidade, > vazão, > uso diário)
227-II-D-609	52		s		0,1,2					2559.57	2555.72	2558.36	3.85	variação entre 1990-1992
227-II-D-612	220		g?		0									Valor único
227-II-D-613	91.5	36-72	s	d,l	0,8,9	1,48				2556.07	2546.36	2549.75	9.71	variação entre 1990-1999
227-II-D-614	50		s		2									Valor único
227-II-D-628	65		s		0									Valor único
227-II-D-663	60		s		0,1,2,8,9	2,62		X		2548.05	2541.94	2545.08	6.11	variação entre 1990-1999 (>uso diário)
227-II-D-665	280	28-236	s-m?	d,l	0,8,9	2,68		X		2552.94	2540.53	2544.83	12.41	variação entre 1990-1999 (>>>profundidade, >>>vazão de extração)
227-II-D-670	165	66-169	g	d	0,5,8,9				problemas com nível no ano 1995	2549.03	2489.40	2501.99	59.63	melhores dados, CAR, 1998
227-II-D-676	89	42-85	s-m?	d	8,9				valores diferentes em 1999	2564.03	2563.55	2563.86	0.48	variação entre 1998-1999
227-II-D-724	70	35-63	s	d,l	1,2					2533.98	2531.43	2532.70	2.55	variação entre 1990-1992
227-II-D-727	78	47-77	s	d,l	1,2					2535.71	2533.39	2534.73	2.32	variação entre 1990-1992
227-II-D-749	147.3	64,2-144,9	g?	d,pb	0,5,8,9	23,6**	NORTE	X	problemas com cota	2560.05	2534.43	2542.61	26.62	diferença de cota e coordenada X (>> profundidade)
227-II-D-779	76	64-145	s?	d	0,8,9					2544.57	2543.16	2543.90	1.41	variação entre 1990-1999
227-II-D-785	80		s		2									Valor único
227-II-D-786	82		s		0									Valor único
227-II-D-787	85		s		0									Valor único
227-II-D-802	80		s		0,8,9					2544.30	2543.00	2543.51	1.30	variação entre 1990-1999
227-II-D-857	78	30-78?	s	d,l,pb	8,9					2552.15	2549.64	2550.92	2.51	variação entre 1998-1999
227-II-D-873	120	42-117	s	d,l	0,8,9					2556.73	2555.16	2556.87	1.57	variação entre 1990-1999 (>profundidade)
227-II-D-909	35		s		0,8,9					2553.76	2552.10	2552.56	1.66	variação entre 1990-1999 (poço abandonado segundo BDHI)
227-II-D-944	250	67-251	s-g?	d,l	8,9					2512.17	2511.77	2511.98	0.40	variação entre 1998-1999 (>> profundidade)
227-IV-B-033	80		s?		1,2					2533.15	2528.27	2530.18	4.88	variação entre 1990-1992 (poço abandonado segundo BDHI)
227-IV-B-034	140		s-m?		1,2					2531.11	2524.09	2528.28	7.02	variação entre 1990-1992 (>>profundidade)
227-IV-B-041	40		s?		0,1,2					2538.32	2529.49	2532.09	8.83	variação entre 1990-1992 (poço antigo: 1965)
227-IV-B-347	90		s		5,8,9	5,17		X	problemas com cota	2532.60	2524.65	2529.74	7.95	
227-IV-B-389	132	60-127	s	d	8,9					2525.84	2525.02	2525.42	0.82	variação entre 1998-1999 (>> profundidade)

s: aquífero Neógeno-quatemário
g: aquífero Guadalupe
m: A. Gaudalupe + A. Ng-Quatemário
? Possível aquífero

Filtros: BDHI
Filtros: CAR, 1998

d: desenho construtivo
l: litologia
pb: Test de bombeamento

0 = 1990,
2 = 1992,
8 = 1998,
1 = 1991
5 = 1995
9 = 1999

BDHI Banco de Datos Hidrogeológicos de Ingeominas
CAR Corporación Automa Regional de Cundinamarca

**ANEXO 3. Dados das probas de bombeamento, e outras
informações da zona.**

ANEXO 3. Parâmetros hidráulicos dos aquíferos

Numero poço	Profun. (m)	Vazão l/s	Q/s l/s/m	Tempo Min	Nível estático (m)	Nível dinâmico (m)	K meia m/dia	Espessura (m)	T (m ² /dia)	S	unidade	Método
227-II-B-152	38	0.75	0.18	1800	20.23	24.47	1.1	7	8		Q	J,T,R
227-II-B-153	38	1.00	0.22	1800	21.43	25.91	1.5	6	10		Q	J,T,R
227-II-B-154	39	1.25	0.07	1800	19.84	36.37	0.8	9	7	5.5*10-3	Q	J,T,R
227-II-B-155	39	0.5	0.03	1800	21.75	37.09	0.4	10	4	4.5*10-5	Q	J,T,R
227-II-B-156	80	2.0	0.09	1440	14.20	37.56	1.7	8	14	4.3*10-5	Q	J,T,R
227-II-B-180	73	2.7	0.21	480	10.34	22.95	1.1	14	15.8		Q	J
227-II-B-181	120	3.33	0.24	480	12.8	28.8	2.5	24	61.2		Q+K	J
227-II-B-223	77	0.85	0.04	1492	18.3	41.43	0.4	18	7.5		Q	R
227-II-B-251	132	0.14	0.003	480	21	67.7	0.008	15	0.11		T	J
227-II-D-016	249.5	8.8	0.44	2175	+2.0	18.04	1.1	45	50	4*10-4	K	J,T,R
227-II-D-587	318	6.0	0.4	2280	0.0	12.97	3.5	77	270	3.1*10-5	K	J,T,R
227-II-D-590	342.6	21.0	0.33	700	+2.0	60.9	2.4	83	200		K	J,T,R
227-II-D-665	242	0.5	0.01	55	18.64	70	0.008	50	0.4		Q+T	J,T
227-II-D-749	147.3	2.5	0.08	1080	12.0	44.5	0.9	18	16		Q+T	J,T,R
227-II-D-844	80	5.1	0.1						22.5		Q	J
227-II-D-857	78	2.52	0.13	480	15.0	34	0.4	14	6.1		Q	J
227-II-D-943	225	7.0	0.18	1020	14.3	53	0.3	48	16.5	5.1*10-4	Q+K	J,T
227-II-D-944	250	7.0	0.13	1140	2.1	58.05	0.4	48	20		Q+K	J,T,R

Q/s: Capacidade específica
T: Transmissividade
S: Coef. de armazenamento

Q Neógeno-Quaternário
T Terciário
K Guadalupe

J Jacob
T Theis
R Recuperação

Recarga vs. descarga por captações de água subterrânea. INGEOMINAS (1990).

Unidade	Recarga calculada	Descarga calculada	Numero de dados
Quaternário	$2.1 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{ano}$	$2.9 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{ano}$	584 poços e 35 cacimbas
Guadalupe	$6 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{ano}$	$2.1 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{ano}$	21 poços e 7 mananciais

ANEXO 4. Análises preliminares de sensibilidade.

ANALISES DE SENSIBILIDADE

(COORDENADAS EM MILHARES DE METROS)

	X min	X max	Y min	Y max	Z min	Z max	Linhas	Colun	camad
1. CHICU +R SUBAC. + R. BOG.	985	1000	1025	1032	1500	3000	25	50	12
2. CHICU + RIO SUBACHOQUE	985	995.7	1025	1032	1500	3000	25	38	12
3. CHICU + RIO BOGOTA	986.5	1000	1025	1032	1500	3000	25	46	12
4. CHICU	986.5	995.7	1025	1032	1500	3000	25	33	12

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

1. CHICU +R SUBAC. + R. BOG.
2. CHICU + RIO SUBACHOQUE
3. CHICU + RIO BOGOTA
4. CHICU

DADOS ENTRADA

PROPIEDADES CONTORNO

	Conduct. (m/s)	Recarga (mm/ano)
1. CHICU +R SUBAC. + R. BOG.	Kx,Ky Kz	
NgQ	3 E-5	3 E-5 20
KTg	6.7 E-7	6.7 E-7
Ksg	2.1 E-5	2.1 E-5 218
Ksch	1.2 E-9	1.2 E-10 14
2. CHICU + RIO SUBACHOQUE		
NgQ	3 E-5	3 E-5 20
KTg	6.7 E-7	6.7 E-7
Ksg	2.1 E-5	2.1 E-5 218
Ksch	1.2 E-9	1.2 E-10 14
3. CHICU + RIO BOGOTA		
NgQ	3 E-5	3 E-5 20
KTg	6.7 E-7	6.7 E-7
Ksg	2.1 E-5	2.1 E-5 218
Ksch	1.2 E-9	1.2 E-10 14
4. CHICU		
NgQ	3 E-5	3 E-5 20
KTg	6.7 E-7	6.7 E-7
Ksg	2.1 E-5	2.1 E-5 218
Ksch	1.2 E-9	1.2 E-10 14

VAZÃO

CONTORNO

	Poços	m3/d)	Carga constante			Rios		
	Poço	Q	Filtros		Nível	Niv inic	N. Fim	Conduc
1	46	-900	141	1.9	2560	2590	2562	6 e-4
	48	-80	41-134	1.31	2550			
	590	-1815	20-335	23.11	2531	2549	2547	1 e-3
	599	-700	34-96	25.32	2526			
	605	-700	29-156					
	613	-200	36-72					
2	46	-900	141	1.9	2560			
	48	-80	41-134	1.31	2550			
	590	-1815	20-335	23.11	2531	2590	2562	6 e-4
	599	-700	34-96	25.32	2526			
	605	-700	29-156					
	613	-200	36-72					
3	46	-900	141	1.9	2560			
	48	-80	41-134	1.31	2550			
	590	-1815	20-335	23.11	2531	2549	2547	1 e-3
	599	-700	34-96	25.32	2526			
	605	-700	29-156					
	613	-200	36-72					
3	46	-900	141	1.9	2560			
	48	-80	41-134	1.31	2550			
	590	-1815	20-335	23.11	2531			
	599	-700	34-96	25.32	2526			
	605	-700	29-156					
	613	-200	36-72					

DADOS DE SAIDA

BALANÇO DE MASSA (m3/dia)

TOTAL			Z-BUG. (Aquit. Ng-Q)
INPUT	OUTPUT	OUTPUT	INPUT
73309	73309	3695	8029
62709	62709	3079	8337
69879	69879	3606	6576
59279	59279	3006	6902

EXEMPLO DE ANALISE DE SENSIBILIDAD PRELIMINAR, USANDO OS PARÂMETROS PROMEDIO DO AQUIFERO, PARA 4 CONDIÇÕES DE BORDA DIFERENTES.