

**Comportamento das Bacias Sedimentares da Região Semi -árida
do Nordeste Brasileiro
MCT/ CT-Hidro/ FINEP**

Meta Física 3.5 - Caracterização Hidrogeológica

Relatório Final

**Elaboração de Modelos - Concepção de modelos conceituais,
elaboração e calibração de modelos computacionais.**

Coordenação:

Marco Aurélio Holanda de Castro
Universidade Federal do Ceará

Colaboradores:

Carlos Roberto Moura Leal Junior
Cláudio Damasceno de Souza

Maio de 2007.
Fortaleza – CE.

ELABORAÇÃO DE MODELOS - CONCEPÇÃO DE MODELOS CONCEITUAIS, ELABORAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE MODELOS COMPUTACIONAIS.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS ÁREAS DE ESTUDO	1
2.1	Clima	1
2.2	Geologia/Geomorfologia	2
2.3	Modelos Conceituais e Domínios de Interesses	4
2.4	Modelo da área do Grabén Crato – Juazeiro (modelo I)	5
2.4.1	Entrada de dados do modelo I	6
2.4.2	Malha do modelo	6
2.4.3	Topografia e camadas do modelo I	7
2.4.4	Poços	10
2.4.5	Rios	11
2.4.6	Recarga	11
2.5	Modelo da área de Barbalha e Missão Velha (modelo II)	12
2.5.1	Entrada de dados do modelo II	12
2.5.2	Malha do modelo	13
2.5.3	Topografia e camadas do modelo II	13
2.5.4	Poços	15
2.5.5	Rios	15
2.5.6	Recarga	16
2.6	Calibração dos Modelos	17
3	RESULTADOS	17
3.1	Modelo I	17
3.1.1	Estado permanente para o período chuvoso	17
3.1.2	Estado transiente para o período chuvoso	21
3.1.3	Estado transiente para o período seco	26
3.2	Calibração (modelo I)	31
3.3	Modelo II	36
3.3.1	Estado permanente para o período chuvoso	36
3.3.2	Estado transiente para o período chuvoso	43
3.3.3	Estado transiente para o período seco	50
3.4	Calibração (modelo II)	57
4	CONCLUSÕES	68
5	RECOMENDAÇÕES	70
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

LISTA DE FIGURAS

Figura1.	Mapa geológico da área de estudo. No contorno azul está a área do primeiro modelo gerado Fonte: Modificado GOLDER/PIVOT, 2005.	4
Figura2.	Área I de estudo delimitada pelos contornos utilizados no modelo conceitual.	5
Figura3.	Curvas de nível na área do modelo I de 40 e m 40 metros.	7

Figura4.	Área de estudo com o posicionamento das seções geológicas e os pontos onde foram retirados a altimetria das camadas para formação das camadas do modelo.	8
Figura5.	Seção geológica I com as formações da área de estudo. Fonte: Modificado GOLDER/PIVOT, 2005.	9
Figura6.	Seção geológica II com as formações da área de estudo. Fonte: Modificado GOLDER/PIVOT, 2005.	9
Figura7.	Seção geológica III com as formações da área de estudo. Fonte: Modificado GOLDER/PIVOT, 2005.	10
Figura8.	Distribuição das formações no modelo I gerado pelo PMWIN.	10
Figura9.	Localização da área de estudo em contorno preto ao sul do estado do Ceará. Fonte: Modificado da COGERH.	13
Figura10.	Curvas de nível na área do modelo II de 30 em 30 metros.	14
Figura11.	Distribuição das camadas do modelo II.	14
Figura12.	Visualização dos Rios limitantes nas células do PMWIN.	15
Figura13.	Vetores de fluxo e variação das linhas equipotenciais, de 5,0 em 5,0 metros, para a camada 1 no estado permanente chuvoso.	18
Figura14.	Fluxo na camada 2, e curvas potenciométricas de 5,0 em 5,0 metros no estado permanente chuvoso.	19
Figura15.	Fluxo na camada 3, e curvas potenciométricas de 5,0 em 5,0 metros no estado permanente chuvoso..	19
Figura16.	Fluxo na camada 4, e curvas potenciométricas de 5,0 em 5,0 metros no estado permanente chuvoso..	20
Figura17.	Fluxo na camada 5, e curvas potenciométricas de 0,01 em 0,01 metros no estado permanente chuvoso..	20
Figura18.	Balanço hídrico do modelo no cenário de regime permanente chuvoso.	21
Figura19.	Vetores de fluxo Variação das linhas equipotenciais, de 10 em 10 metros, para a camada 1 no estado transiente chuvoso.	23
Figura20.	Fluxo na camada 2, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente chuvoso.	24
Figura21.	Fluxo na camada 3, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente chuvoso.	24
Figura22.	Fluxo na camada 4, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 me tros, no estado transiente chuvoso.	25
Figura23.	Fluxo na camada 5, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente chuvoso.	25
Figura24.	Balanço hídrico do modelo no regime transiente para o período chuvoso.	26
Figura25.	Vetores de fluxo e variação das linhas equipotenciais, de 5 em 5 metros, pa ra a camada 1 no estado transiente seco.	28
Figura26.	Fluxo na camada 2, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente seco.	29
Figura27.	Fluxo na camada 3, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente seco.	29
Figura28.	Fluxo na camada 4, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente seco.	30
Figura29.	Fluxo na camada 5, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente seco.	30
Figura30.	Balanço hídrico do modelo no regime transiente para o período seco.	31
Figura31.	Linhas potenciométricas de 20 em 20 m, geradas a partir do nível está tico de 76 poços com dados fornecidos pela COGERH.	32

Figura32.	Distribuição dos 76 poços, com nível estático medido, fornecidos pela COGERH.	
	32	
Figura33.	Linhas potenciométricas de 2 em 2 m, geradas a partir do nível estático de 12 poços com dados fornecidos pela CPRM.	33
Figura34.	Distribuição dos 12 poços, com nível estático medido, fornecidos pela COGERH.	
	33	
Figura35.	Curva da raiz do erro quadrático médio (RMSEH) em relação às cargas calculadas e observadas (todas as células ativas) versus as iterações (Dados COGERH).	34
Figura36.	Curva da média dos ângulos ϕ entre os gradientes das cargas calculados e observados (todas as células ativas) versus as iterações (Dados COGERH).	35
Figura37.	Curva da raiz do erro quadrático médio (RMSEH) em relação às cargas calculadas e observadas (todas as células ativas) versus as iterações (Dados CPRM).	35
Figura38.	Curva da média dos ângulos ϕ entre os gradientes das cargas calculados e observados (todas as células ativas) versus as iterações.	36
Figura39.	Linhas equipotenciais, na camada 1, de 10 em 10 metros para o estado permanente chuvoso.	37
Figura40.	Linhas de fluxo na camada 1 para o estado permanente chuvoso.	38
Figura41.	Fluxo na camada 2, e curvas potenciométricas de 10 em 10 metros, para o período chuvoso e estado permanente.	39
Figura42.	Fluxo na camada 3, e curvas potenciométricas de 10 em 10 metros, para o período chuvoso e estado permanente.	40
Figura43.	Fluxo na camada 4, e curvas potenciométricas de 1 em 1 metro, para o período chuvoso e estado permanente.	41
Figura44.	Fluxo na camada 5, e curvas potenciométricas de 0.001 em 0.001 metro, para o período chuvoso e estado permanente.	42
Figura45.	Balço hídrico para o regime permanente chuvoso.	43
Figura46.	Linhas equipotenciais na camada 1, de 10 em 10 metros na 1ª camada, para o período chuvoso e estado transiente.	45
Figura47.	Linhas Vetores de fluxo na camada 1, para o período chuvoso e estado transiente.	46
Figura48.	Direção do Fluxo na camada 2, e curvas potenciométricas de 10 em 10 metros, para o período chuvoso e estado transiente.	47
Figura49.	Direção do Fluxo na camada 3, e curvas potenciométricas de 5,0 em 5,0 metros, para o período chuvoso e estado transiente.	48
Figura50.	Direção do Fluxo na camada 4, e curvas potenciométricas de 0.0001 em 0.0001 metros, para o período chuvoso e estado transiente.	49
Figura51.	Direção do Fluxo na camada 5, e curvas potenciométricas de 0.0001 em 0.0001 metros, para o período chuvoso e estado transiente.	50
Figura52.	Fluxo na camada 1 de 10 em 10 metros, para o período seco e estado transiente.	52
Figura53.	Vetores de fluxo na camada 1, para o período seco e estado transiente.	53
Figura54.	Direção do Fluxo na camada 2, e curvas potenciométricas de 10 em 10 metros, para o período seco e estado transiente.	54
Figura55.	Direção do Fluxo na camada 3, e curvas potenciométricas de 5,0 em 5,0 metros, para o período seco e estado transiente.	55
Figura56.	Direção do Fluxo na camada 4, e curvas potenciométricas de 0.0001 em 0.0001 metros, para o período seco e estado transiente.	56
Figura57.	Direção do Fluxo na camada 5, e curvas potenciométricas de 0.0001 em 0.0001 metros, para o período seco e estado transiente.	57
Figura58.	Distribuição dos poços medidos pela CPRM.	58

Figura59.	Linha potenciométrica observadas de 3 em 3 metros para a região de estudo.	59
Figura60.	Linha potenciométrica observadas em azul (2 em 2 metros) e calculadas em vermelho (4 em 4 metros).	60
Figura61.	Curva da raiz do erro quadrático médio (RMSEH) em relação às cargas calculadas e observadas versus o número de iterações com os poços da CPRM.	60
Figura62.	Curva da soma dos ângulos ϕ entre os gradientes das cargas calculadas e observadas versus o número de iterações com os poços da CPRM.	61
Figura63.	Linha potenciométrica observadas em azul (2 em 2 metros) e calculadas em vermelho (4 em 4 metros) na quarta iteração.	62
Figura64.	Valores de condutividade hidráulica obtidos através do MIGHA, visualizado no PMWIN.	63
Figura65.	Distribuição dos poços da COGERH na área de estudo.	64
Figura66.	Linha potenciométrica observadas de 3 em 3 metros a partir dos dados da COGERH para a região de estudo.	65
Figura67.	Curva da raiz do erro quadrático médio (RMSEH) em relação às cargas calculadas e observadas versus o número de iterações com os poços da COGERH.	66
Figura68.	Curva da média dos ângulos ϕ entre os gradientes das cargas calculadas e observadas versus o número de iterações com os poços da COGERH.	66
Figura69.	Linha potenciométrica observadas de 3 em 3 metros e calculadas de 4 em 4 metros a partir dos dados da COGERH na 4ª iteração.	67
Figura70.	Valores de condutividade hidráulica obtidos através do MIGHA, na 4ª iteração para os poços da COGERH, visualizado no PMWIN.	68

LISTA DE QUADROS

Quadro1.	Coluna estratigráfica da bacia do Araripe no Ceará. Fonte: Veríssimo (1999).	3
Quadro2.	Sistemas aquíferos na área de trabalho. Fonte: DNPM (1996)	6
Quadro3.	Parâmetros Hidrogeológicos para as unidades hidroestratigráficas que compõem os sistemas aquíferos da área de trabalho. Fonte: (1)SUDENE (1967); (2)DNPM (1996); (3)IPLANCE (1997); (4)DOMENICO & SCHWARTZ (1997); (5)ANJOS (2000); (6)MENDONÇA (2001); (7)KIMURA (2003)	6
Quadro4.	Balanço hídrico do Posto Crato em Crato, Latitude 07° 13' S, Longitude 39° 23' W, altitude 421 m.	11
Quadro5.	Balanço hídrico do Posto Juazeiro do Norte em Juazeiro do Norte, Latitude 07° 23' S, Longitude 39° 23' W, altitude 650 m.	12
Quadro6.	Valores médios das cotas da área adjacente à área deste estudo e espessuras das camadas adotadas para a modelagem.	14
Quadro7.	Balanço hídrico do Posto Missão Velha, com Latitude 07° 15' S, Longitude 39° 09' W, e altitude de 352 m.	16
Quadro8.	Resumo do balanço hídrico do posto de Missão Velha.	17
Quadro9.	Características da simulação do estado permanente chuvoso para o modelo I.	17
Quadro10.	Balanço hídrico calculado pelo modelo, Simulação 1 em regime permanente	21
Quadro11.	Características da simulação do estado transiente chuvoso para o modelo I.	21
Quadro12.	Balanço hídrico calculado pelo modelo, Simulação 2 em regime transiente período chuvoso.	26
Quadro13.	Características da simulação do estado transiente seco para o modelo I.	26
Quadro14.	Balanço hídrico calculado pelo modelo, em regime transiente período seco	31
Quadro15.	Características da simulação do estado permanente chuvoso para o modelo II.	36
Quadro16.	Velocidades médias das camadas para estado estacionário chuvoso.	36

Quadro17.	Balanço Hídrico feito pelo PMWIN para simulação no estado estacionário.	42
Quadro18.	Características da simulação do estado transiente chuvoso para o modelo II.	43
Quadro19.	Velocidades médias das camadas para estado transiente chuvoso.	44
Quadro20.	Algumas características para a simulação no estado transiente seco.	50
Quadro21.	Velocidades médias das camadas para estado transiente seco.	51

SIGLAS E ABREVIATURAS

CAGECE	-	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
COGERH	-	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará
CPRM	-	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPLANCE	-	Fundação Instituto de Planejamento do Ceará
MIGHA	-	Método Iterativo do Gradiente Hidráulico
PMWIN	-	Processing Modflow para Windows
PROASNE	-	Projeto Água Subterrânea no Nordeste do Brasil
RMSEH	-	Erro quadrático médio
SUDENE	-	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
UFC	-	Universidade Federal do Ceará

1 INTRODUÇÃO

A simulação computacional sobre os recursos hídricos, em qualquer parte de seu ciclo, é um procedimento essencial para a fase do planejamento contido em um processo de gestão das águas e/ou ambiental, uma vez que os resultados de uma modelagem numérica podem fornecer subsídios para a análise de projetos e tomadas de decisões. No que concerne às águas subterrâneas é importante a realização de estudos que determinem o fluxo e o potencial hídrico e de pesquisas que ajudem a produzir ferramentas que permitam verificar e difundir soluções para a determinação de parâmetros hidrodinâmicos de um sistema hidrogeológico, já que o regime hidrológico, em diversas bacias no Brasil, é fortemente influenciado pela regularização exercida pelos aquíferos.

O semi-árido do nordeste brasileiro tem em sua maioria rios e riachos de caráter intermitente. A exploração das águas através de cacimbas e poços é uma atividade realizada em grande parte na região. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000) estima que mais de 8 milhões de nordestinos, em seus domicílios particulares permanentes, utilizam poços ou nascentes, na propriedade, para servir-se da água.

O desenvolvimento da agricultura e da indústria e o aumento populacional na região do Cariri cearense é um fator que vem aumentando para a extração de águas subterrâneas dos aquíferos que estão sob a região. No entanto, a exploração desordenada pode vir a comprometer o nível freático. Daí a importância da realização de estudos com modelos computacionais que ajudem a sistematizar informações de campo que podem alertar sobre conseqüências que estão e que serão realizadas sobre os recursos hídricos subterrâneos.

As águas subterrâneas caracterizam-se diferente das águas superficiais, por esta serem imediatamente exploráveis e qualquer alteração que sofram é prontamente perceptível. Uma outra concepção diversa referente aos estudos e quantificação, é que as águas superficiais dependem somente de características geométricas, como batimetria, topografia e nível d'água, já as águas subterrâneas tornam-se mais complexas porque, além da topografia e do conhecimento do nível d'água, exigem estudos com dados da geologia do local (feitos por levantamentos geofísicos), e dos parâmetros hidrogeológicos da camada de cada aquífero, principalmente da condutividade hidráulica.

O conhecimento do comportamento do fluxo hídrico subterrâneo e dos parâmetros hidrodinâmicos de um sistema aquífero vem ganhando uma importância cada vez maior na medida em que há um cenário de aumento do uso dos recursos hídricos pelo desenvolvimento das atividades de agricultura e de indústria, pela crescente populacional e pela pouca disponibilidade das águas superficiais em certas estações no ano, no caso das regiões semi-áridas, como no nordeste brasileiro.

2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS ÁREAS DE ESTUDO

Os aspectos do meio físico nesse item são relatos nas pesquisas bibliográficas de estudos feitos sobre a região.

2.1 Clima

O sul do estado do Ceará está inserido na região fisiográfica do sertão, apresentando um clima semi-árido, tendo classificação climática como sendo de clima seco sub-úmido (IPLANCE, 1997). A umidade relativa do ar, na cidade de Barbalha, ao qual faz parte da área de estudo, apresenta uma média anual de 64%, chegando ao mínimo nos meses de agosto (53%) e

setembro (49%) e atingindo média máxima no mês de março (80%). A temperatura nesta cidade apresenta uma média anual de 25,4 °C, com mínimas médias no mês de junho (23 °C) e máximas no mês de novembro (27,7°C) (Costa et al. 1998; IPLANCE, 1997).

Pela proximidade com a linha do equador e devido à baixa latitude, o estado do Ceará apresenta regime térmico bastante uniforme. Pela incidência solar praticamente vertical ao longo do ano ocorrem baixas amplitudes térmicas estabilizando assim a temperatura e impedindo uma diferenciação nas estações climáticas (Costa et al. 1998; IPLANCE, 1997). A insolação na região do Cariri apresenta valores elevados. O total anual de insolação da região é de 2.848 horas. A média mais elevada ocorre em setembro (276,4 horas) e a média mais baixa ocorre em fevereiro (191,9 horas) (Golder/Pivot, 2005b).

A precipitação pluviométrica anual no município de Barbalha apresenta uma média de 1.032,7 milímetros. No município de Juazeiro do Norte a precipitação média é mais elevada (1189 mm). Ao analisar toda a região do Cariri, a média estimada fica em torno de 920 milímetros/ano.

2.2 Geologia/Geomorfologia

A bacia do Araripe está implantada sobre a Zona Transversal de Dobramentos da Província Borborema (VERÍSSIMO, 1999).

A chapada do Araripe (Zona de Chapada) caracteriza-se por uma superfície plana, equivalente com a sua composição geológica (PONTE & PONTE FILHO, 1996). Limita-se em toda sua extensão por escarpas erosivas (Zona de Talude), relacionando-se através de rampas com o Vale do Cariri (Zona de Pediplano ou Depressão Sertaneja) na parte norte. Constitui-se de rochas sedimentares do Cretáceo, onde na porção superior dominam os arenitos e siltitos da Formação Exu. As altitudes na chapada variam entre 700 a 1.000 metros. A ausência de drenagem no topo da chapada está diretamente associada ao solo arenoso e bastante homogêneo que a recobre (VERÍSSIMO, 1999).

A coluna estratigráfica da bacia é formada pela Formação Mauriti (SDm); Grupo Vale do Cariri - formações Brejo Santo (JBs) e Missão Velha (Jmv); Formação Abaiara (Kab); Grupo Araripe - formações Rio da Batateira (Krb), Santana (Ks), Arajara (Kar) e Exu (Ke), e Depósitos Cenozóicos Tércio/Quaternários. A tabela 1 sumariza as informações sobre a estratigrafia de toda a bacia do Araripe.

A ocorrência dos sistemas geológicos na região do Cariri caracteriza-se pela Zona de Chapada, a Zona de Talude e a Zona de Pediplano.

A Zona de Chapada apresenta relevo tipicamente tabular, com elevações em torno de 900 metros e sustentado pelos arenitos da Formação Exu. Constitui-se na porção topográfica mais elevada da região. A ausência quase total de drenagem no topo da chapada está diretamente associada ao solo arenoso que a recobre. É limitada em quase toda sua extensão por escarpas abruptas, de contornos irregulares que chegam a ultrapassar 300 metros e expõem rochas da Formação Santana (Golder/Pivot, 2005).

A Zona de Talude inclui a zona de encosta e pé-de-serra, onde afloram as unidades litológicas das formações Arajara e Santana. O solo derivado dessa associação litológica é de baixa acidez, espesso, pouco permeável e muito fértil, permitindo o desenvolvimento de uma drenagem relativamente densa e ramificada. No contato entre as formações Exu e Arajara e ainda nesta última formação existem exutórios naturais de água (fontes). A disposição das camadas orientadas para leste favorece a ocorrência de surgências, sobretudo nas encostas do

Estado do Ceará, responsáveis pela perenidade dos rios na depressão sertaneja. (Golder/Pivot, 2005).

Quadro1. Coluna estratigráfica da bacia do Araripe no Ceará. Fonte: Veríssimo (1999).

ERA	PERÍODO	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA
CENOZÓICA	<u>QUATERNÁRIO</u>	-	Aluviões	<i>Areia e cascalho</i>
	<u>TERCIÁRIO</u>		Coberturas Arenosas	<i>Lateritas, arenitos e argilitos</i>
			Depósito de Tálus	<i>Sedimentos das formações Arajara e Santana</i>
MESOZÓICA	<u>CRETÁCEO SUPERIOR</u>	ARARIPE	Exu	<i>Arenitos argilosos, de granulometria variável, com leitos intercalados de arenitos grosseiros.</i>
			Arajara	<i>Arenitos finos, argilosos ou cauliniticos e siltitos amarelo, estratificados.</i>
			Santana	<i>Margas e folhelhos cinza, calcários, gipsita e anidrita</i>
			Rio da Batateira	<i>Arenitos médios a grosseiros, mal classificados, argilosos e siltitos cinza.</i>
	<u>CRETÁCEO INFERIOR</u>	VALE DO CARIRI	Abaiara	<i>Arenitos argilosos intercalados com siltitos e folhelhos castanhos</i>
	<u>JURÁSSICO</u>		Missão Velha	<i>Arenitos brancos, grosseiros, friáveis, mal selecionados, contendo madeira fóssil.</i>
Brejo Santo			<i>Folhelhos e siltitos variegados, com intercalações de arenitos finos, argilosos.</i>	
PALEOZÓICA	<u>SILURO-DEVONIANO</u>		Mauriti	<i>Arenitos quartzosos, grosseiros a médios, com estratificação cruzada.</i>
PRÉ-CAMBRIANO				<i>Granitos, migmatitos, gnaisses, etc.</i>

A Zona de Pediplano (ou Depressão Sertaneja) corresponde à porção de relevos suaves e pouco dissecados, caracterizada por morros alongados intercalados por vales amplos de fundo plano, com cotas médias de aproximadamente 400 metros. Neste domínio geomorfológico ocorrem exposições de rochas das demais formações da Bacia do Araripe: Rio da Batateira, Abaiara, Missão Velha, Brejo Santo e Mauriti. (Golder/Pivot, 2005).

As duas áreas de estudo escolhida para os modelos tem como parte Sul a Zona de talude e situa-se quase que totalmente na Zona de Pediplano, região conhecida como Vale do Cariri. Abaixo o mapa geológico das áreas de trabalho.

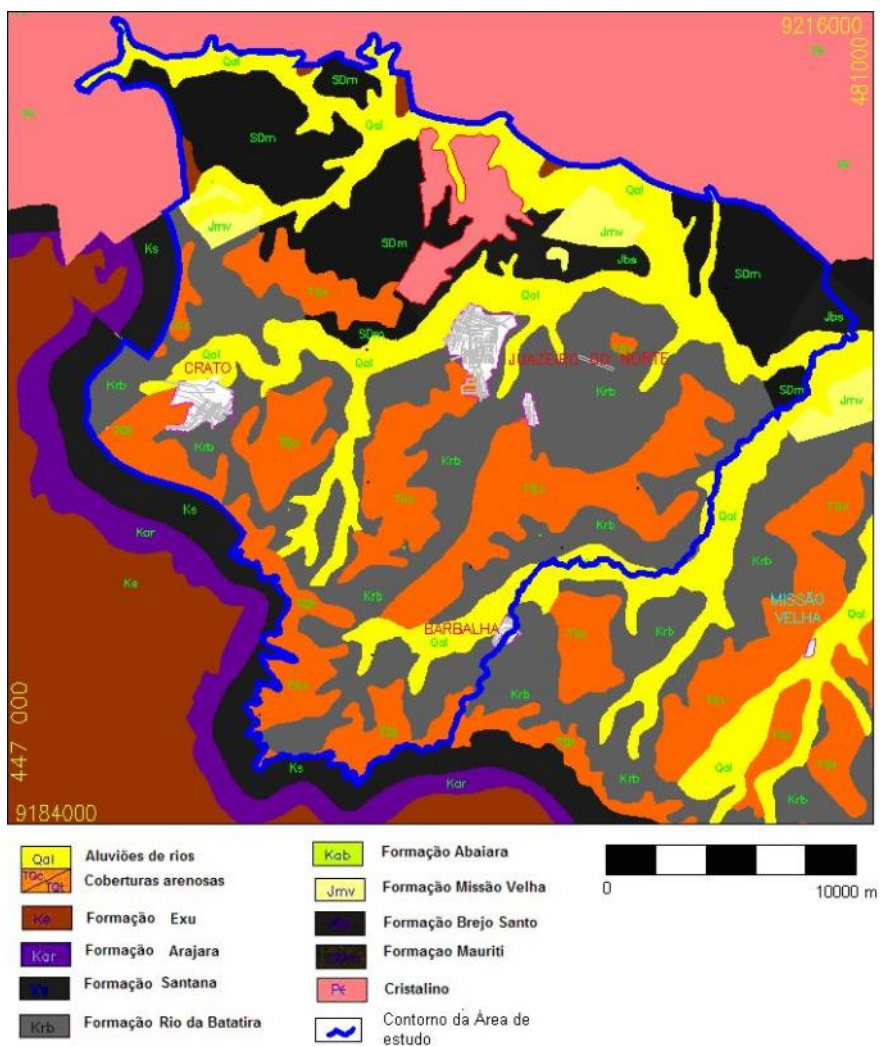


Figura1. Mapa geológico da área de estudo. No contorno azul está a área do primeiro modelo gerado
Fonte: Modificado GOLDER/PIVOT, 2005.

2.3 Modelos Conceituais e Domínios de Interesses

As modelagens foram realizadas em duas áreas adjacentes que estão dentro do vale do Cariri. Para uma avaliação hidrogeológica é preciso definir fronteiras mais representativa, embasadas nos contornos hidrográficos da região ou em outras e estruturas reconhecidas, que permitam definir todo domínio de contribuição hidrogeológica. As definições das áreas para a realização da modelagem do fluxo hídrico subterrâneo consistiram, primeiramente, na aquisição de dados necessários para a simulação, como dados de medições de nível estático nos poços, vazões dos poços, mapas contendo topografia, hidrografia e definições dos sistemas de aquíferos da bacia sedimentar do Cariri.

Com a superposição dos mapas de topografia, hidrografia, e das características geológica da região com os mapas digitalizados da locação dos poços foi definida as 2 áreas para a realização da simulações.

O modelo utilizado para as simulações do fluxo hídrico subterrâneo foi o MODFLOW, pacote contido no programa Processing Modflow Pr o uma versão avançada do Processing Modflow

para Windows. O Processing Modflow Pro suporta além do MODFLOW-2000, os seguintes pacotes MODFLOW-88/96/2000, MT3D, MT3DMS, MT3D99, RT3D, MOC3D, PMPATH, UCODE, E PEST-ASP. Os pacotes de estimação de parâmetros estão contidos em MODFLOW-2000, PEST-ASP e UCODE.

2.4 Modelo da área do Grabén Crato – Juazeiro (modelo I)

A primeira área de estudo é dividida em dois sistemas de aquífero, Médio e Inferior, constituída por cinco camadas e o embasamento cristalino no sistema A aquífero Médio e uma camada no sistema e o embasamento cristalino no sistema Aquífero Inferior. A sua geometria perfaz uma área de 992 km², com altitudes que variam de 399 metros acima do nível médio do mar a 1299 metros abaixo do nível médio do mar. É mostrada na Figura 1 a área com os sistemas de aquíferos divididos pela linha em verde.

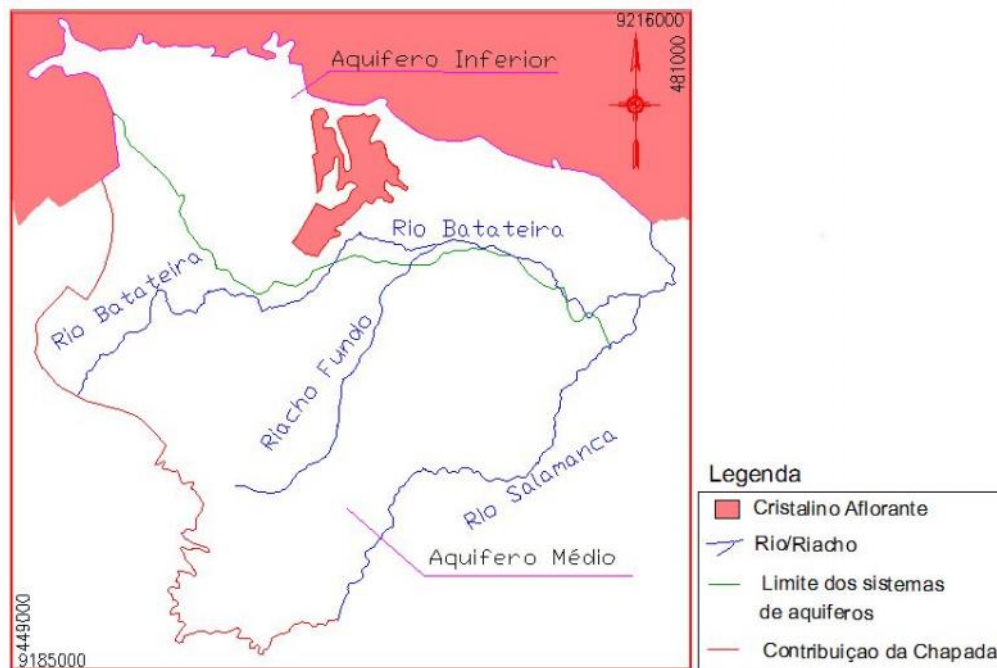


Figura2. Área I de estudo delimitada pelos contornos utilizados no modelo conceitual.

Em termos hidrogeológicos, para os sistemas de aquífero Médio e Inferior, as formações Rio da Batateira, Abaiara, Missão Velha, e Mauriti comportam -se, de modo geral, como unidades aquíferas (DNPM, 1996), enquanto a formação Brejo Santo se comporta predominantemente como aquífero (e.g. KIMURA, 2003). Assim a divisão hidrogeológica da bacia é feita da seguinte maneira:

- Sistema de Aquífero Médio (formações Rio da Batateira, Abaiara, Missão Velha) - ± 500 m de espessura.
- Aquífero Brejo Santo - ± 400 m de espessura; e,
- Sistema de Aquífero Inferior (formação Mauriti e parte basal da formação Brejo Santo) - ± 60 a 100 m de espessura.

Nesta região do Vale ocorrem também os depósitos aluvionares, localizados ao longo da bacia do Rio Salgado, mas não foram discretizados no modelo, devido sua pequena espessura comparada com a dimensão do modelo, ficando apenas representadas as formações acima citadas.

2.4.1 Entrada de dados do modelo I

No quadro 2 são mostradas as características dos sistemas aquíferos médio e inferior da área de estudo. E no quadro 3 é mostrado os parâmetros hidrogeológicos adotados na literatura para as formações da área de estudo na bacia do Araripe.

Quadro2. Sistemas aquíferos na área de trabalho. Fonte: DNPM (1996)

Parâmetro	Sistema aquífero médio	Sistema aquífero Inferior
Espessura média total (m)	500	100
Espessura saturada (m)	480	85
Coefficiente de transmissividade (m ² /s)	5x10 ⁻³	3x10 ⁻³
Coefficiente de permeabilidade (m/s)	5x10 ⁻³	4x10 ⁻³
Coefficiente de armazenamento	2x10 ⁻⁴	5x10 ⁻⁵
Área de recarga (km ²)	305,59	187,43
Precipitação pluvial (mm/ano)	970	900

Quadro3. Parâmetros Hidrogeológicos para as unidades hidroestratigráficas que compõem os sistemas aquíferos da área de trabalho. Fonte: (1)SUDENE (1967); (2)DNPM (1996); (3)IPLANCE (1997); (4)DOMENICO & SCHWARTZ (1997); (5)ANJOS (2000); (6)MENDONÇA (2001); (7)KIMURA (2003)

Unidade	Condut. Hidráulica K (m/s)	Armazen. específico-Ss (1/m)	Coef. armazen. efetivo Sy	Porosidade efetiva	Porosidade total
Rio da Batateira	4,17x10 ⁻⁶ a 6,90x10 ⁻⁶ (6)	1,0x10 ⁻⁷ (6)	2,0x10 ⁻⁴ (2)a 8,0x10 ⁻³ (3)	0,1 (2)	0,32 a 0,48 (7)
Abaiara	1,6x10 ⁻⁵ a 5,0x10 ⁻⁶ (2)	1,0x10 ⁻⁷ (6)	2,0x10 ⁻⁴ (2) a 8,0x10 ⁻³ (3)	0,1 (2)	0,32 a 0,48 (7)
Missão Velha	1,6x10 ⁻⁵ a 5,0x10 ⁻⁵ (2)	1,0x10 ⁻⁷ (6)	2,0x10 ⁻⁴ (2) a 8,0x10 ⁻³ (3)	0,1 (2)	0,32 a 0,48 (7)
Brejo Santo	1,0x10 ⁻¹¹ a 4,7x10 ⁻⁹ (7)	1,3x10 ⁻³ (7)	0,01 a 0,18 (7)	0,005 a 0,05 (4)	0,45 a 0,55 (7)
Mauriti	4,0x10 ⁻⁶ (2)	-	1,0x10 ⁻⁴ (2)	0,02 (2)	0,1 a 0,2 (7)

A recarga dos sistemas de aquífero Médio e Inferior, na zona de Vale, ocorre através da infiltração direta da água das chuvas e infiltração de parte das águas das fontes provenientes das formações do sistema aquífero Superior (Exu, Arajara e Santana). A descarga natural do sistema aquífero Médio ocorre através do escoamento de base para o rio Salgado e seus afluentes e a descarga artificial ocorre principalmente através de poços tubulares, que fornecem a quase totalidade de água para consumo da região.

Na porção norte da área, onde o sistema Aquífero Inferior é aflorante, sua recarga é realizada pela infiltração direta das águas pluviais. A descarga natural ocorre através do rio Carás e a descarga artificial através do bombeamento de poços tubulares (FERNANDES, 2005).

2.4.2 Malha do modelo

A discretização do modelo é feita em um grid em três dimensões onde admitimos as camadas com seus respectivos litotipos. A área do modelo possui dimensões de 32000 x 31000 metros perfazendo uma área de 992 km², sendo 493 km² de área ativa. A distribuição horizontal da malha foi discretizada em células retangulares de 320 m x 310m devido a dimensão da área de estudo, pois se essas dimensões fossem diminuídas o modelo ficaria muito carregado.

Em profundidade o modelo foi dividido em cinco camadas. Por questões didáticas e de simplificação dividiu-se o sistema aquífero em dois: aquífero inferior e médio. Na parte norte, onde se encontra o sistema aquífero inferior, formação Mauriti e parte basal da Formação

Brejo Santo, apenas uma camada foi considerada com as características da formação Mauriti. Na parte sul, onde temos o sistema aquífero médio, a formação Mauriti fica na base do sistema aquífero. Na ordem de baixo para cima, no sistema aquífero médio, as formações são: Mauriti, Brejo Santo, Missão Velha, Abaiara e Rio da Batateira. O nível altimétrico da superfície varia de 399 a 716 metros e da base da última camada de -1299 a -800 metros.

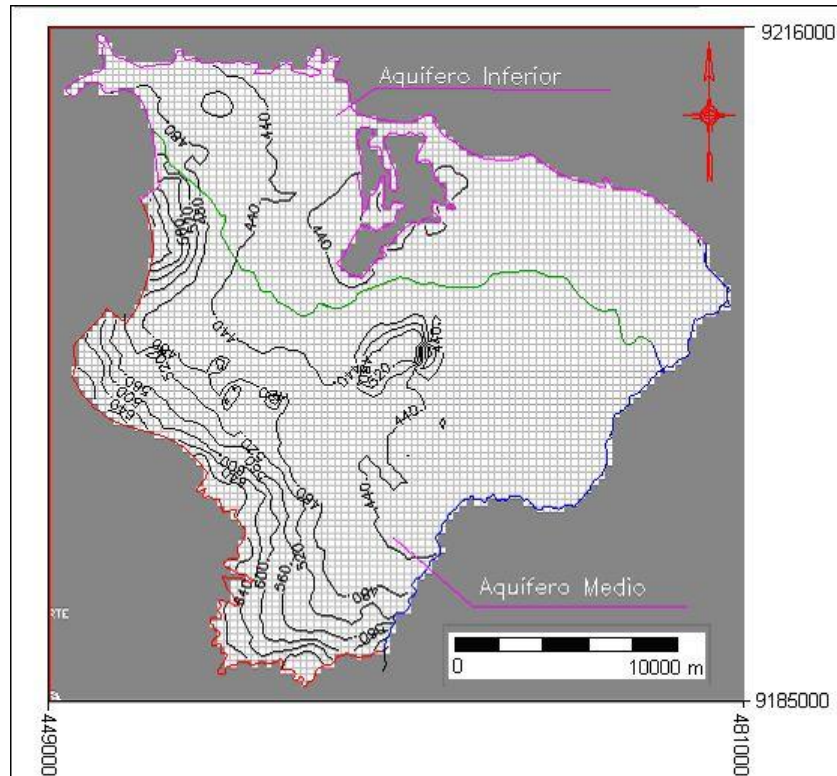


Figura3. Curvas de nível na área do modelo I de 40 e m 40 metros.

2.4.3 Topografia e camadas do modelo I

Os dados para formação da superfície do modelo e das camadas foram coletados de três seções geológicas na área de estudo fornecida pela COGERH – Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará, que foram retirados do projeto: Implantação do Sistema de Monitoramento/Gestão de uma Área Piloto do Aquífero Missão Velha, na Bacia Sedimentar do Cariri onde fizeram uma revisão bibliográfica da geofísica em trabalhos anteriores na área de estudo, não só os relacionados diretamente ao tema (geofísica), mas também outros, principalmente os de cunho estratigráfico, inclusive os perfis litológicos dos poços, de forma a auxiliar a interpretação das sondagens elétricas (SEV's).

O embasamento cristalino foi retirado de um trabalho realizado pelo laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR/UFC) em parceria com a Divisão de Geociências do IBGE, realizado no Vale do Cariri, intitulado: Caracterização da arquitetura interna das bacias do Vale do Cariri (NE do Brasil) com base em modelagem gravimétrica 3-D.

Para a topografia da superfície da área de estudo foi gerado um arquivo .xyz, a partir das curvas de nível do arquivo no formato .dwg, através de uma rotina feita em autolisp, onde coletou-se 2000 pontos aleatórios e regularmente espaçados e em seguida esses pontos foram interpolados para o restante da área de pesquisa (Figura 3). Na geração da topografia das camadas utilizou-se três seções geológicas que foram espaçadas de 50 em 50 metros. E foi

coletado a altimetria de cada camada gerando assim um arquivo .xyz para as respectivas camadas e em seguida interpolado para a área restante. Abaixo a disposição das seções geológicas na área de estudo e as três seções utilizadas para a formação das camadas.

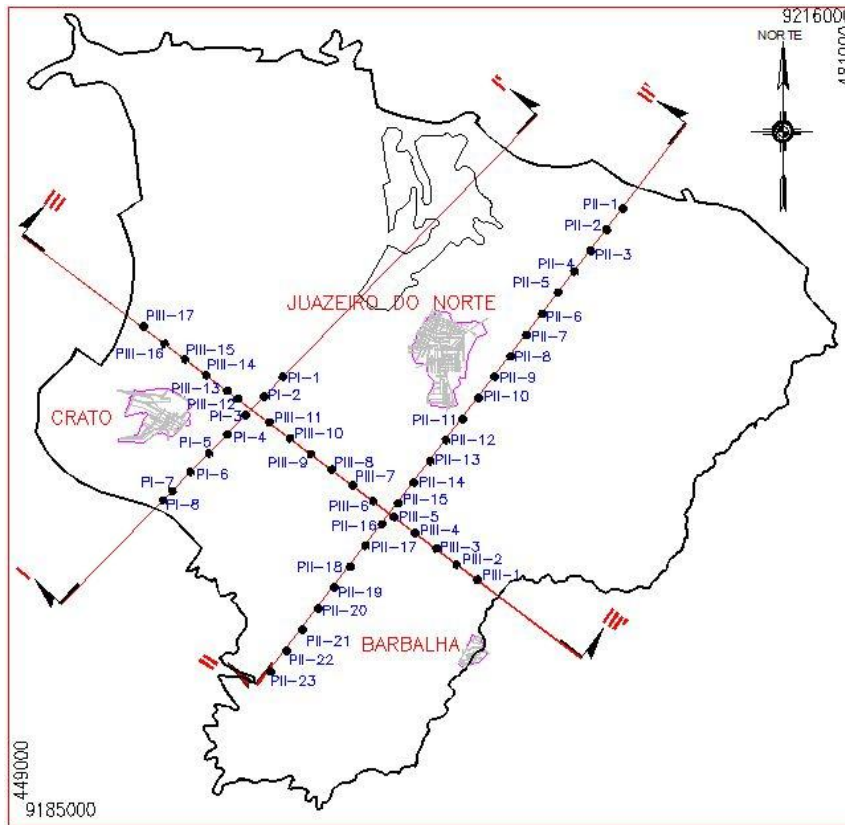


Figura4. Área de estudo com o posicionamento das seções geológicas e os pontos onde foram retirados a altimetria das camadas para formação das camadas do modelo.

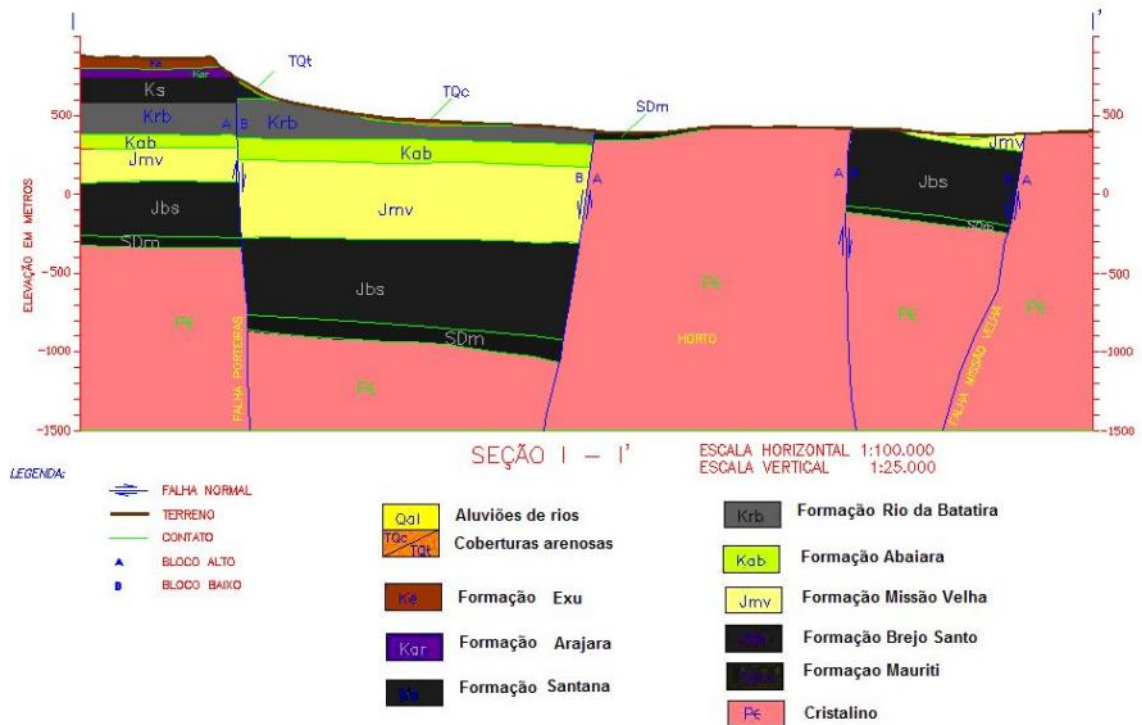


Figura5. Seção geológica I com as formações da área de estudo. Fonte: Modificado GOLDER/PIVOT, 2005.

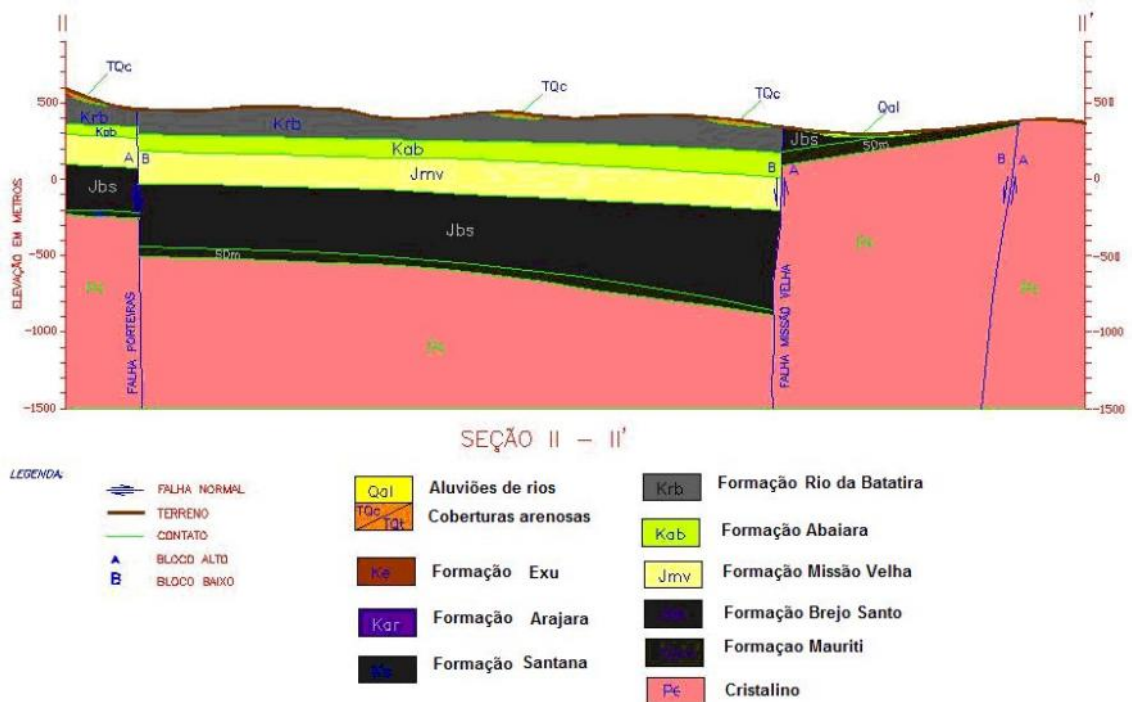


Figura6. Seção geológica II com as formações da área de estudo. Fonte: Modificado GOLDER/PIVOT, 2005.

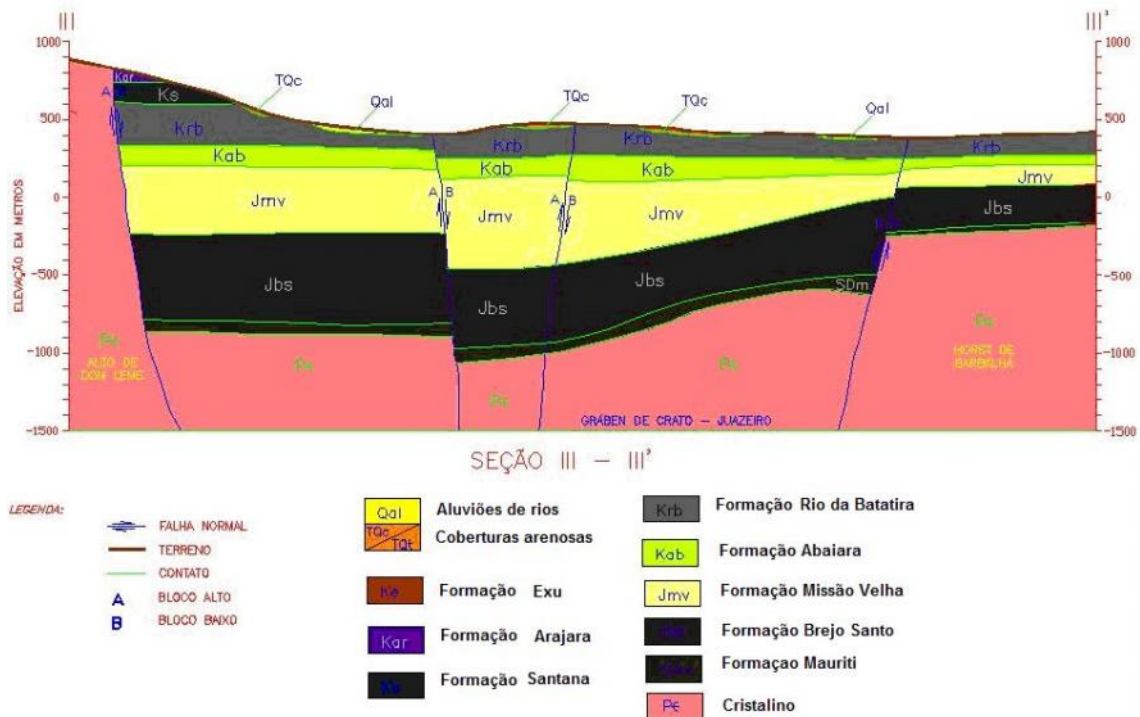


Figura7. Seção geológica III com as formações da área de estudo. Fonte: Modificado GOLDBER/PIVOT, 2005.

A figura 8 mostra a distribuição da camada em um corte transversal do P MWIN.

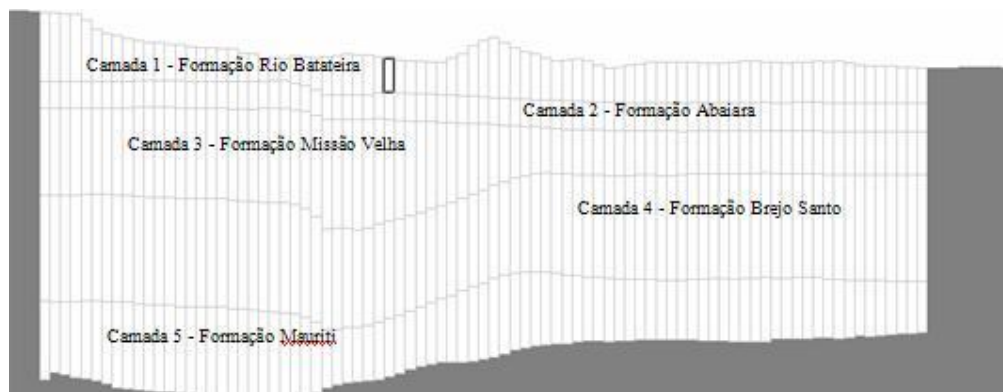


Figura8. Distribuição das formações no modelo I gerado pelo PMWIN.

2.4.4 Poços

Os poços de bombeamento da região foram fornecidos pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH), como mostrado no Anexo III, com as principais características. Foi considerada uma média de 16 horas de bombeamento para os poços públicos e 8 horas de bombeamento para os poços privados.

Na região de talude, entre o vale e a chapada, considerou-se como condição de contorno as nascentes que afloram no pé da chapada, e com o não existe um pacote de fluxo específico para este caso utilizou-se o pacote well para simular água injetada no sistema Aquífero Médio. Este valor de drenança é de $2,0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ para o sistema Aquífero Médio (Kimura, 2003).

2.4.5 Rios

Os rios que definiram o contorno do modelo foram os rios Salamanca e Batateira. O rio Salamanca é uma das condições de contorno, limitando toda a área estudada na porção leste. Já o rio Batateira está inserido dentro da área de estudo sendo então necessário conhecer as características hidráulicas destes rios. Os dados utilizados neste trabalho foram utilizados baseados na observação dos rios da região e em trabalhos anteriores. Os valores do nível de água no leito dos rios, em relação ao fundo, variam de 2 a 3 metros. A condutividade hidráulica do leito do rio foi de 10^{-5} m/s, valor compatível com outros estudos efetuados em regiões semi-áridas, segundo relatório final do “Modelamento Matemático da Área de Recarga do Aquífero Açú, Rio Grande do Norte”, desenvolvido através do Programa de Água Subterrânea no Nordeste do Brasil (PROASNE).

2.4.6 Recarga

No caso da simulação desse modelo foi determinada a recarga através do balanço hídrico da região a partir dos dados pluviométricos dos postos Crato e Juazeiro do Norte, nas respectivas cidades. Neste balanço tem-se como resultado uma infiltração efetiva de aproximadamente 108.7 mm/ano em Juazeiro do Norte e 281.3 mm/ano em Crato.

A Evapotranspiração Potencial foi determinada segundo o método de Thornthwaite. A retenção de água no solo, que define a quantidade máxima de água que o solo pode reter, foi estabelecida em 100 mm e no início do ano hidrológico (janeiro) $C=0$.

Os dados resultantes do balanço hídrico executado, a partir dos dados de precipitação de 23 anos situados no período entre 1962 e 1987 eliminando as falhas, constam nos quadros 4 e 5.

Quadro4. Balanço hídrico do Posto Crato em Crato, Latitude 07° 13' S, Longitude 39° 23' W, altitude 421 m.

Mês	T (oC)	Im (mm)	K	ETP (mm)	PPT (mm)	PPT-ETP (mm)	C (mm)	ETR (mm)	Ie (mm)
JAN	26.1	11.93	1.08	139.2	163.6	24.4	24.4	139.2	0.0
FEV	25.0	11.18	0.97	108.8	236.2	127.4	100	108.8	33.2
MAR	24.8	11.05	1.05	114.8	280.5	165.7	100	114.8	165.7
ABR	24.6	10.91	0.99	105.4	187.8	82.4	100	105.4	82.4
MAI	24.2	10.65	1.01	102.0	63.7	-38.3	61.7	63.7	0.0
JUN	23.8	10.39	0.96	91.9	25.7	-66.2	0.0	25.7	0.0
JUL	23.9	10.45	1.00	97.1	9.8	-87.3	0.0	9.8	0.0
AGO	24.6	10.91	1.01	107.6	5.5	-102.1	0.0	5.5	0.0
SET	26.1	11.93	1.00	128.9	10.7	-118.2	0.0	10.7	0.0
OUT	26.8	12.41	1.06	148.8	28.8	-120.0	0.0	28.8	0.0
NOV	26.9	12.48	1.05	149.1	53.4	-95.7	0.0	53.4	0.0
DEZ	26.6	12.27	1.10	150.7	89.9	-60.8	0.0	89.9	0.0
Anual		136.55		1444.3	1155.6			755.7	281.3

T = Temperatura média mensal

Im = Índice térmico anual

K = Fator de correção dependente da latitude

C = Retenção de água no solo

PPT = precipitação média

ETP = Evapotranspiração Potencial

ETR = Evapotranspiração Real

Ie = Infiltração efetiva

O resumo dos principais parâmetros apresentados abaixo, como médias anuais:

- Crato

Precipitação = 1155.60 mm

Evapotranspiração potencial = 1444.30 mm

Evapotranspiração Real = 755.70 mm

Infiltração Efetiva = 281.30 mm

- Juazeiro do Norte

Precipitação = 918.60 mm

Evapotranspiração potencial = 1524.30 mm

Evapotranspiração Real = 709.90 mm

Infiltração Efetiva = 108.70 mm

Quadro5. Balanço hídrico do Posto Juazeiro do Norte em Juazeiro do Norte, Latitude 07° 23' S, Longitude 39° 23' W, altitude 650 m.

Mês	T (oC)	Im (mm)	K	ETP (mm)	PPT (mm)	PPT-ETP (mm)	C (mm)	ETR (mm)	Ie (mm)
JAN	26.5	12.20	1.08	145.7	134.3	-11.4	0.0	134.3	0.0
FEV	25.4	11.45	0.97	113.5	175.3	61.8	61.8	113.5	0.0
MAR	25.1	11.25	1.05	118.1	241.0	122.9	100.0	118.1	84.7
ABR	25.0	11.18	0.99	109.9	133.9	24.0	100.0	109.9	24.0
MAI	24.7	10.98	1.01	107.6	48.3	-59.3	40.7	48.3	0.0
JUN	24.3	10.71	0.96	96.8	18.8	-78.0	0.0	18.8	0.0
JUL	24.4	10.78	1.00	102.3	14.1	-88.2	0.0	14.1	0.0
AGO	25.2	11.31	1.01	115.1	7.4	-107.7	0.0	7.4	0.0
SET	26.6	12.27	1.00	136.7	8.2	-128.5	0.0	8.2	0.0
OUT	27.4	12.83	1.06	160.0	23.2	-136.8	0.0	23.2	0.0
NOV	27.4	12.83	1.05	158.5	34.6	-123.9	0.0	34.6	0.0
DEZ	27.1	12.62	1.10	160.0	79.5	-80.5	0.0	79.5	0.0
Anual		140.41		1524.3	918.6			709.9	108.7

T = Temperatura média mensal

Im = Índice térmico anual

K = Fator de correção dependente da latitude

C = Retenção de água no solo

PPT = precipitação média

ETP = Evapotranspiração Potencial

ETR = Evapotranspiração Real

Ie = Infiltração efetiva

2.5 Modelo da área de Barbalha e Missão Velha (modelo II)

A figura 9 mostra a área estabelecida para a aplicação do modelo. As condições de limite para a simulação do fluxo hídrico subterrâneo são os rios Salgado no lado norte, o Salamanca no lado oeste, o riacho Seco na porção leste e a base da chapada do Araripe no lado sul.

A área de estudo escolhida para o modelo II tem como parte inferior a Zona de talude e situa-se quase que totalmente na Zona de Pediplano, região conhecida como Vale do Cariri. As camadas que compõem a área de estudo pertencem aos sistemas aquíferos Médio e Inferior, portanto as camadas hidrogeológicas do modelo conceitual têm as formações: Rio da Batateira, Abaiara, Missão Velha, Brejo Santo e Mauriti.

Dessas, segundo Kimura (2003) a formação Brejo Santo se comporta como aquífero e as demais como aquíferos.

2.5.1 Entrada de dados do modelo II

Os parâmetros hidrodinâmicos adotado no modelo II foram os mesmo do modelo I, já que se trata das mesmas formações hidrogeológicas.

2.5.2 Malha do modelo

A área abrange as cidades de Missão Velha e de Barbalha. A área total para a malha do modelo é de 728 km², entre os paralelos 463000 e 489000 de longitude leste e 9176000 e 9204000 de latitude norte, perfazendo 26.000 metros no sentido leste-oeste e 28.000 metros no sentido norte-sul.

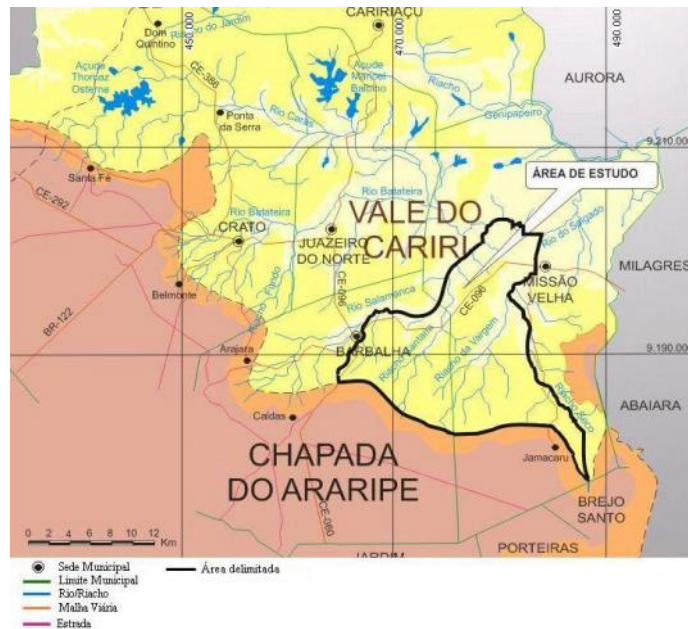


Figura9. Localização da área de estudo em contorno preto ao sul do estado do Ceará. Fonte: Modificado da COGERH.

Para determinar o modelo o primeiro passo é fazer a discretização da área de forma que um grid é gerado em 3 dimensões pelo PMWIN. Nessa etapa o sistema aquífero é substituído por um domínio discretizado de uma disposição de nós e associado a os blocos de diferenças finitas. A forma nodal da malha é a forma da estrutura do modelo numérico. A área escolhida, como foi citada, possui 26.000 metros no sentido leste-oeste e 28.000 metros no sentido norte-sul. A distribuição da malha foi discretizada então em 100 x 100 células, ficando então cada célula com 260 metros na direção x e 280 metros na direção y.

2.5.3 Topografia e camadas do modelo II

Os dados de topografia para o modelo II também foram editados a partir dos mapas de curva de nível, fornecidos pela COGERH - Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do estado do Ceará. Os arquivos fornecidos em CAD, com extensão *.dwg, possuem as curvas de nível de 40 em 40 metros. Foi realizado então um corte selecionando as curvas topográficas que estavam dentro na malha escolhida para o modelo.

Em seguida foram alterados os tipos de entidades da curva, com a ferramenta UFC2 desenvolvida pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará. Essa edição com o UFC2 converteu as curvas de nível de *Line* para *Spline*. Em seguida, foi utilizado, um aplicativo denominado de expcurva.lsp, que transformava o arquivo *.dwg em arquivo texto (*.txt) e limitava o número de vértices com dados topográficos em 2000 pontos, uma vez que o pacote do PMWIN, *Field Interpolator*, que interpola dados para toda área do modelo, restringe os números de pontos para a interpolação.

Com a falta de dados de geofísica da área de Missão Velha e Barbalha, optou -se no modelo II, fazer uma média dos valores interpolados para a área do modelo I, que é adjacente a deste modelo. O quadro 6 indica quais foram os valores médios calculados e assim adotados para a modelagem da região à direita do rio Salamanca.

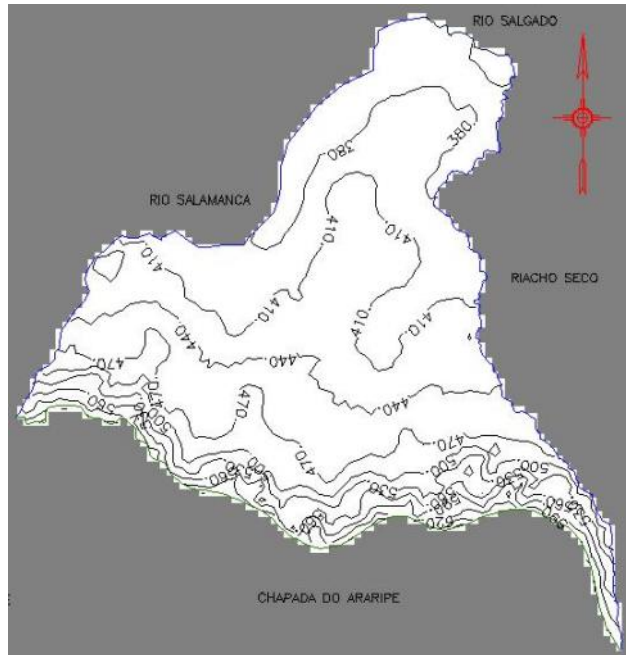


Figura10. Curvas de nível na área do modelo II de 30 em 30 metros.

Quadro6. Valores médios das cotas da área adjacente à área deste estudo e es p essuras das camadas adotadas para a modelagem.

	Cota média (m)	Formação	Espessura (m)
Topografia	482.24	Rio da batateira	215.25
Topo camada 2	266.99	Abaiera	136.76
Topo camada 3	130.23	Missão Velha	313.49
Topo camada 4	-183.26	Brejo Santo	521.53
Topo camada 5	-704.79	Mauriti	357.5
Base cristalino	-1062.29	Cristalino	-

A figura abaixo mostra como ficou discretizada as camadas no PMWIN do modelo II.

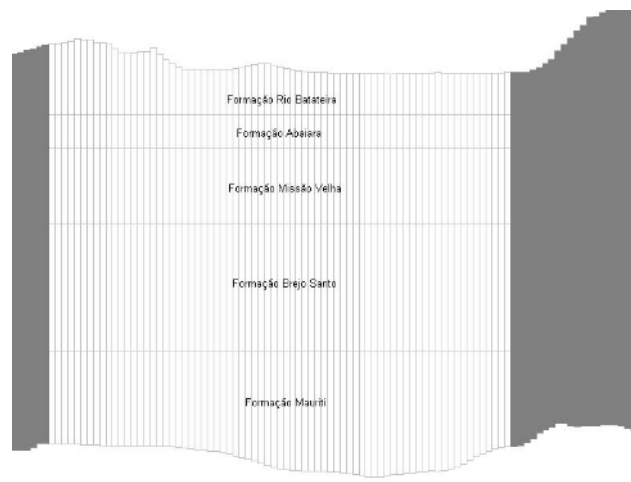


Figura11. Distribuição das camadas do modelo II.

2.5.4 Poços

Duas informações importantes foram retiradas dos dados de poços: a medição do nível estático e a vazão de bombeamento.

Os dados de poços foram fornecidos pela CAGECE – Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará, pela CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais e pela COGERH.

Com os arquivos em forma de planilha contendo informações de poços de toda a região do Cariri, foi necessário realizar então uma triagem com os dados de nível estático e também com os dados de vazões dos poços. Com as coordenadas em UTM - Universal Transverse Mercator dos poços foi possível digitalizar em formas de pontos, todos os poços cadastrados pelas instituições, e assim excluir os poços que não pertenciam ao domínio da área escolhida para a modelagem. Além dessa triagem, os poços que não apresentavam dados de medição de nível estático e/ou de vazão de bombeamento, ou ainda alguns que apresentaram valores de nível estático que ultrapassaram a cota da topografia também foram dispensados.

Os valores de nível estático foram necessários para gerar as cargas observadas necessária tanto para a simulação como para a calibração do modelo e as vazões de bombeamento foram utilizados no pacote Well do PMWIN para representar a retirada do fluxo hídrico subterrâneo nas simulações, ao qual foi estabelecido um funcionamento de 8 horas diárias de bombeamento para todos os poços.

2.5.5 Rios

Os rios da área de estudo limitam o modelo para as condições do cálculo de fluxo hídrico subterrâneo. Ao norte o modelo é limitado por uma parte do rio Salgado, ao leste pelo riacho Seco e a oeste pelo rio Salamanca. A figura abaixo mostra os rios como limites no modelo no PMWIN. O percurso dos rios foi obtido a partir dos mapas fornecidos pela COGERH .

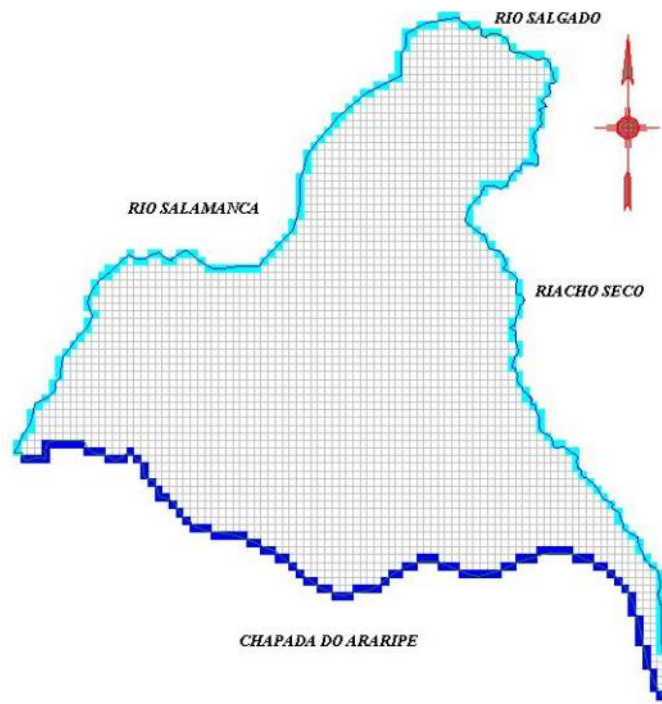


Figura12. Visualização dos Rios limitantes nas células do PMWIN.

Para a entrada no pacote River do PMWIN, são necessários 5 dados: a condutância hidráulica do leito do rio, a carga hidráulica do rio, a elevação do fundo do rio, a largura do rio e a espessura do leito do rio. Assumiu-se a partir da literatura um valor da condutância hidráulica de $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ para todos os 3 rios, fundamentado em outros estudos de que esse é um valor compatível aos rios da região, segundo o já citado relatório do Modelamento Matemático da Área de Recarga do Aquífero Açú, Rio Grande do Norte, desenvolvido pelo Programa de Água Subterrânea no Nordeste do Brasil (PROASNE, 2003).

Com a ferramenta Polyline do PMWIN foi traçado o trajeto dos rios, a partir daí então foi possível atribuir os valores necessários para a simulação.

A elevação do fundo do rio Salamanca e do riacho Seco começou com um valor atribuído nas proximidades de sua nascente de 0.5 metros e foi interpolado pelo PMWIN até 3 metros no encontro com o rio Salgado. A carga hidráulica do rio foi admitida com 2 metros abaixo do nível topográfico ao longo dos cursos dos rios. A largura dos 2 rios que afloram da chapada foi admitida de 0.5 metro na nascente até 4.5 metros na confluência desses.

Os valores utilizados foram adquiridos com o uso do bom-senso, uma vez que não foi encontrado registro das medições dos parâmetros supracitados. Par a efeito de conhecimento da resposta do modelo em questão à sensibilidade desses parâmetros, foi realizado algumas mudanças nesses valores na ordem de 100%, e constatou-se que houve pouca variabilidade no que concerne as equipotenciais e linhas de fluxo.

2.5.6 Recarga

Foi feito um balanço hídrico e o resultado da infiltração efetiva anual, ao qual foi utilizado para o valor de recarga adotado para o modelo, foi de 191.6 mm/ano no posto de Missão Velha. Os valores dos principais parâmetros do balanço hídrico estão resumidos na tabela 8.

A tabela 7 abaixo mostra os valores do balanço hídrico realizado durante o ano. A técnica para o cálculo da Evapotranspiração Potencial foi determinada segundo o método de Thornthwaite.

Quadro7. Balanço hídrico do Posto Missão Velha, com Latitude 07° 15' S, Longitude 39° 09' W, e altitude de 352 m.

Mês	T _{média} (oC)	Im (mm)	K _c	ETP (mm)	PPT (mm)	PPT-ETP (mm)	C (mm)	ETR (mm)	le (mm)
JAN	26.6	12.27	1.08	147.5	130.4	-17.1	0.0	130.4	0.0
FEV	25.5	11.52	0.97	114.9	202.9	88.0	88.0	114.9	0.0
MAR	25.2	11.31	1.05	119.4	267.6	148.2	100.0	119.4	136.2
ABR	25.1	11.25	0.99	111.1	166.5	55.4	100.0	111.1	55.4
MAI	24.8	11.05	1.01	108.8	49.2	-59.6	53.0	49.2	0.0
JUN	24.4	10.78	0.96	97.9	19.0	-78.9	0.0	19.0	0.0
JUL	24.5	10.85	1	103.4	7.8	-95.6	0.0	7.8	0.0
AGO	25.3	11.38	1.01	116.4	4.2	-112.2	0.0	4.2	0.0
SET	26.7	12.34	1	138.3	6.4	-131.9	0.0	6.4	0.0
OUT	27.4	12.83	1.06	160.0	17.9	-142.1	0.0	17.9	0.0
NOV	27.4	12.83	1.05	158.5	37.1	-121.4	0.0	37.1	0.0
DEZ	27.2	12.69	1.1	162.0	65.6	-96.4	0.0	65.6	0.0
Tot. Anual		141.09		1538.48	974.6			683.0	191.6

T_{média} = Temperatura média mensal

Im = Índice térmico anual

K_c = Fator de correção dependente da latitude

C = Retenção de água no solo

PPT = precipitação média

ETP = Evapotranspiração Potencial

ETR = Evapotranspiração Real

le = Infiltração efetiva

Quadro8. Resumo do balanço hídrico do posto de Missão Velha.

<u>MISSÃO VELHA</u>	
Precipitação (mm)	974.6
Evapotranspiração potencial (mm)	1538.48
Evapotranspiração Real (mm)	683.0
Infiltração Efetiva (mm)	191.6

2.6 Calibração dos Modelos

Para a calibração da condutividade hidráulica dos modelos, como não há um zoneamento pré - definido deste parâmetro necessário para o pacote PEST (Parameter Estimation) do PMWIN, foi desenvolvido em linguagem FORTRAN (Fortran 90 – Compaq Visual Fortran Versão 6.5) um programa de calibração. Este programa, denominado de MIGHA – Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo realiza a calibração da condutividade hidráulica e/ou transmissividade a partir dos dados de cargas hidráulica observadas.

3 RESULTADOS

Os resultados aqui apresentados mostram 3 simulações para cada área de estudo (Modelo I e Modelo II): uma simulação no estado permanente chuvoso, e duas simulações no estado transiente, sendo uma para o período chuvoso e outra para o período seco . As saídas gráficas mostram o mapa das linhas equipotenciais. São mostrados os balanços hídricos e a velocidade média para as cinco camadas hidrogeológicas , e também os resultados da calibração pelo MIGHA.

3.1 Modelo I

Para as simulações foram utilizados os valores estimados de infiltração efetiva de 283 mm, a partir do balanço hídrico de dois postos pluviométricos da área de estudo, no período chuvoso. No período seco o valor de infiltração efetiva apenas de 11 mm. Foram consideradas 16 horas de bombeamento para os poços públicos e 8 horas de bombeamento para os poços privados.

3.1.1 Estado permanente para o período chuvoso

Quadro9. Características da simulação do estado permanente chuvoso para o modelo I.

Parâmetros	Valores	
Condutividade Hidráulica (K)	Camada 1	Aqüífero inferior – 9×10^{-6} m/s Aqüífero médio – 5×10^{-6} m/s
	Camada 2	1×10^{-5} m/s
	Camada 3	1×10^{-5} m/s
	Camada 4	1×10^{-10} m/s
	Camada 5	4×10^{-6} m/s
Porosidade Efetiva	Camada 1	Aqüífero inferior – 0.02 Aqüífero médio – 0.1
	Camada 2	0.1
	Camada 3	0.1
	Camada 4	0.03
	Camada 5	0.02
Infiltração Efetiva	283 mm	
Regime de Escoamento	Permanente	

Esta simulação apresentou linhas equipotenciais variando de 337,32 m a 453,44 m ao longo do aquífero, como mostrado a figura, com um gradiente médio de $4,71 \times 10^{-3}$ m/m e uma velocidade média no fluxo para as camadas 1, 2 e 3, com valores médios de 6,28 cm/dia, 3,69 cm/dia e 3,16 cm/dia, respectivamente. Já para as camadas 4 e 5 as velocidades médias do fluxo foram bem menores, em média de 0,0407 cm/ano e 1,08 cm/ano, respectivamente.

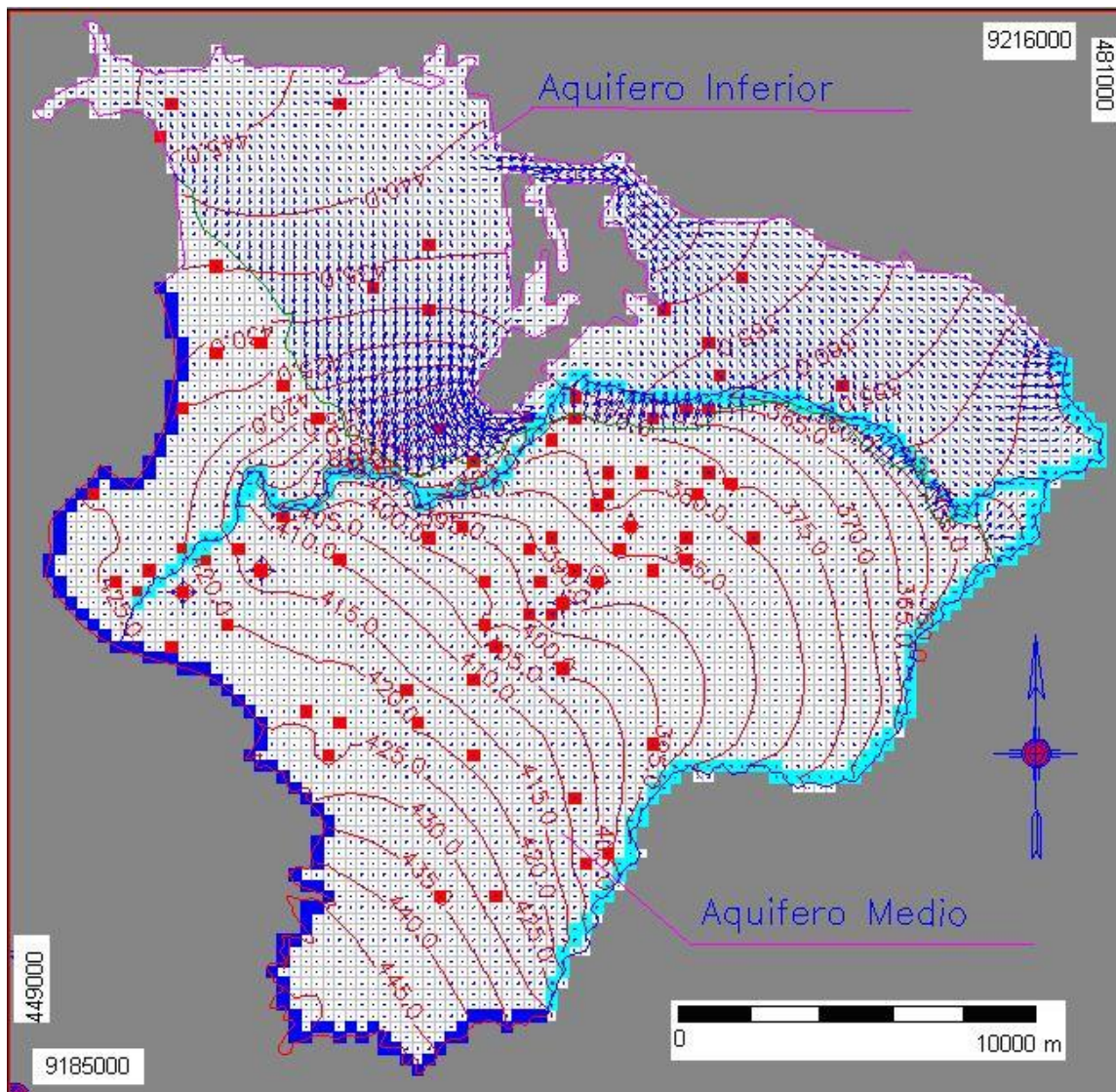


Figura13. Vetores de fluxo e variação das linhas equipotenciais, de 5,0 em 5,0 metros, para a camada 1 no estado permanente chuvoso.

As linhas equipotenciais de fluxo e os vetores de direção de fluxo nas demais camadas estão nas figuras 14, 15, 16 e 17.

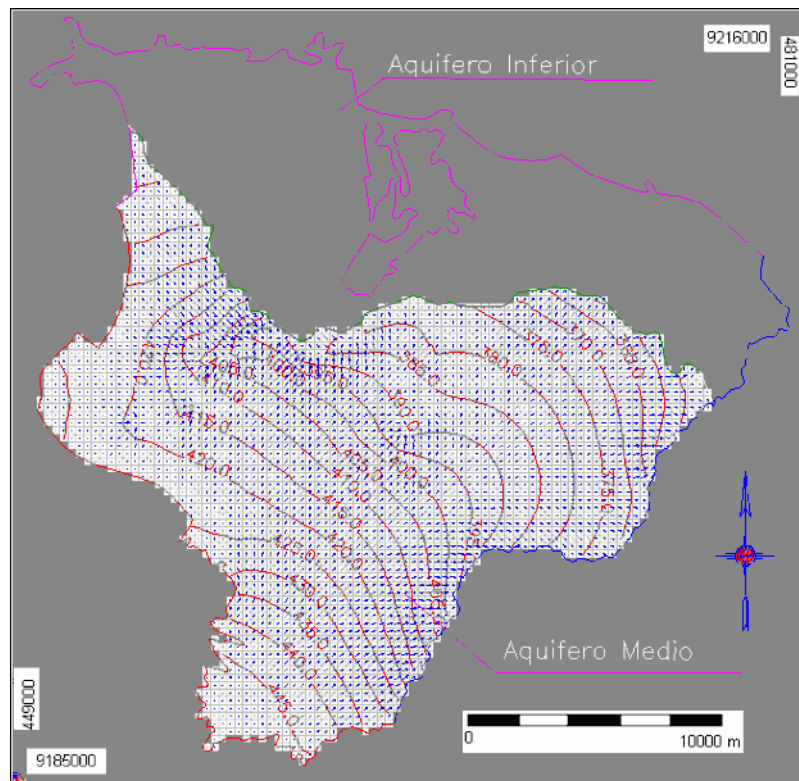


Figura14. Fluxo na camada 2, e curvas potenciométricas de 5,0 em 5,0 metros no estado permanente chuvoso.

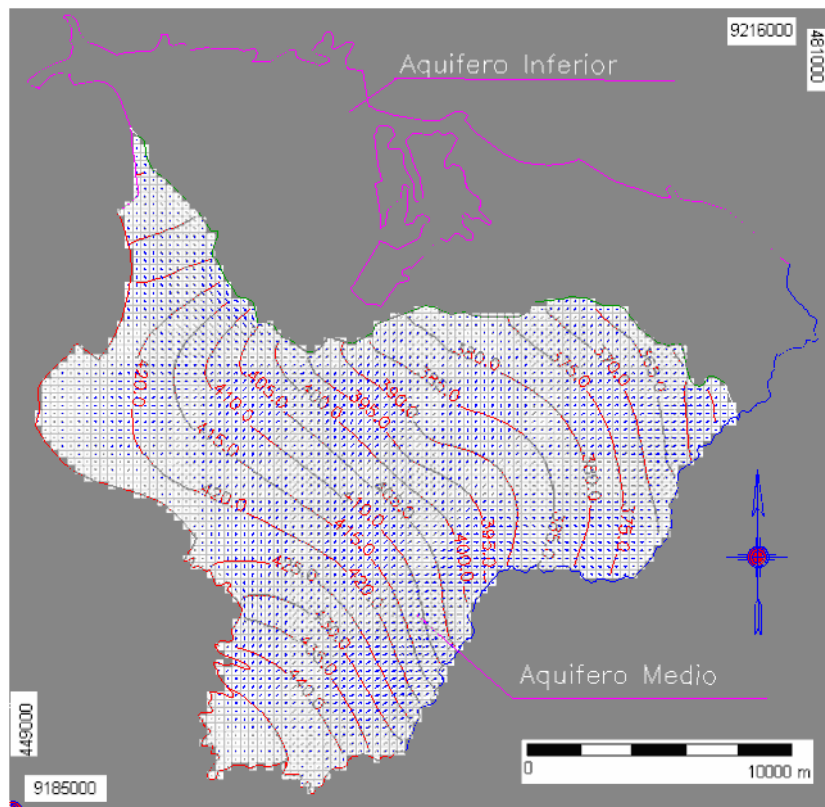


Figura15. Fluxo na camada 3, e curvas potenciométricas de 5,0 em 5,0 metros no estado permanente chuvoso..

O balanço hídrico também foi realizado. A figura 18 e o quadro 10 mostram o balanço hídrico do cenário da do estado permanente chuvoso. Pode-se observar a importância do rio no balanço hídrico do modelo.

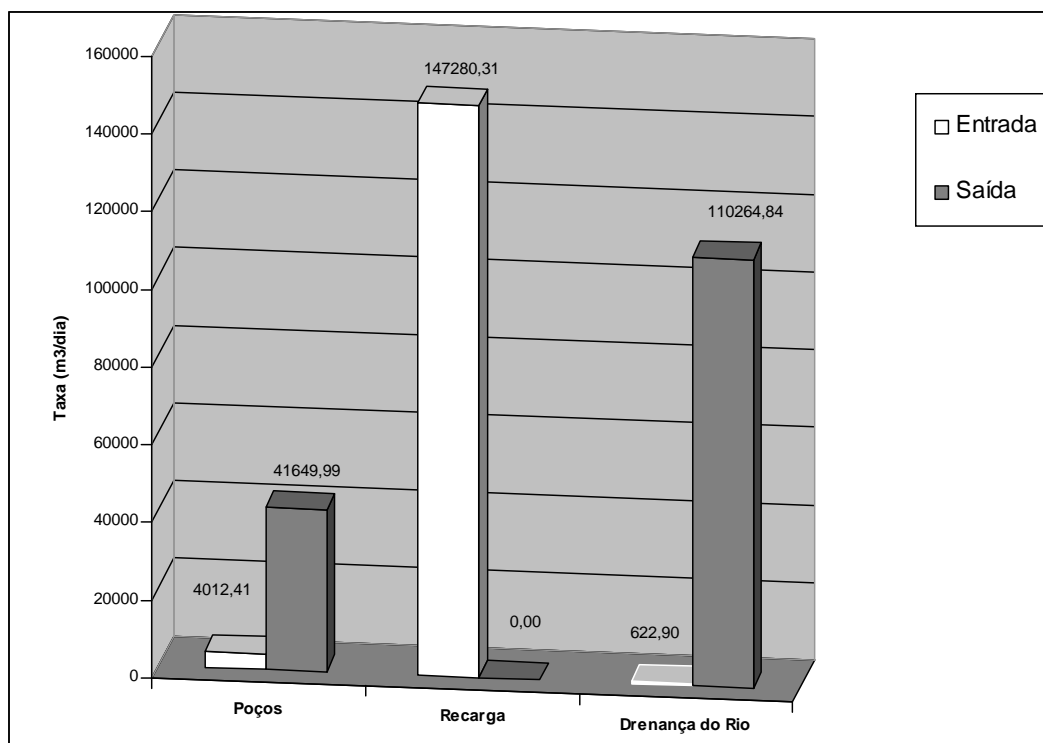


Figura18. Balanço hídrico do modelo no cenário de regime permanente chuvoso.

Quadro10. Balanço hídrico calculado pelo modelo, Simulação 1 em regime permanente

Parâmetros	Entrada (m³/dia)	Saída (m³/dia)
Poços	4012,41	41649,99
Recarga	147280,31	0,00
Drenança do Rio	622,90	110264,84
Total	151915,62	151914,82
Diferença		0,79

3.1.2 Estado transiente para o período chuvoso

Essa Simulação foi realizada em regime transiente para avaliar o comportamento dos aquíferos do modelo I durante o período chuvoso, e suas características estão na tabela abaixo.

Quadro11. Características da simulação do estado transiente chuvoso para o modelo I.

Parâmetros	Valores	
Condutividade Hidráulica (K)	Camada 1	Aquífero inferior – 9×10^{-6} m/s Aquífero médio – 5×10^{-6} m/s
	Camada 2	1×10^{-5} m/s
	Camada 3	1×10^{-5} m/s
	Camada 4	1×10^{-10} m/s
	Camada 5	4×10^{-6} m/s
Porosidade Efetiva	Camada 1	Aquífero inferior – 0.02 Aquífero médio – 0.1

	Camada 2	0.1
	Camada 3	0.1
	Camada 4	0.03
	Camada 5	0.02
Armazenamento Específico	Camada 1	1×10^{-7} 1/m
	Camada 2	1×10^{-7} 1/m
	Camada 3	1×10^{-7} 1/m
	Camada 4	$1,3 \times 10^{-3}$ 1/m
	Camada 5	1×10^{-4} 1/m
Coeficiente de Armazenamento	Camada 1	Aqüífero inferior – 1×10^{-4} Aqüífero médio – 2×10^{-4}
	Camada 2	2×10^{-4}
	Camada 3	2×10^{-4}
	Camada 4	1×10^{-2}
	Camada 5	1×10^{-4}
Duração (tempo)	180 dias	
Infiltração Efetiva	283 mm	
Regime de Escoamento	Transiente	
Resultado	Após 180 dias	

Esta simulação apresentou linhas equipotenciais variando de 337,34 m a 461,84 m ao longo do aquífero, como mostrado na figura 20, com um gradiente médio de $5,05 \times 10^{-3}$ m/m e uma velocidade média no fluxo para as camadas 1, 2 e 3 com valores médios de 6,47 cm/dia, 4,09 cm/dia e 3,48 cm/dia, respectivamente. Já para as camadas 4 e 5 a velocidade média do fluxo foi de 0,0672 cm/ano e 9,16 cm/dia, respectivamente.

Era esperado que o resultado dessa simulação fosse semelhante à simulação do estado permanente chuvoso, já que os dados de entrada foram os mesmos, mudando-se apenas o regime de escoamento. Comparando as duas simulações pode-se perceber uma diferença entre as linhas potenciométricas e entre os gradientes de velocidades, isso pode ser explicado pelos valores de armazenamento específico, não muito confiáveis, utilizados nesta simulação.

A figura 21 mostra os vetores de fluxo nas células do PMWIN.

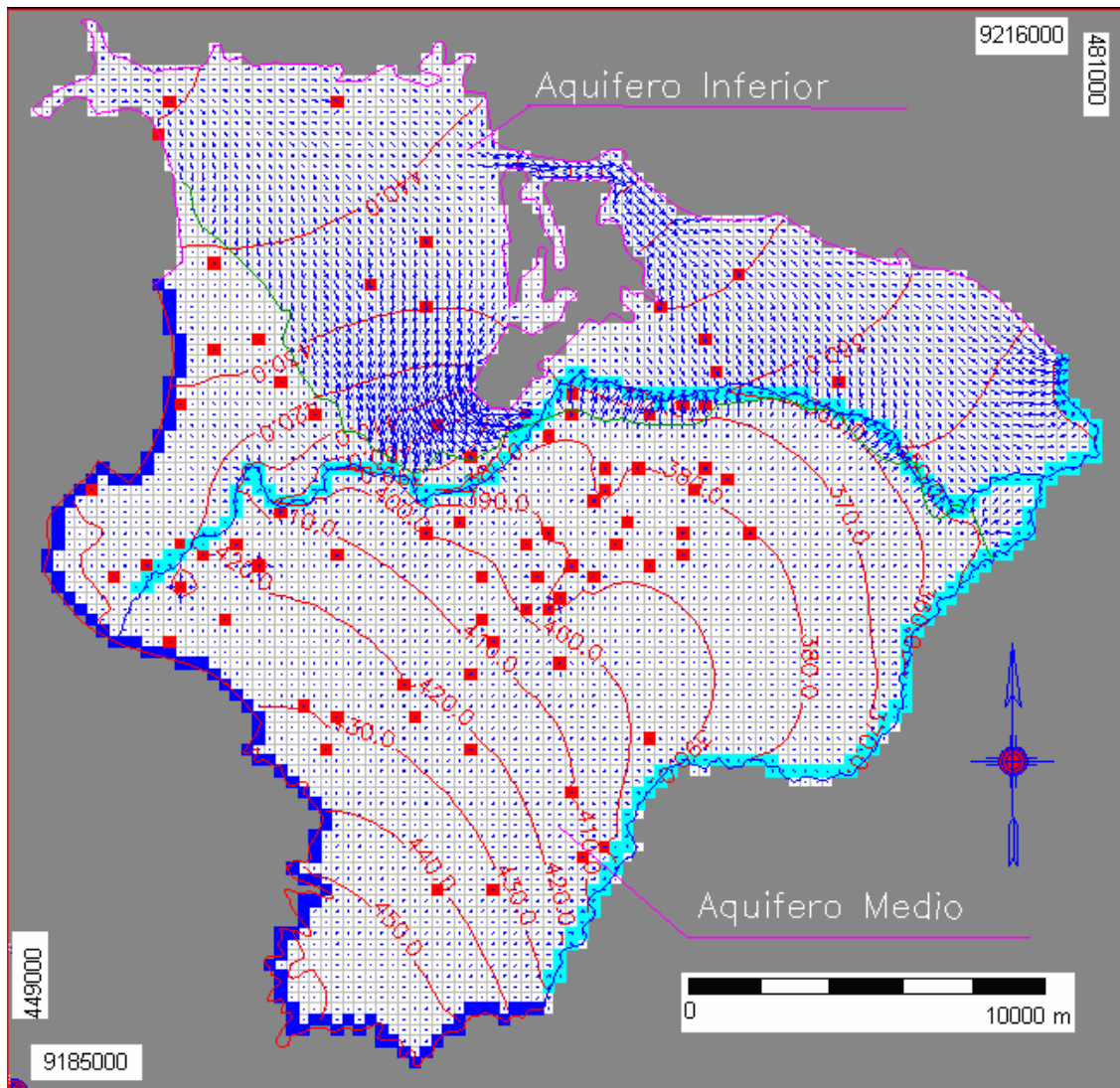


Figura19. Vetores de fluxo Variação das linhas equipotenciais, de 10 em 10 metros, para a camada 1 no estado transiente chuvoso.

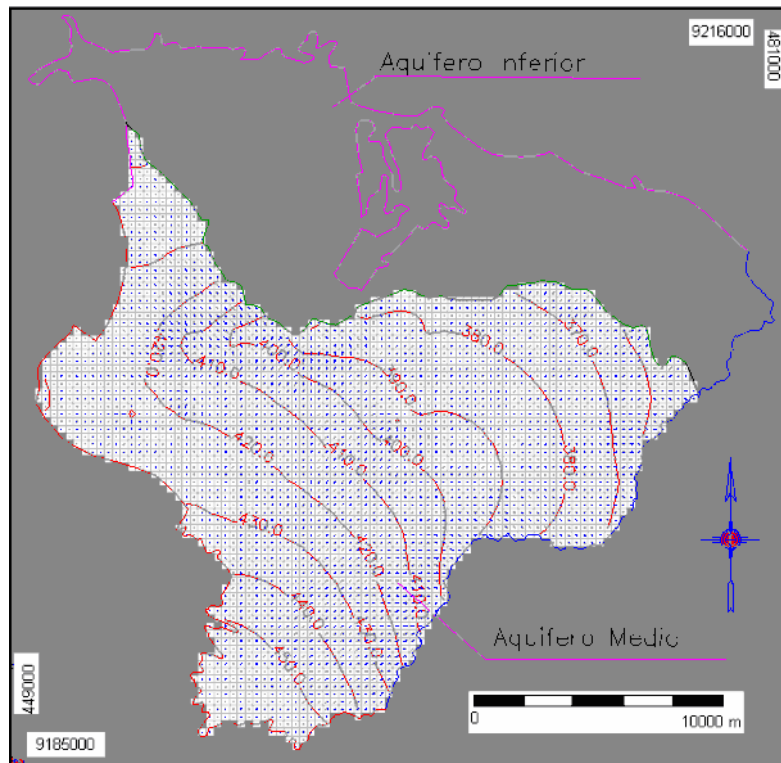


Figura20. Fluxo na camada 2, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente chuvoso.

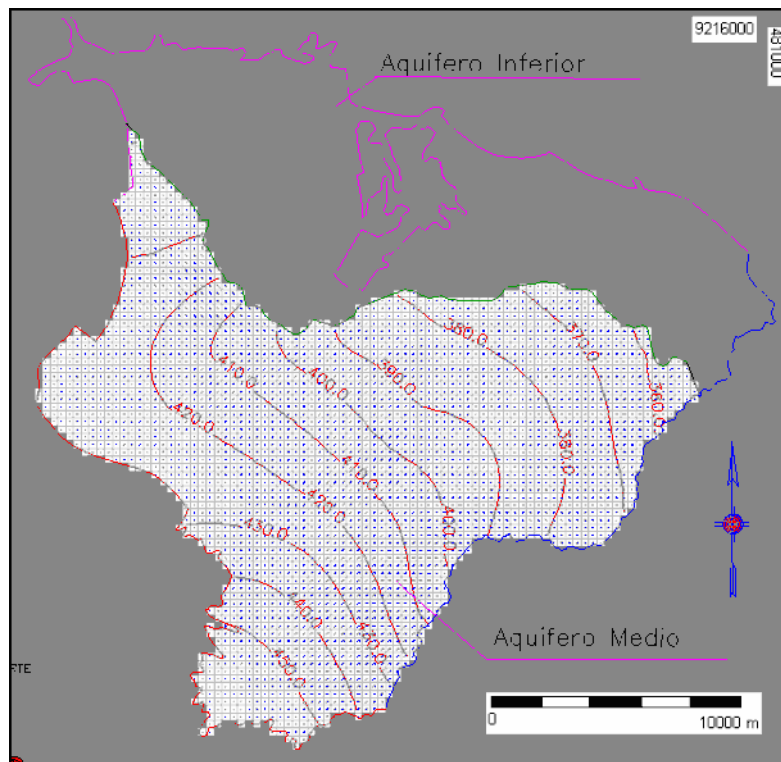


Figura21. Fluxo na camada 3, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente chuvoso.

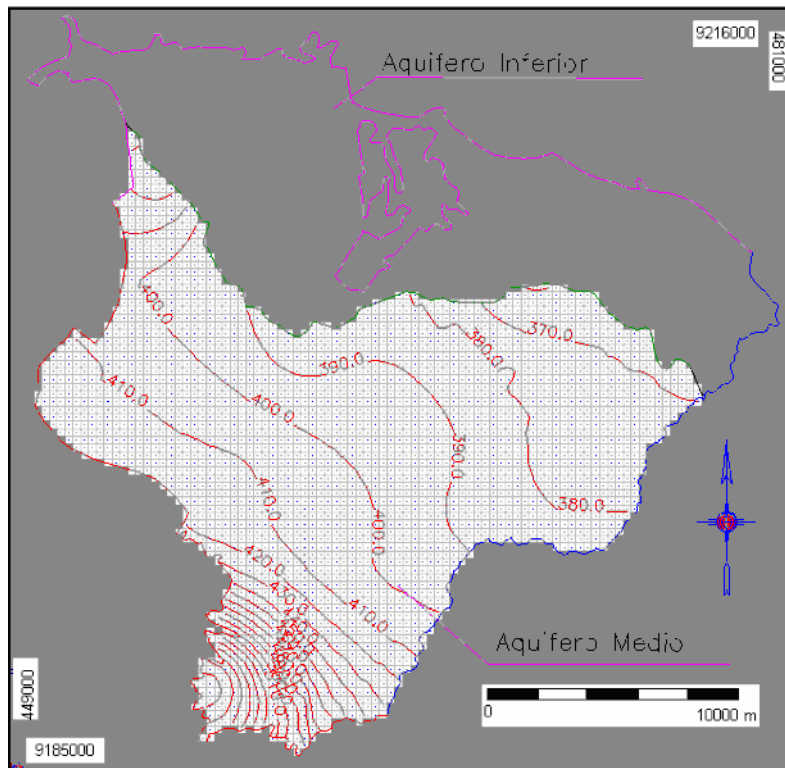


Figura22. Fluxo na camada 4, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente chuvoso.

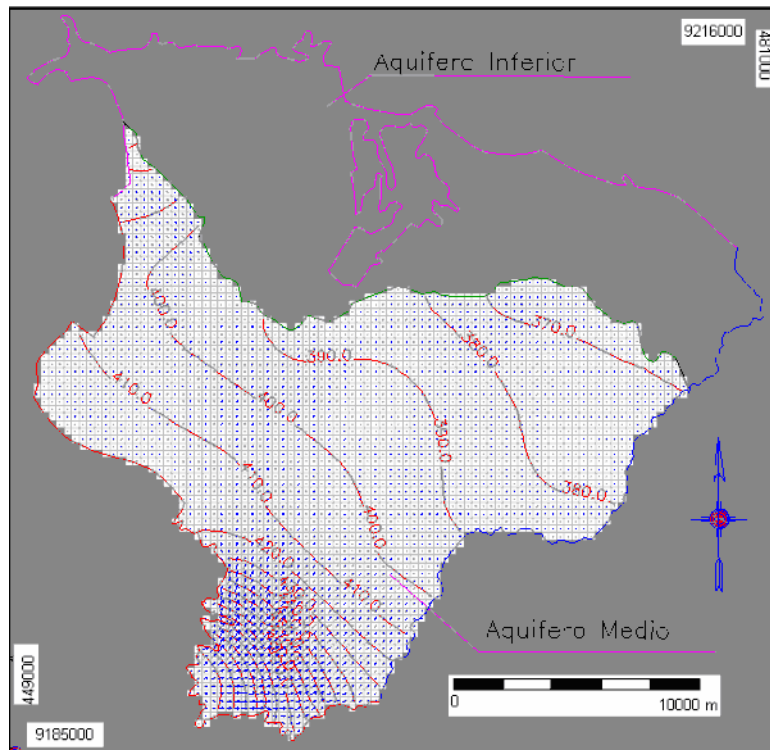


Figura23. Fluxo na camada 5, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente chuvoso.

Abaixo a figura 24 e o quadro 12 mostram o balanço hídrico do cenário no estado transiente chuvoso.

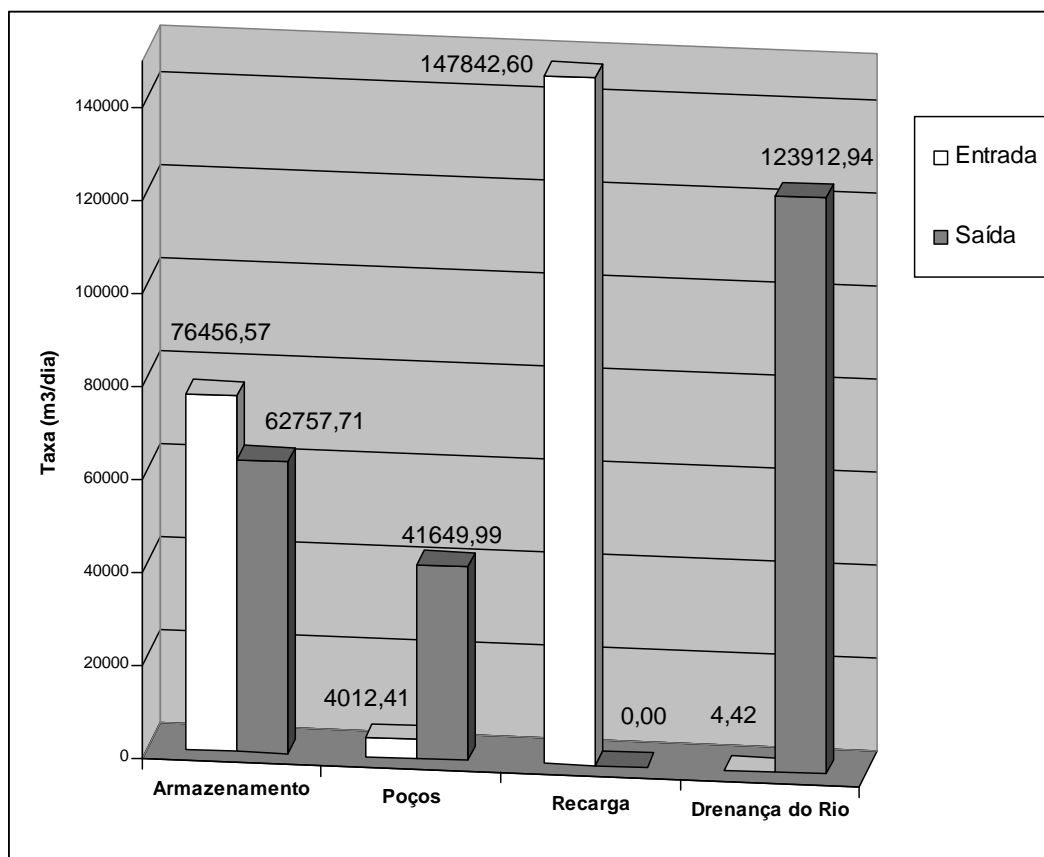


Figura24. Balanço hídrico do modelo no regime transiente para o período chuvoso.

Quadro12. Balanço hídrico calculado pelo modelo, Simulação 2 em regime transiente período chuvoso.

Parâmetros	Entrada (m ³ /dia)	Saída (m ³ /dia)
Armazenamento	76456,57	62757,71
Poços	4012,41	41649,99
Recarga	147824,60	0,00
Drenança do Rio	4,42	123912,94
Total	228316,00	228320,63
Diferença		4,63

3.1.3 Estado transiente para o período seco

Os principais dados de entrada do modelo para o período seco e estado transiente estão na tabela 13 abaixo.

Quadro13. Características da simulação do estado transiente seco para o modelo I.

Parâmetros	Valores	
Condutividade Hidráulica (K)	Camada 1	Aqüífero inferior – 9×10^{-6} m/s Aqüífero médio – 5×10^{-6} m/s
	Camada 2	1×10^{-5} m/s
	Camada 3	1×10^{-5} m/s
	Camada 4	1×10^{-10} m/s
	Camada 5	4×10^{-6} m/s

Porosidade Efetiva	Camada 1	Aqüífero inferior – 0.02 Aqüífero médio – 0.1
	Camada 2	0.1
	Camada 3	0.1
	Camada 4	0.03
	Camada 5	0.02
Armazenamento Específico	Camada 1	1×10^{-7} 1/m
	Camada 2	1×10^{-7} 1/m
	Camada 3	1×10^{-7} 1/m
	Camada 4	$1,3 \times 10^{-3}$ 1/m
	Camada 5	1×10^{-4} 1/m
Coeficiente de Armazenamento	Camada 1	Aqüífero inferior – 1×10^{-4} Aqüífero médio – 2×10^{-4}
	Camada 2	2×10^{-4}
	Camada 3	2×10^{-4}
	Camada 4	1×10^{-2}
	Camada 5	1×10^{-4}
Duração (tempo)	180 dias	
Infiltração Efetiva	11 mm	
Regime de Escoamento	Transiente	
Resultado	Após 180 dias	

Esta simulação apresentou linhas equipotenciais variando de 337,33 m a 444,78 m ao longo do aquífero da primeira camada, como mostrado na figura 25, com um gradiente médio de $3,69 \times 10^{-3}$ m/m e uma velocidade média no fluxo para as camadas 1, 2 e 3 com valores médios de 5,48 cm/dia, 4,09 cm/dia e 2,46 cm/dia, respectivamente. Já para as camadas 4 e 5 a velocidade média do fluxo foi de 0,0675 cm/ano e 9,16 cm/dia, respectivamente.

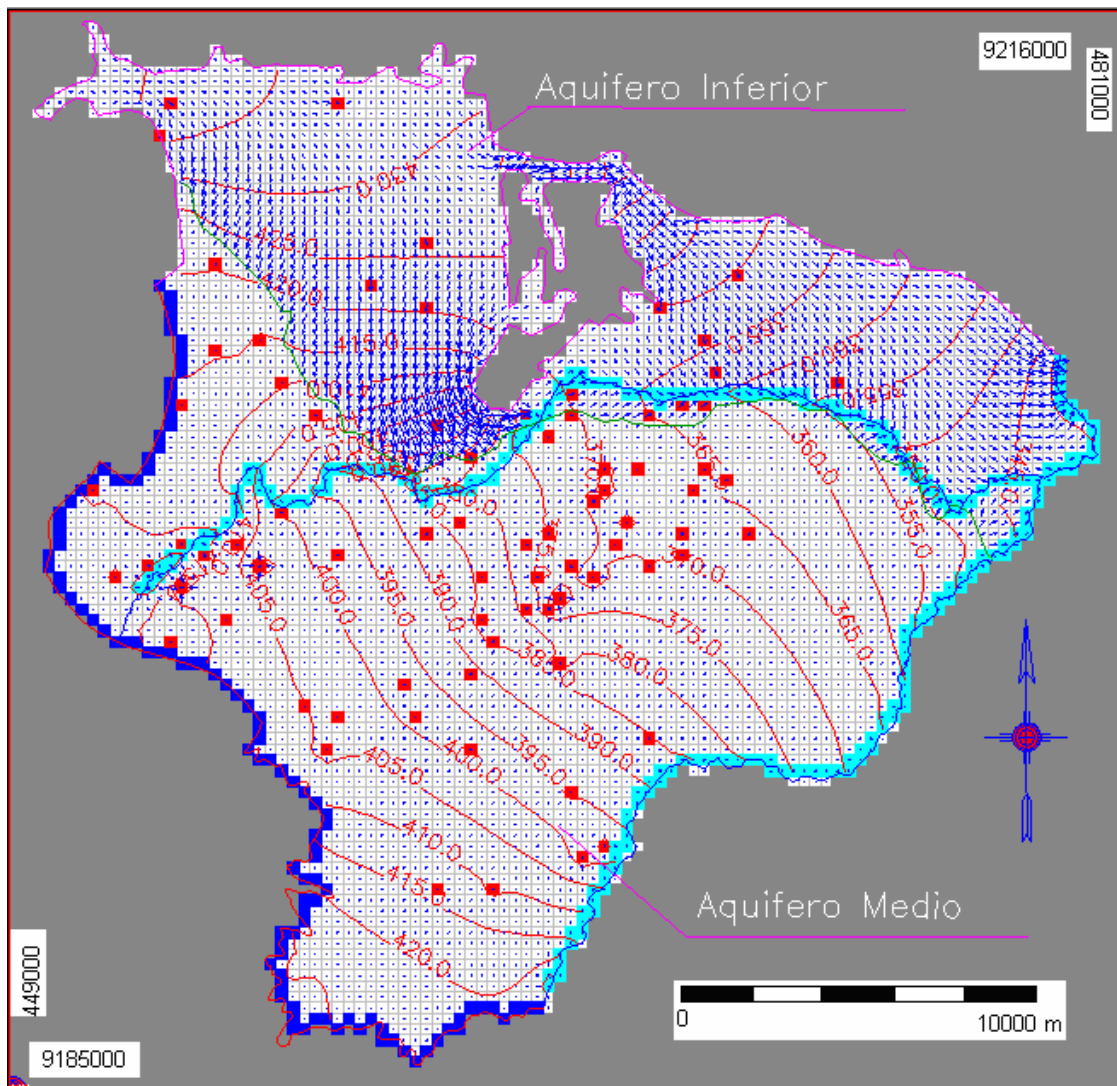


Figura25. Vetores de fluxo e variação das linhas equipotenciais, de 5 em 5 metros, para a camada 1 no estado transiente seco.

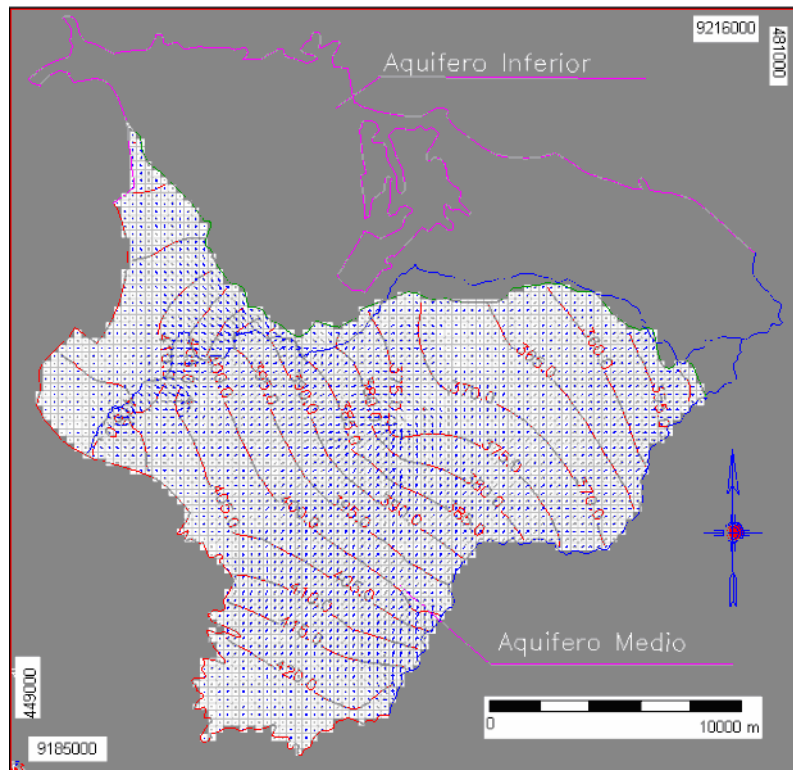


Figura26. Fluxo na camada 2, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente seco.

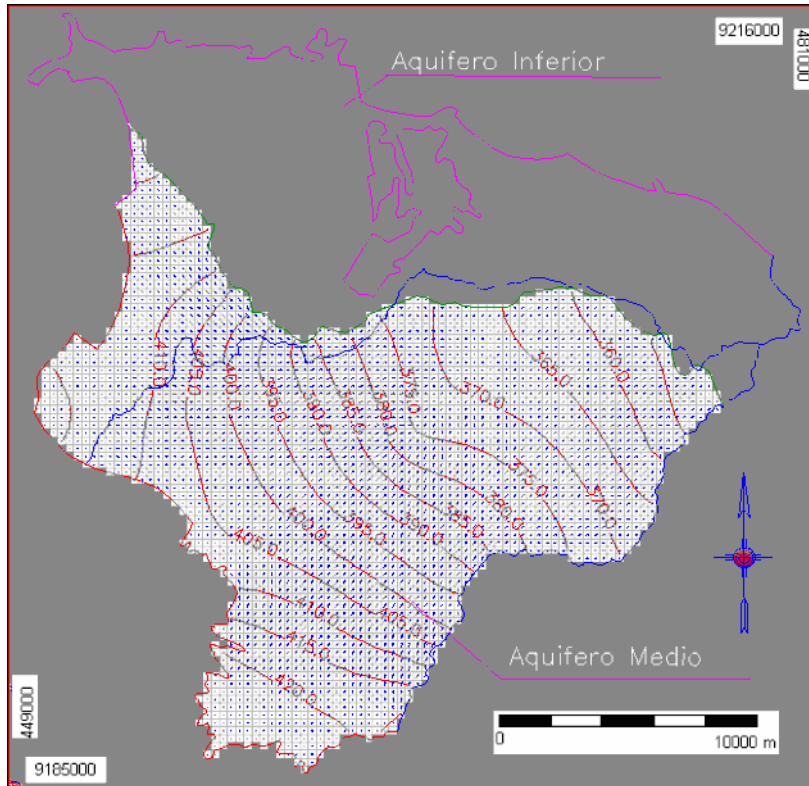


Figura27. Fluxo na camada 3, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente seco.

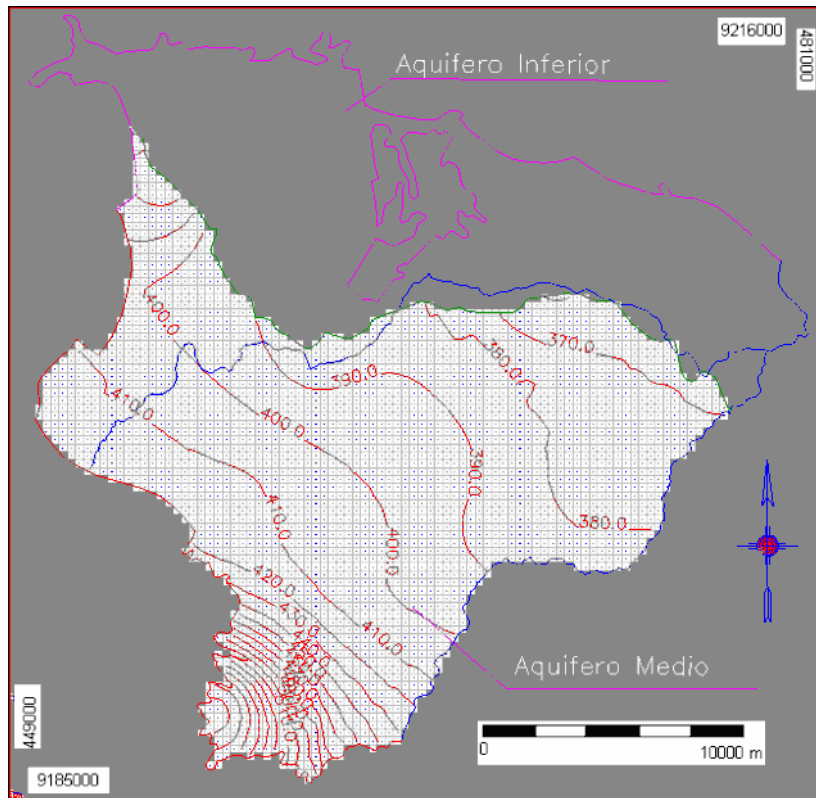


Figura28. Fluxo na camada 4, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente seco.

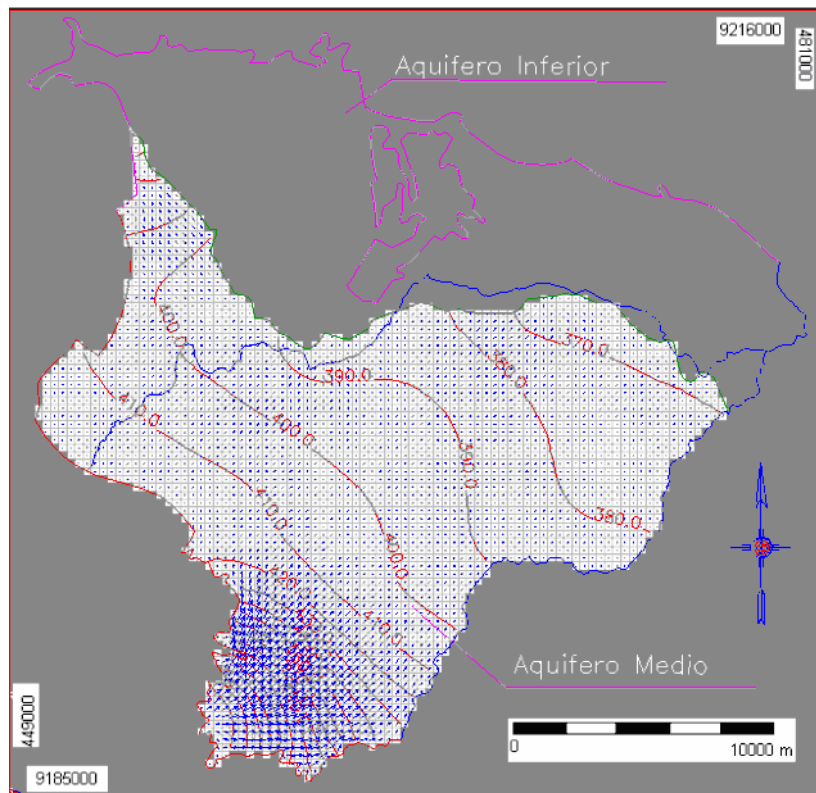


Figura29. Fluxo na camada 5, e curvas potenciométricas de 10,0 em 10,0 metros, no estado transiente seco.

O balanço hídrico para o estado transiente e período seco está mostrado na figura 30 e tabela abaixo

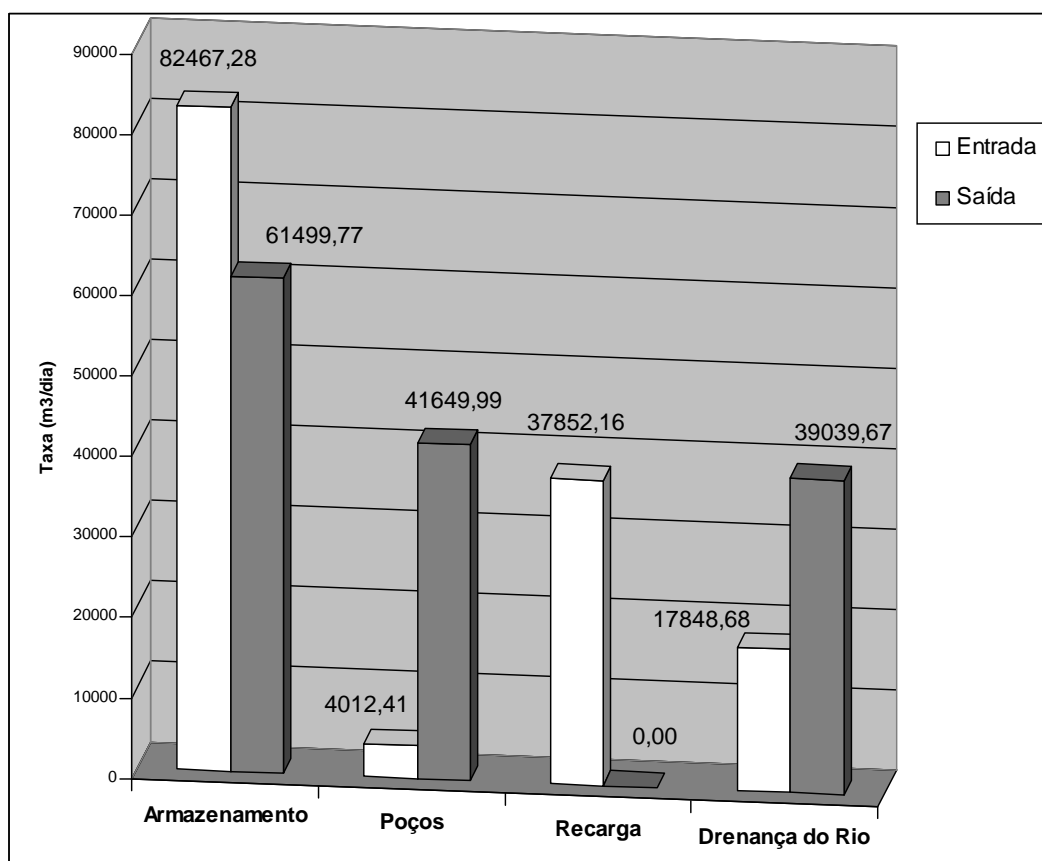


Figura30. Balanço hídrico do modelo no regime transiente para o período seco.

Quadro14. Balanço hídrico calculado pelo modelo, em regime transiente período seco

Parâmetros	Entrada (m³/dia)	Saída (m³/dia)
Armazenamento	82467,28	61499,77
Poços	4012,41	41649,99
Recarga	37852,16	0,00
Drenança do Rio	17848,68	39039,67
Total	142180,52	142189,63
Diferença		8,91

3.2 Calibração (modelo I)

Com os dados disponíveis de duas fontes diferentes (COGERH e CPRM) obtivemos as linhas potenciométricas observadas. Após se avaliar o comportamento do aquífero com os dados disponíveis da área fez-se uma tentativa de calibrar o modelo. Como tínhamos apenas as cargas observadas e não dispúnhamos de testes de bombeamento na área de estudo, que nos desse os contornos da condutividade hidráulica, mas apenas valores médios de toda a área. Então partindo dessas cargas potenciométricas observadas que resolvemos utilizar um método de calibração que leva em conta o gradiente hidráulico.

Com os dados disponíveis foram geradas as linhas potenciométricas observadas a partir da distribuição dos níveis estáticos observados. Com os dados fornecidos pela COGERH conseguimos um total de 76 poços com nível estático e da CPRM apenas 12 poços na área de

estudo. Abaixo estão as figuras com as curvas potenciométricas observadas geradas a partir das duas fontes de dados e a distribuição de poços na área. .

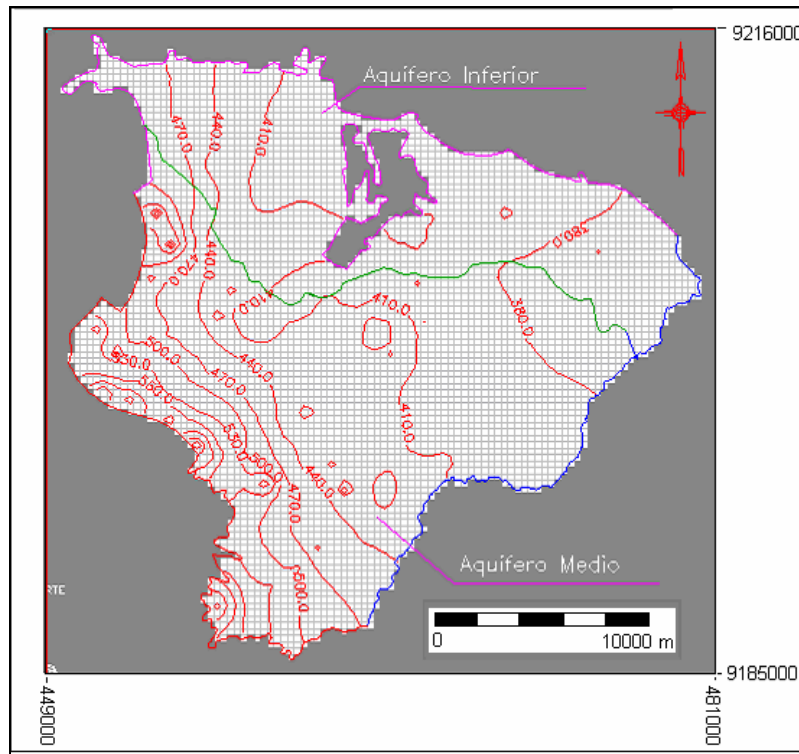


Figura31. Linhas potenciométricas de 20 em 20 m, geradas a partir do nível estático de 76 poços com dados fornecidos pela COGERH.

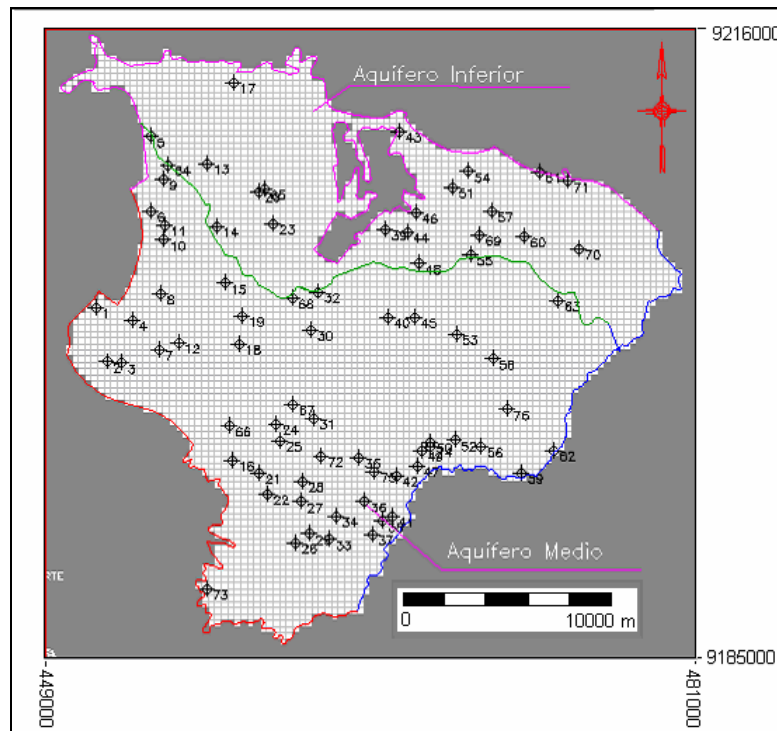


Figura32. Distribuição dos 76 poços, com nível estático medido, fornecidos pela COGERH.

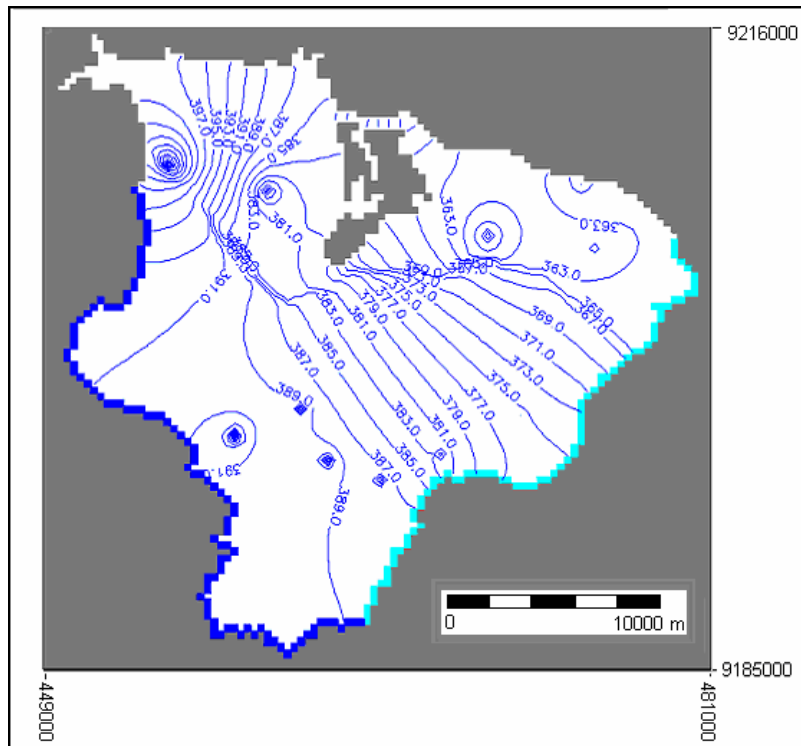


Figura33. Linhas potenciométricas de 2 em 2 m, geradas a partir do nível estático de 12 poços com dados fornecidos pela CPRM.

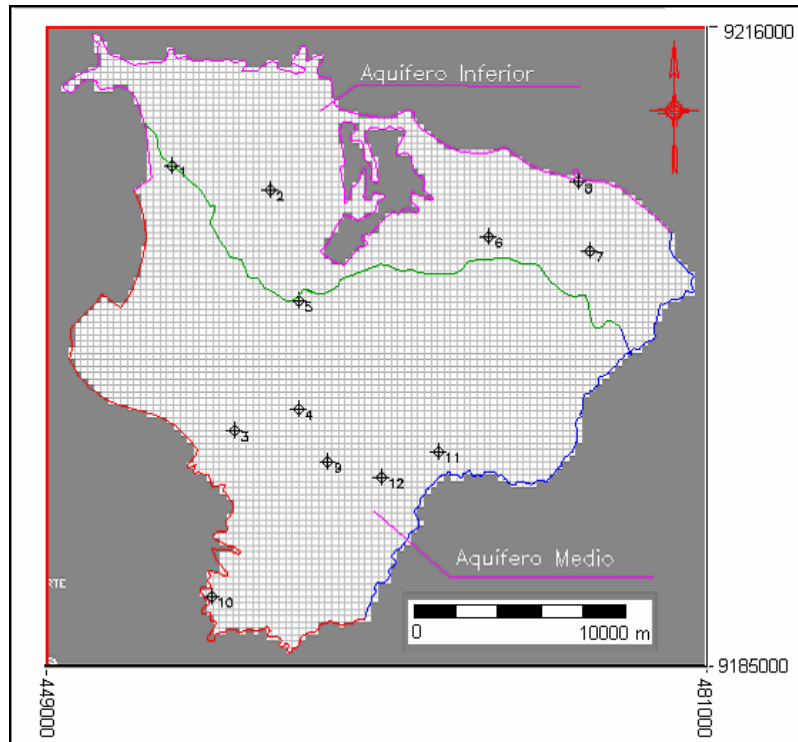


Figura34. Distribuição dos 12 poços, com nível estático medido, fornecidos pela COGERH.

Uma maior quantidade e distribuição podem ser percebidas nos dados da COGERH e isso explica a variação entre as linhas equipotenciais observadas que ficaram entre 454,4 m e

678,9 m. Enquanto nos dados de monitoramento fornecidos pela CPRM a variação das linhas potenciométricas ficou entre 353 e 424 m.

Isso pode ser explicado pela diferença de quantidade e distribuição desses dados. Como não há o conhecimento do zoneamento das condutividades hidráulicas da região de estudo, sendo esse zoneamento essencial para a calibração do modelo pelo pacote PEST contido no PMWIN-Pro, é que foi desenvolvido um programa de calibração em linguagem Fortran que retorna as condutividades hidráulicas a partir do gradiente hidráulico observado, denominando de MIGHA – Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo.

Primeiramente a calibração foi feita com os dados da COGERH, por estes serem em maior quantidade e melhores distribuídos na área, e o resultado da raiz do erro quadrático médio é mostrado na figura 35. Os valores variam de 49,35 metros no início até 329,58 metros na iteração 15.

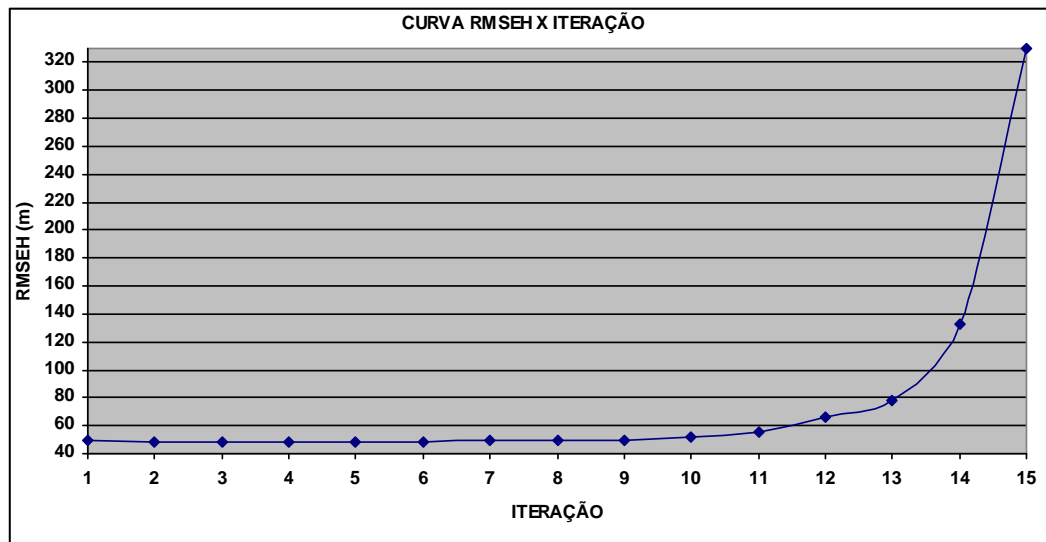


Figura35. Curva da raiz do erro quadrático médio (RMSEH) em relação às cargas calculadas e observadas (todas as células ativas) versus as iterações (Dados COGERH).

A Figura 36 mostra a variação da média dos ângulos ϕ (ângulos entre os vetores dos gradientes das cargas observadas e calculadas).

Os valores dos ângulos ϕ mostram a divergência do fluxo ao longo das 15 iterações. Os valores variaram de 65,24 graus, no início da iteração, a 68,71 graus na iteração 15.

Com esses resultados pode-se ver que não foi possível calibrar o modelo com os dados observados. Uma explicação para o fato é que os dados fornecidos pela COGERH foram coletados em campanhas diferentes e com diferença de 2 anos de coleta (2001 e 2002). E ao longo do ano os níveis estáticos variam muito, além do que a distribuição e a quantidade destes poços é muito pequena comparada com a área de trabalho.

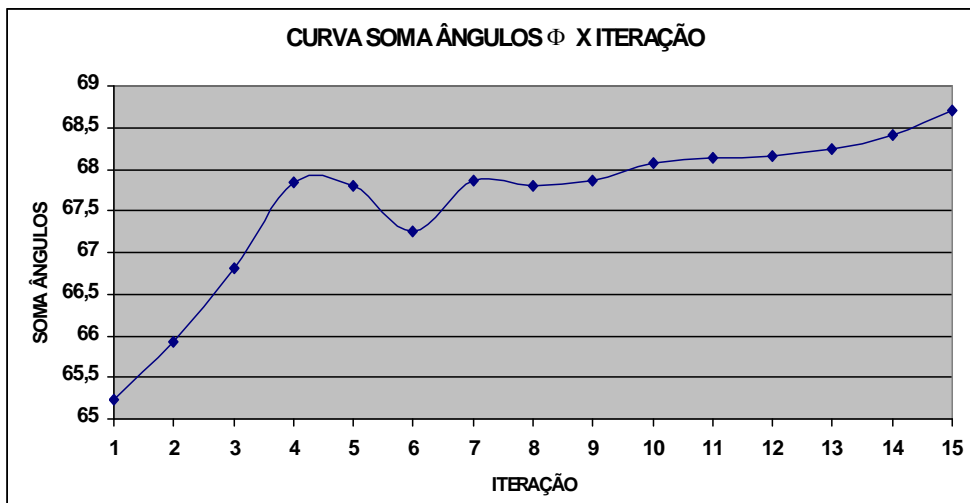


Figura36. Curva da média dos ângulos ϕ entre os gradientes das cargas calculados e observados (todas as células ativas) versus as iterações (Dados COGERH).

Apesar de não ter-se conseguido resultados satisfatórios com os poços da COGERH, mesmo assim, tentou-se fazer a calibração com a bateria de 12 poços (CPRM), com medições feitas em quatro campanhas entre os anos de 2005 e 2006, devido à frequência nessas medições e serem mais confiáveis. Os resultados obtidos das 6 iterações podem ser observados nas figuras abaixo. Os valores da raiz do erro quadrático médio foram melhores do que a tentativa anterior de calibração, mas mesmo assim não satisfatórios. A média dos ângulos ϕ chegou a um mínimo de 34,36 graus e a variância 74,47 m.

Foram obtidos resultados melhores com a utilização de apenas 12 poços da CPRM devido a estes serem mais confiáveis e medidos em campanha regulares sem intervalos grandes. Há uma impressão da convergência do modelo, mas com as condutividades hidráulicas obtidas na iteração 7 não foi possível rodar o modelo no PMWIN, devido aos valores de condutividade hidráulica serem irreais pra a região.

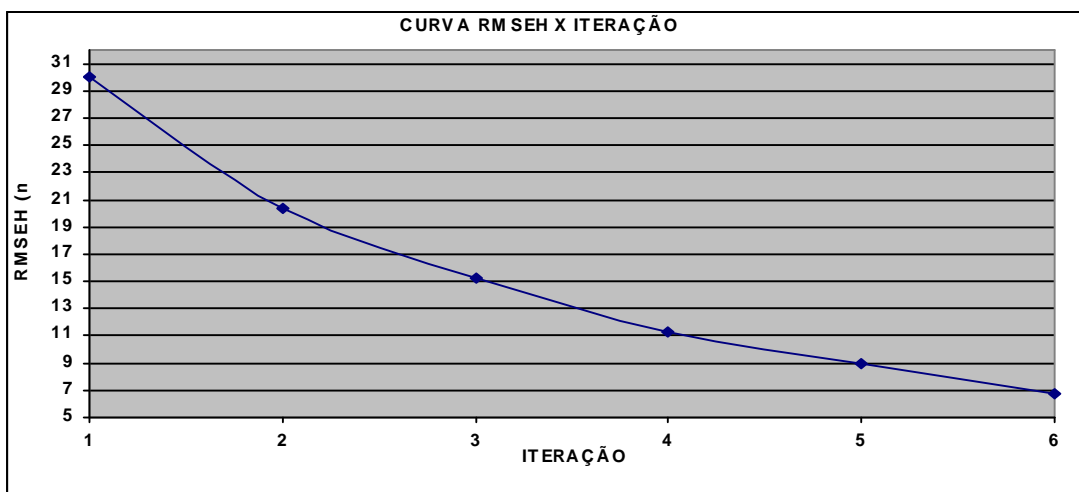


Figura37. Curva da raiz do erro quadrático médio (RMSEH) em relação às cargas calculadas e observadas (todas as células ativas) versus as iterações (Dados CPRM).

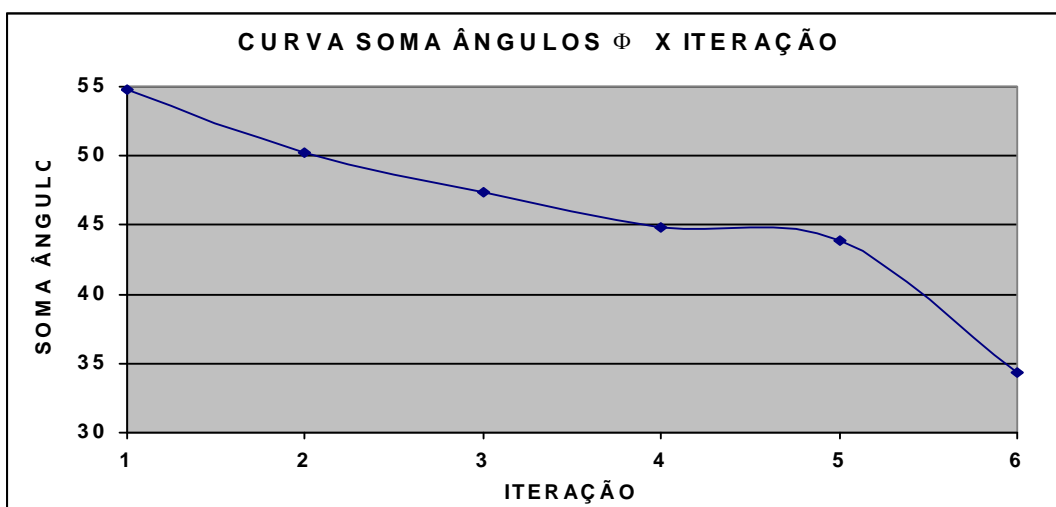


Figura38. Curva da média dos ângulos ϕ entre os gradientes das cargas calculados e observados (todas as células ativas) versus as iterações.

3.3 Modelo II

3.3.1 Estado permanente para o período chuvoso

Com o PMWIN foi realizada uma saída gráfica das curvas equipotenciais de 10 em 10 metros (Figura 39). O quadro 15 abaixo sumariza alguns dos dados de entrada do modelo para essa simulação.

Quadro15. Características da simulação do estado permanente chuvoso para o modelo I I.

	Condutividade Hidráulica (K)	Porosidade Efetiva	Infiltração Efetiva
Camada 1	5×10^{-6} m/s	0.1	191 mm
Camada 2	1×10^{-5} m/s	0.1	-
Camada 3	1×10^{-5} m/s	0.1	-
Camada 4	1×10^{-10} m/s	0.03	-
Camada 5	4×10^{-6} m/s	0.02	-

O valor mínimo de carga hidráulica calculada pelo PMWIN foi de 328.54 metros e o máximo de 513.35 metros para a primeira camada. O quadro 16 mostra os resultados dos valores das velocidades médias para cada camada.

Quadro16. Velocidades médias das camadas para estado estacionário chuvoso.

	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
Velocidade Média (cm/dia)	1.204	1.854	1.651	2.07×10^{-5}	4.24×10^{-4}

Esses valores definidos como velocidade média dos aquíferos e do aquífero Brejo Santo, foi calculado pela média aritmética dos valores das velocidades médias de cada célula que foi gerado pelo PMWIN. A camada 4, por ser um aquífero apresentou um valor baixo de velocidade. A formação Mauriti (camada 5) também apresentou uma baixa velocidade, talvez por esta se encontrar “isolada” dos demais aquíferos pelo aquífero, que não permite um movimento significativo de fluxo hídrico.

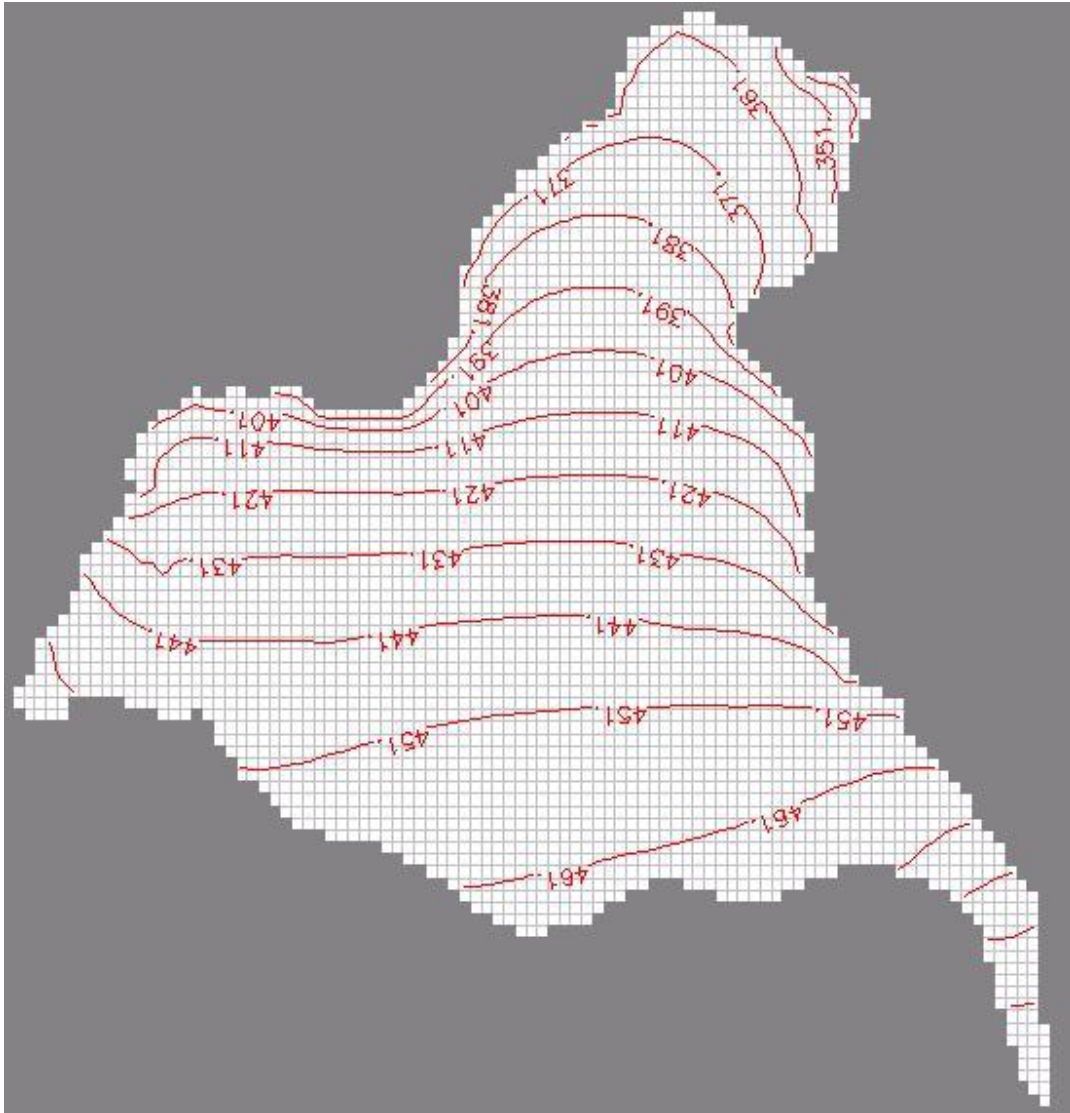


Figura39. Linhas equipotenciais, na camada 1, de 10 em 10 metros para o estado permanente chuvoso .

As linhas de fluxo para a formação Rio da Batateira (camada 1), calculadas com o pacote PMPATH, do PMWIN, são mostradas na figura 40 abaixo. A tendência do fluxo (direção da maior para a menor carga) tende acompanhar também a topografia do terreno, o que é justificado pelas linhas potenciométricas começar com valores maiores próximo à chapada do Araripe e decrescerem conforme a topografia.

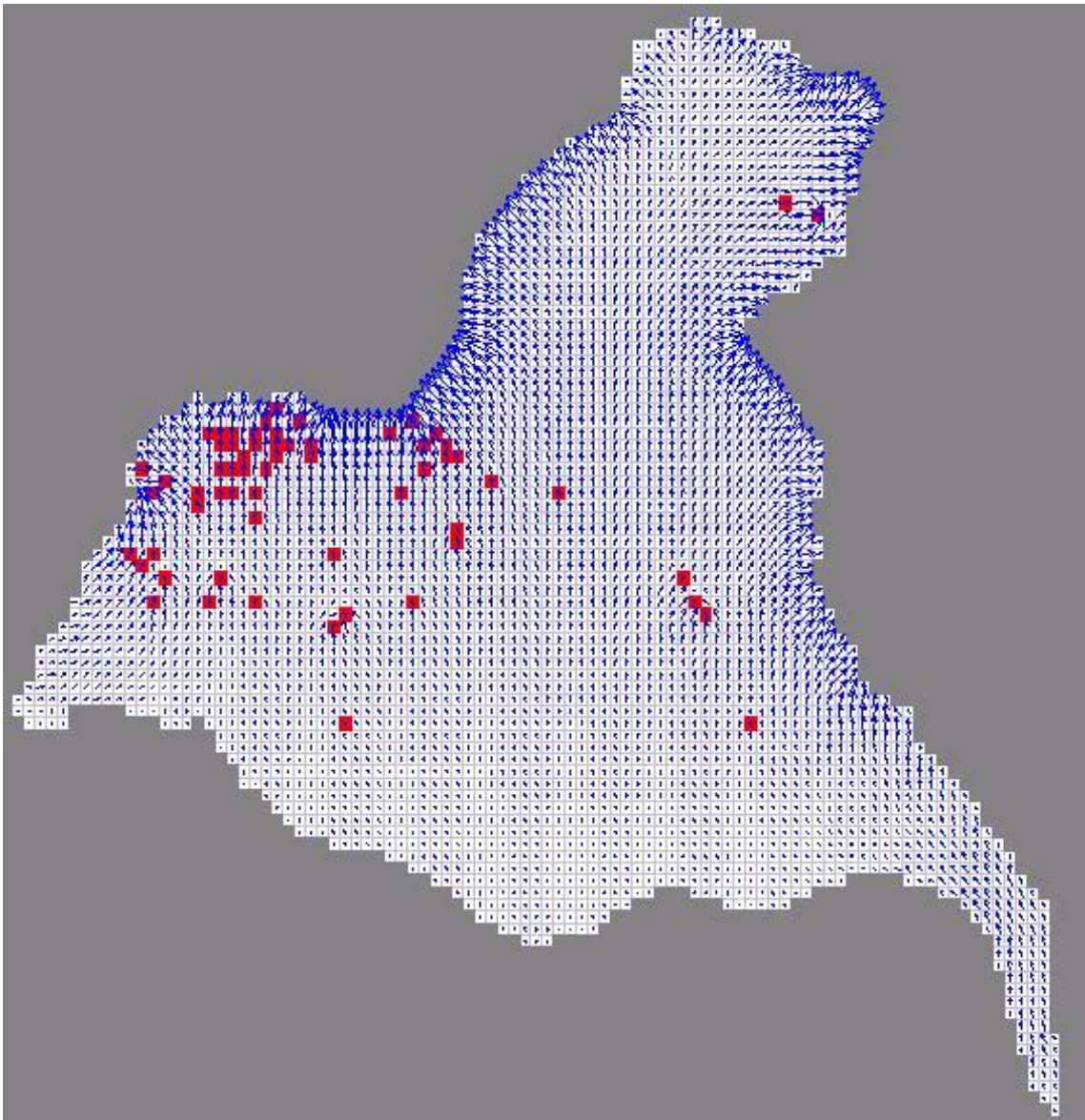


Figura40. Linhas de fluxo na camada 1 para o estado permanente chuvoso.

Pela figura acima é possível notar a direção de fluxo em cada célula. Os pontos em vermelho são os poços de bombeamento. Pode-se notar que alguns poços “puxam” com mais intensidade as linhas de fluxo. Isto está relacionado à vazão, quanto maior for a retirada de água do poço mais células irão contribuir com vetores de fluxo.

As figuras abaixo mostram concomitantemente as linhas equipotenciais e de fluxo das camadas 2,3,4 e 5, respectivamente, para a simulação no estado permanente e período chuvoso.

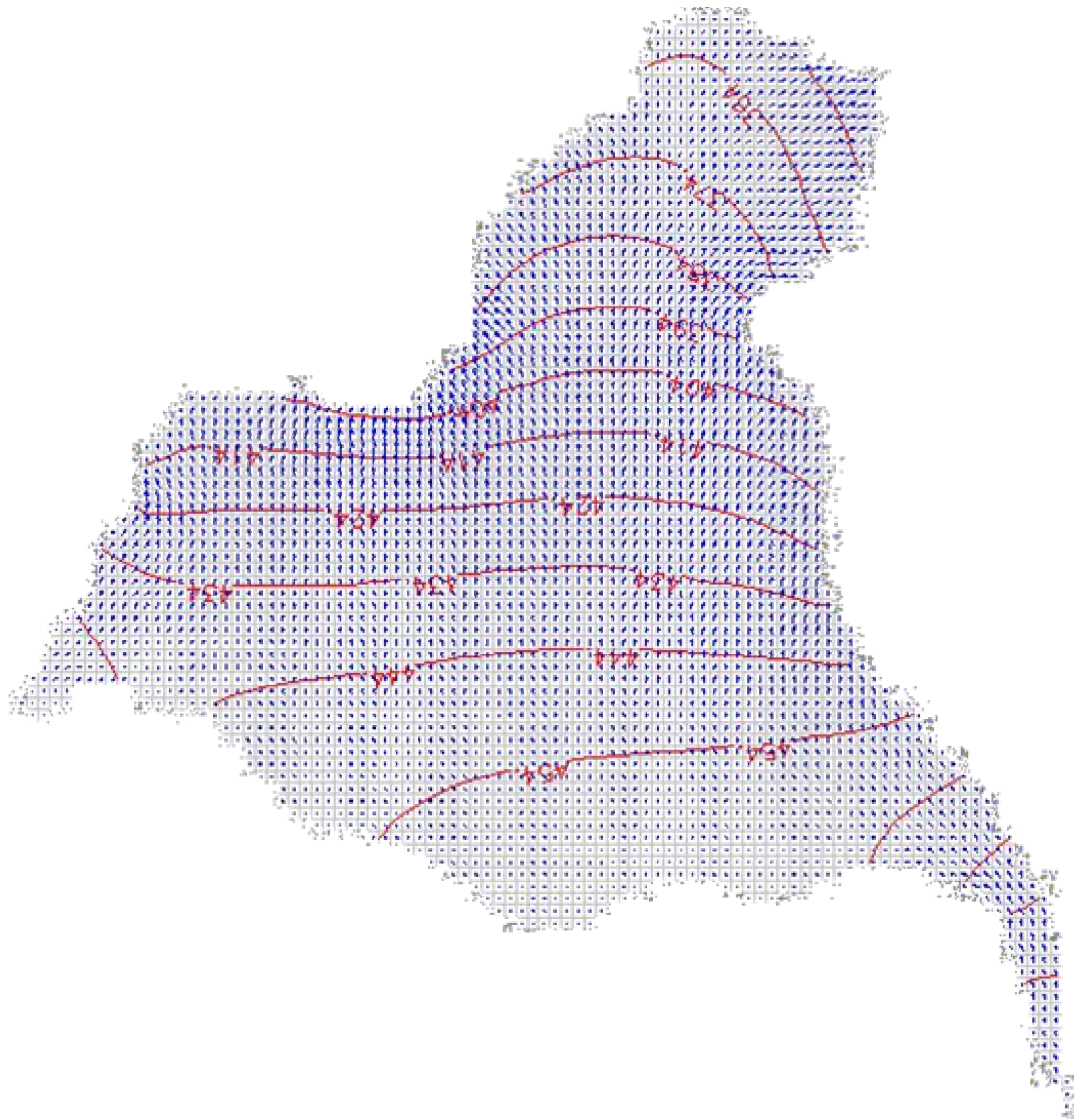


Figura41. Fluxo na camada 2, e curvas potenciométricas de 10 em 10 metros, para o período chuvoso e estado permanente.

Na figura 41, os vetores de fluxo da segunda camada próximos aos poços apresentam ainda uma pequena reação ao bombeamento. Isso pode se dever ao fato que ao inserir u ma célula com propriedade de poço no pacote Well do PMWIN, o modelo reconhece como profundidade do poço a profundidade da camada (CHIANG & KINZELBACH, 2003). A menor carga calculada nessa camada foi de 343.70 metros e a maior de 506.66 metros.

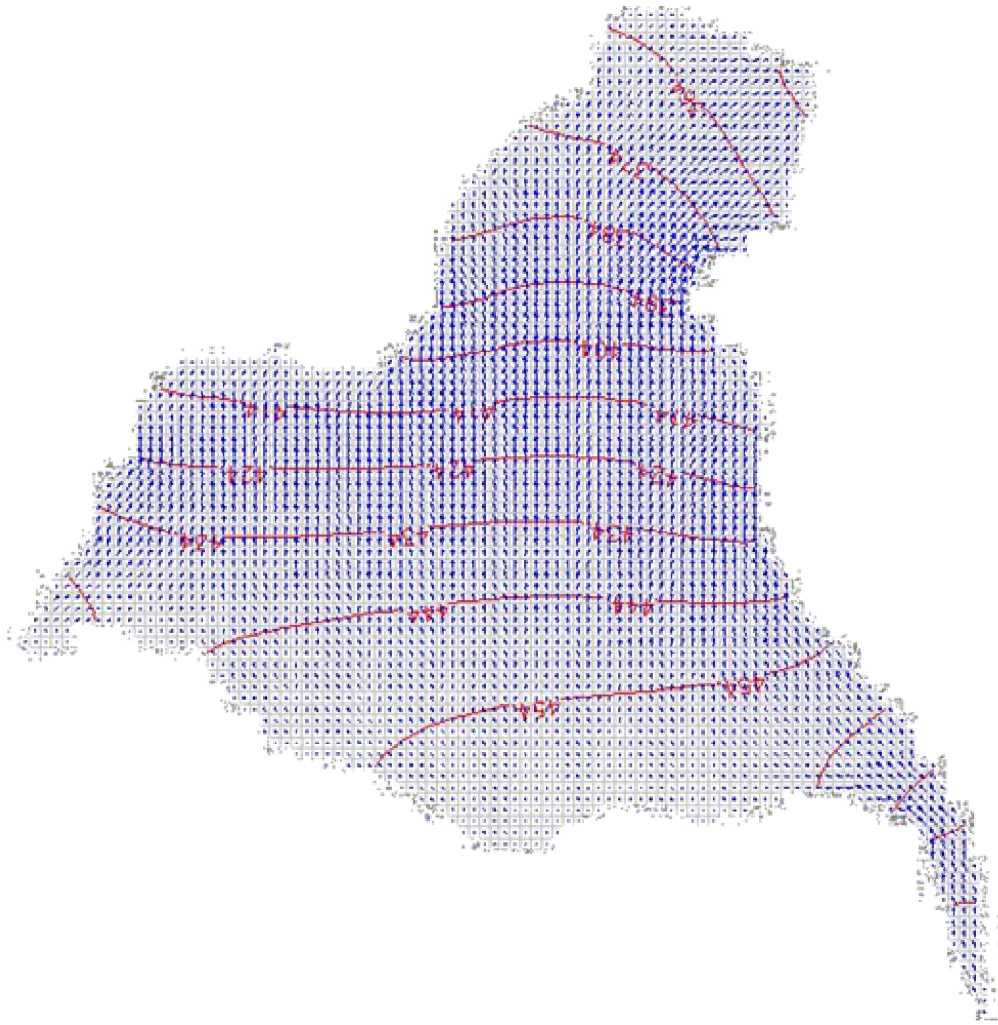


Figura42. Fluxo na camada 3, e curvas potenciométricas de 10 em 10 metros, para o período chuvoso e estado permanente.

Na camada 3, o comportamento das linhas de fluxo na formação Missão Velha parecem não sofrer mais interferência dos poços de bombeamento. A diferença entre a menor e maior célula de carga hidráulica calculada pelo PMWIN foi de 152.4 metros.

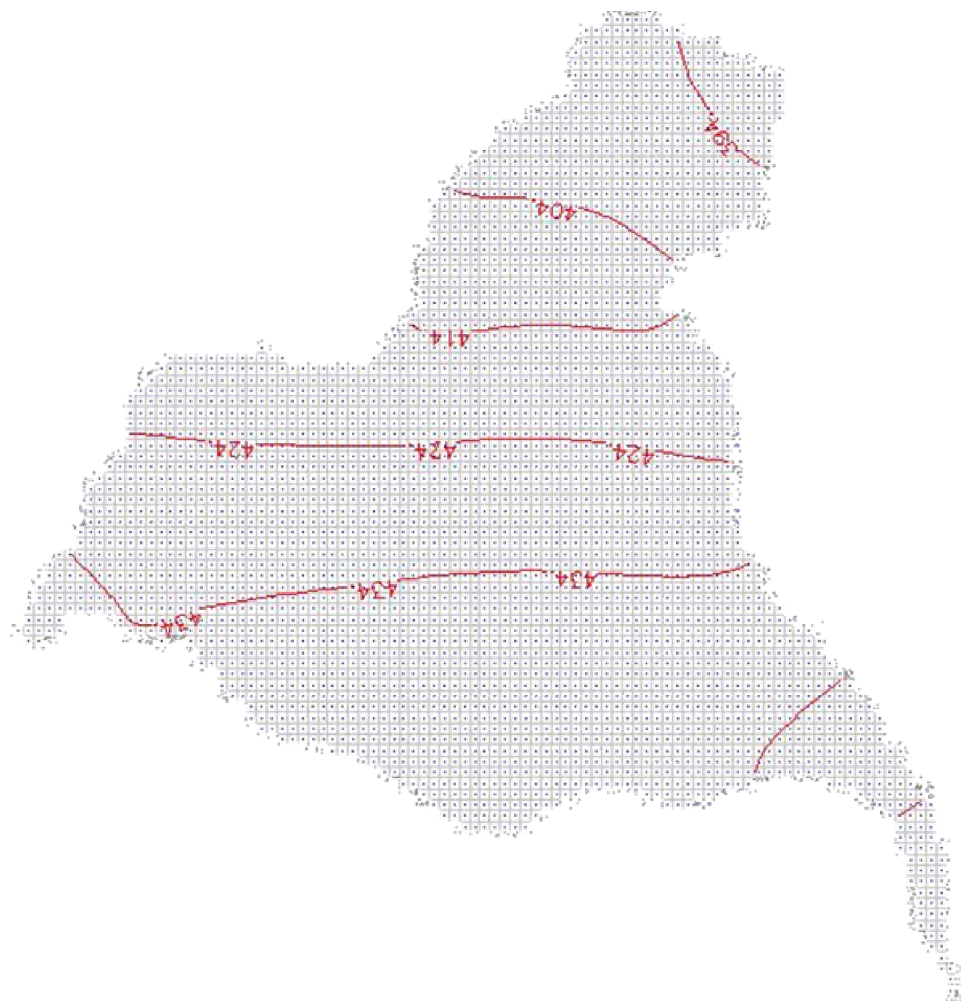


Figura43. Fluxo na camada 4, e curvas potenciométricas de 1 em 1 metro, para o período chuvoso e estado permanente.

A camada 4 (Formação Brejo Santo) se comporta como aquífero, devido à sua baixa porosidade e condutividade hidráulica, portanto há pouco fluxo nessa camada o que resulta em pequenos vetores de fluxo. A variação do nível potenciométrico calculado, para a simulação permanente e para o período chuvoso, foi de 390.37 a 464.13 metros.

Na última camada (formação Mauriti) praticamente as linhas e os vetores de fluxo não variaram. A figura 5.9 abaixo mostra as linhas de fluxos, e vetores de fluxo quase que como pontos. As equipotenciais calculadas nessa camada, praticamente se mantiveram constantes ao longo da Zona de Pediplano e estão no curto intervalo entre 426.08 metros e 426.20 metros.

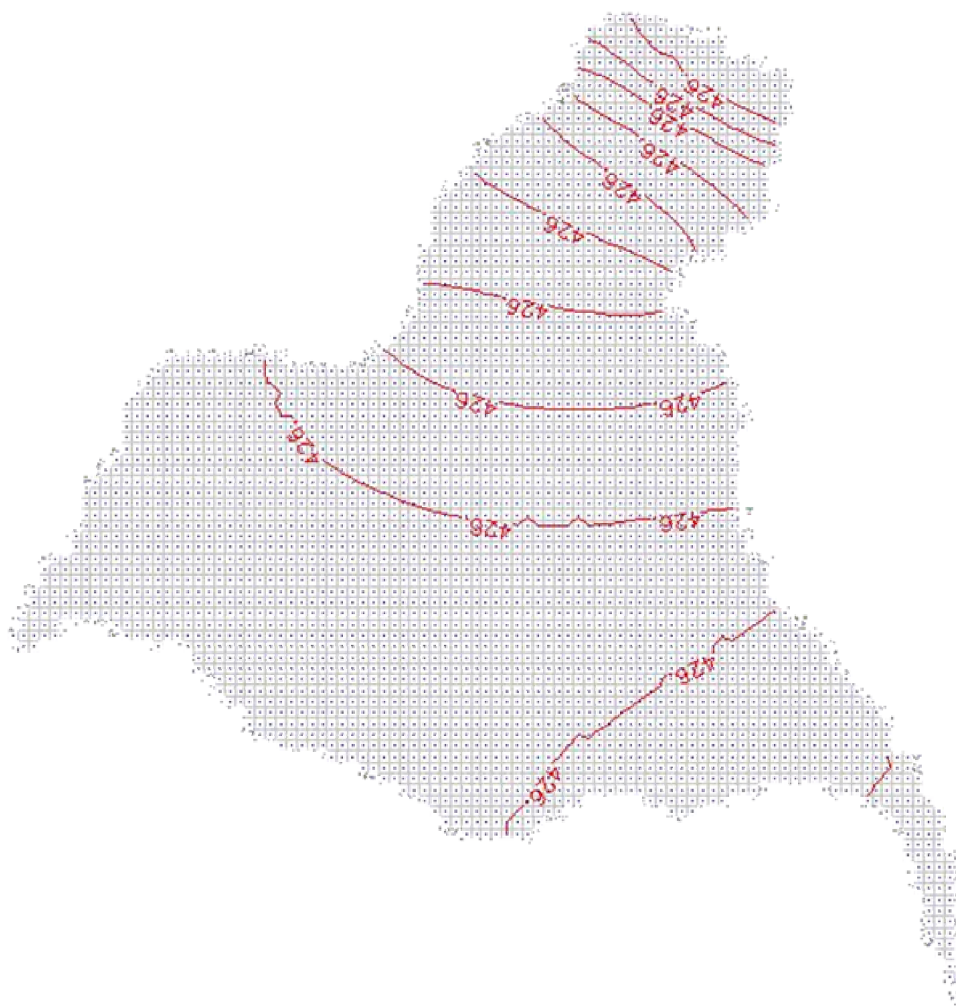


Figura44. Fluxo na camada 5, e curvas potenciométricas de 0.001 em 0.001 metro, para o período chuvoso e estado permanente.

O quadro abaixo mostra o balanço hídrico calculado pelo PMWIN para o modelo concebido.

Quadro17. Balanço Hídrico feito pelo PMWIN para simulação no estado estacionário.

Parâmetros	Entrada (m ³ /dia)	Saída (m ³ /dia)
Poços	4492.80	10550.61
Recarga	99969.00	0.00
Drenança do Rio	3546.45	97464.43
Total	108008.2515	108015.03
Diferença		-6.78

Na figura 45 abaixo estão representados graficamente os valores da tabela acima. O cálculo do balanço hídrico é feito com a ferramenta Water Budget do PMWIN.

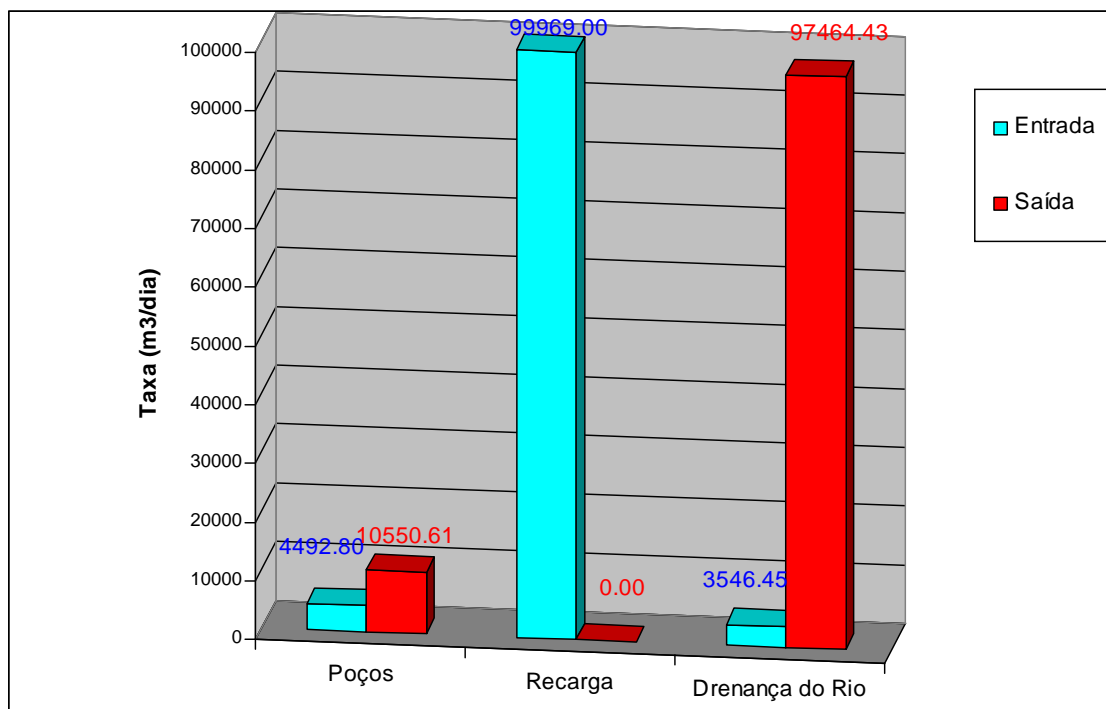


Figura45. Balanço hídrico para o regime permanente chuvoso.

3.3.2 Estado transiente para o período chuvoso

Para a simulação no estado transiente é necessário entrar com mais dois tipos de parâmetros no PMWIN: o armazenamento específico e o coeficiente de armazenamento. A simulação foi feita para o período correspondente ao final de 6 meses e alguns dados de entrada estão no quadro 18.

Quadro18. Características da simulação do estado transiente chuvoso para o modelo II.

Parâmetros	Camada	Valores
Condutividade Hidráulica (K) [m/s]	Camada 1	5×10^{-6}
	Camada 2	1×10^{-5}
	Camada 3	1×10^{-5}
	Camada 4	1×10^{-10}
	Camada 5	4×10^{-6}
Porosidade Efetiva	Camada 1	0.1
	Camada 2	0.1
	Camada 3	0.1
	Camada 4	0.03
	Camada 5	0.02
Armazenamento Específico [1/m]	Camada 1	1×10^{-7}
	Camada 2	1×10^{-7}

	Camada 3	1×10^{-7}
	Camada 4	$1,3 \times 10^{-3}$
	Camada 5	1×10^{-4}
Coeficiente de Armazenamento	Camada 1	2×10^{-4}
	Camada 2	2×10^{-4}
	Camada 3	2×10^{-4}
	Camada 4	1×10^{-2}
	Camada 5	1×10^{-4}
Duração [dias]	*	180
Infiltração Efetiva (recarga) [mm]	*	191

Os resultados das velocidades médias que foram determinadas a partir da matriz de velocidade gerado pelo PMWIN estão no quadro 19.

Quadro19. Velocidades médias das camadas para estado transiente chuvoso.

	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
Velocidade Média (cm/dia)	2.429	3.70	3.318	8.78×10^{-5}	8.69×10^{-6}

O desempenho das linhas equipotenciais, de 10 em 10 metros, para a simulação do estado transiente ao final dos 180 dias de simulação está representado na figura 5.17 para a formação Rio da Batateira. O valor máximo de carga calculada foi de 491.04 metros e a mínima de 328.5 metros.

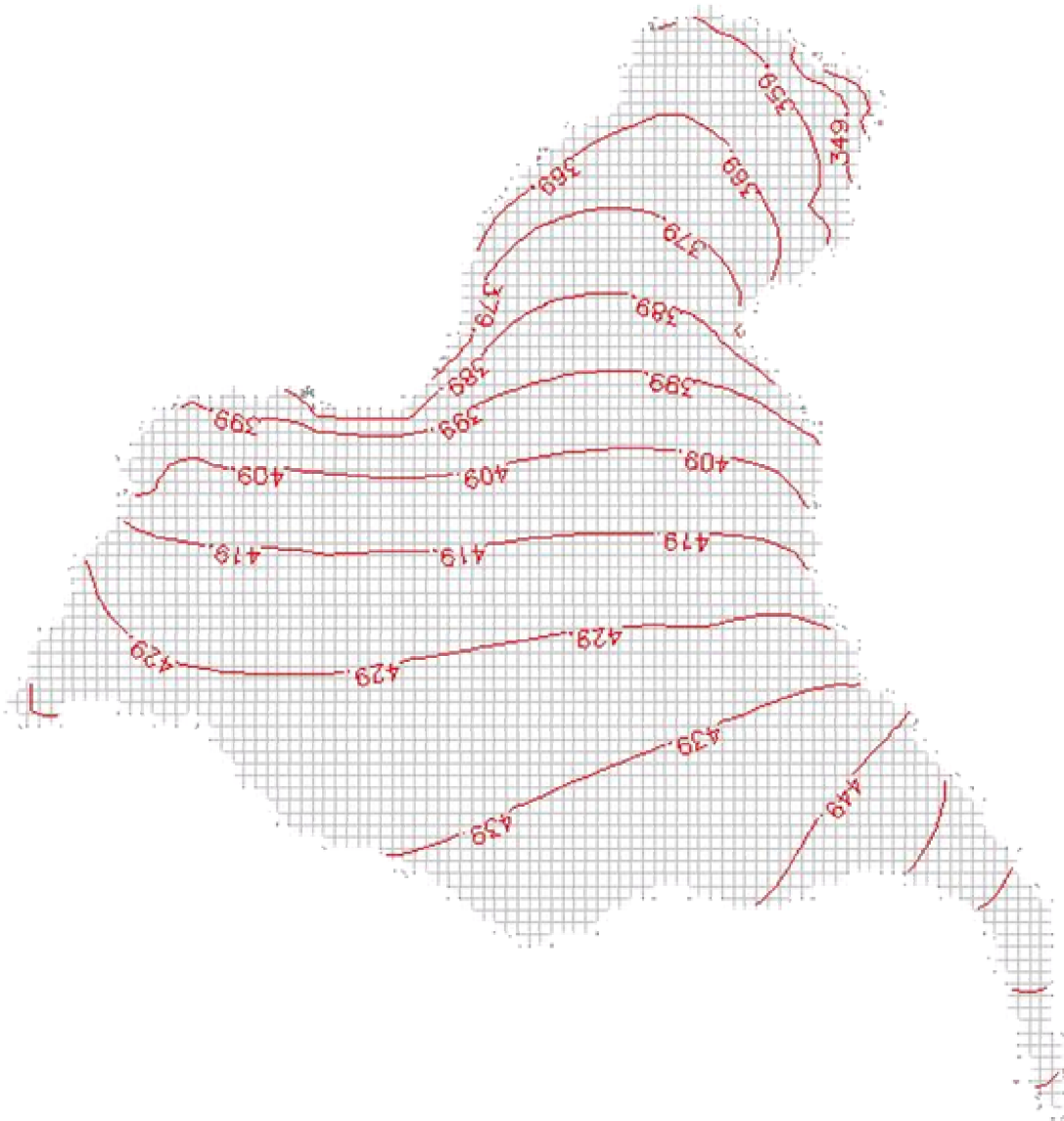


Figura46. Linhas equipotenciais na camada 1, de 10 em 10 metros na 1ª camada, para o período chuvoso e estado transiente.

Na figura 47 está representado os vetores de fluxos da camada 1. É perceptível que as intensidades dos vetores de fluxo tornam-se maiores próximos ao rio (limites ao norte, leste e oeste do modelo) e também aos redores dos poços de bombeamento (células em vermelho).

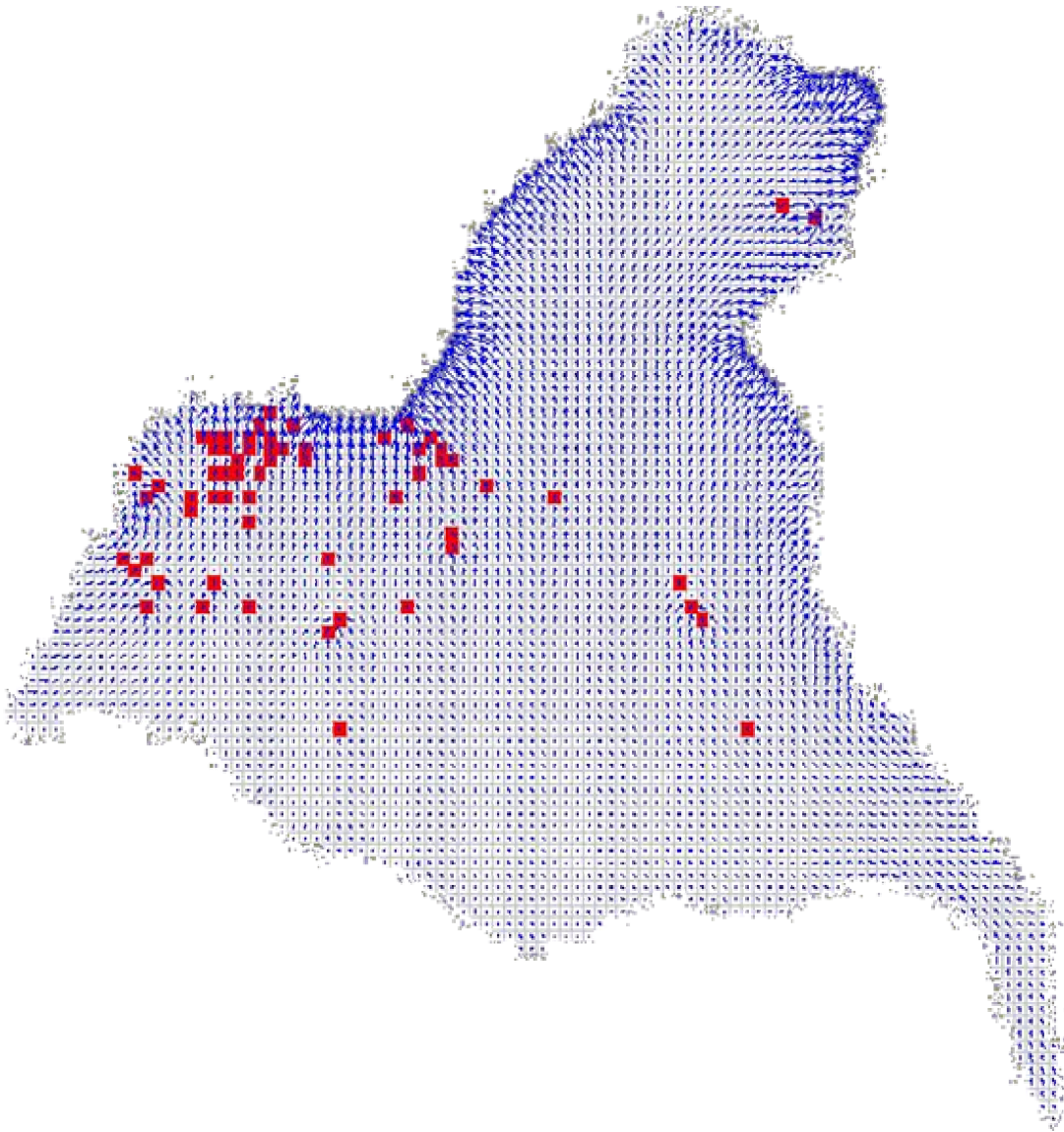


Figura47. Linhas Vetores de fluxo na camada 1, para o período chuvoso e estado transiente.

Os poços que possuem mais vazão solicitaram mais vetores de fluxos do que os poços de menores vazões.

As figuras 48, 49, 50 e 51 mostram as linhas equipotenciais e dos vetores de fluxo no modelo conceitual adotado para esta pesquisa nas formações Abaiar a, Missão Velha, Brejo Santo e Mauriti para a simulação do estado transiente chuvoso.

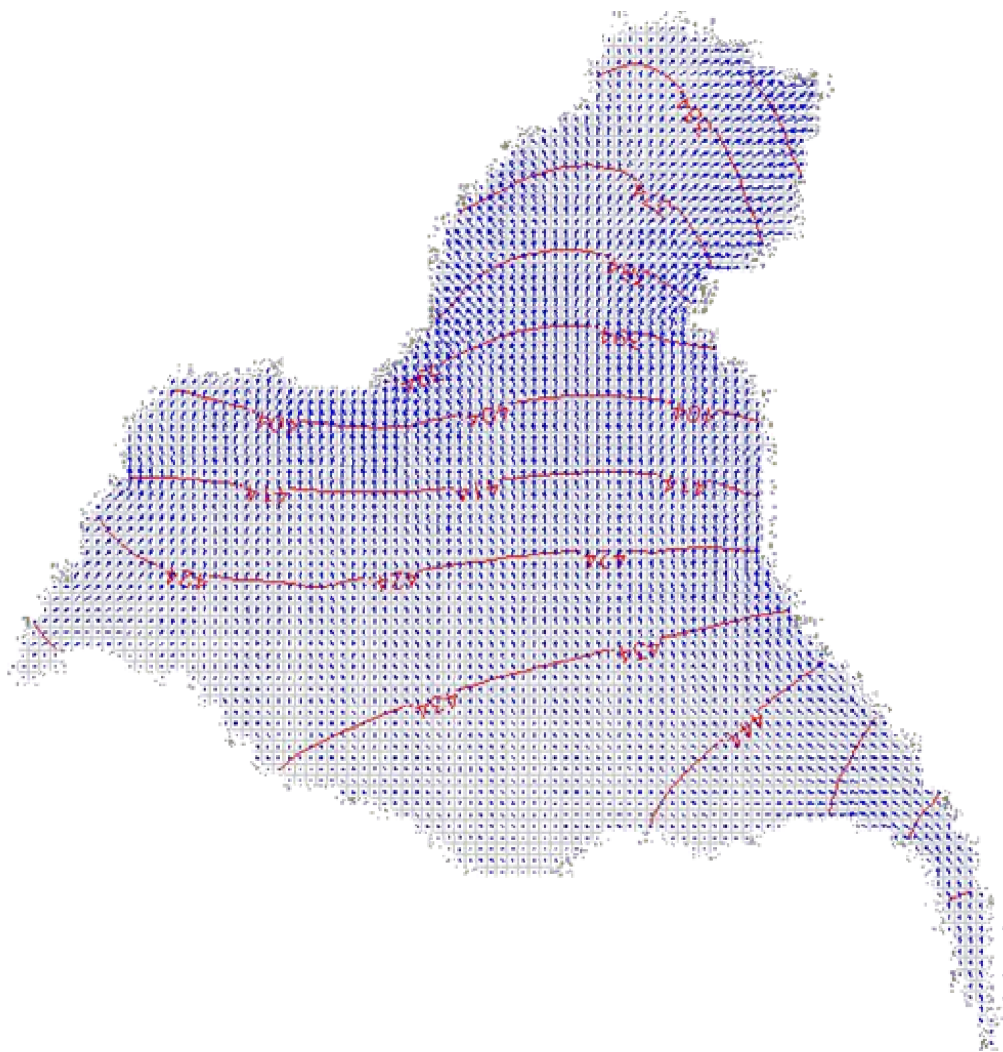


Figura48. Direção do Fluxo na camada 2, e curvas potenciométricas de 10 em10 metros, para o período chuvoso e estado transiente.

Na formação Abaiara, os comportamentos das equipotenciais e das linhas de fluxo foram mais suaves que na primeira camada. O valor máximo de carga calculada para essa camada foi de 485.79 metros e a mínima de 343.89 metros. A figura abaixo mostra a saída gráfica do PMWIN para a camada 3, que representa a formação Missão Velha.

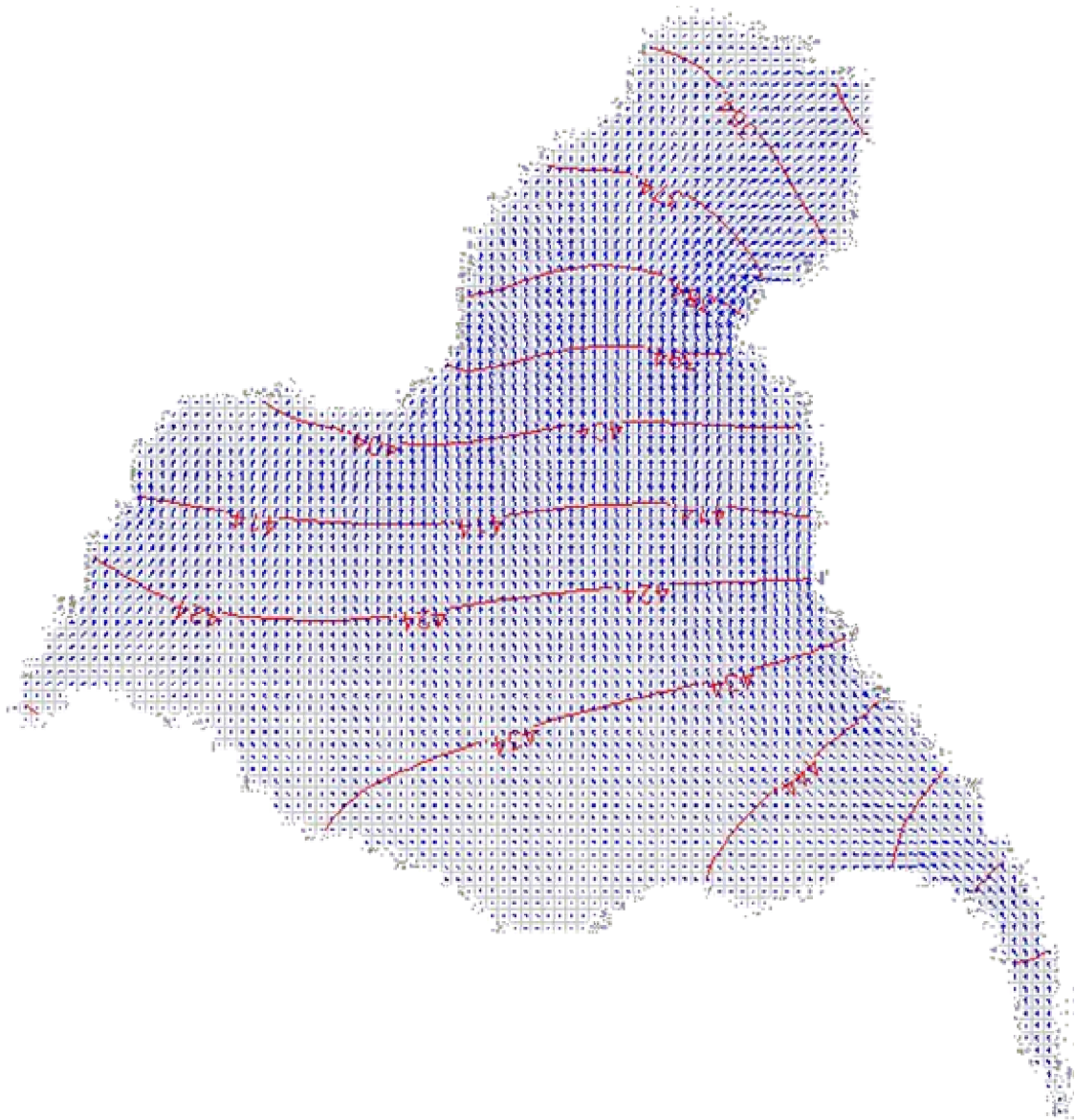


Figura49. Direção do Fluxo na camada 3, e curvas potenciométricas de 5,0 em 5,0 metros, para o período chuvoso e estado transiente.

É possível observar que houve uma melhor uniformidade tanto das linhas equipotenciais, como dos vetores de fluxo. Isso se deve ao fato da terceira camada se encontrar sem muitas influências do rio e das possíveis perturbações dos poços de bombeamento. O valor máximo de carga calculada para essa camada foi de 483.92 metros e a mínima de 351.96 metros.

A figura 50 abaixo representa as linhas equipotenciais e vetores de fluxo da camada 4.

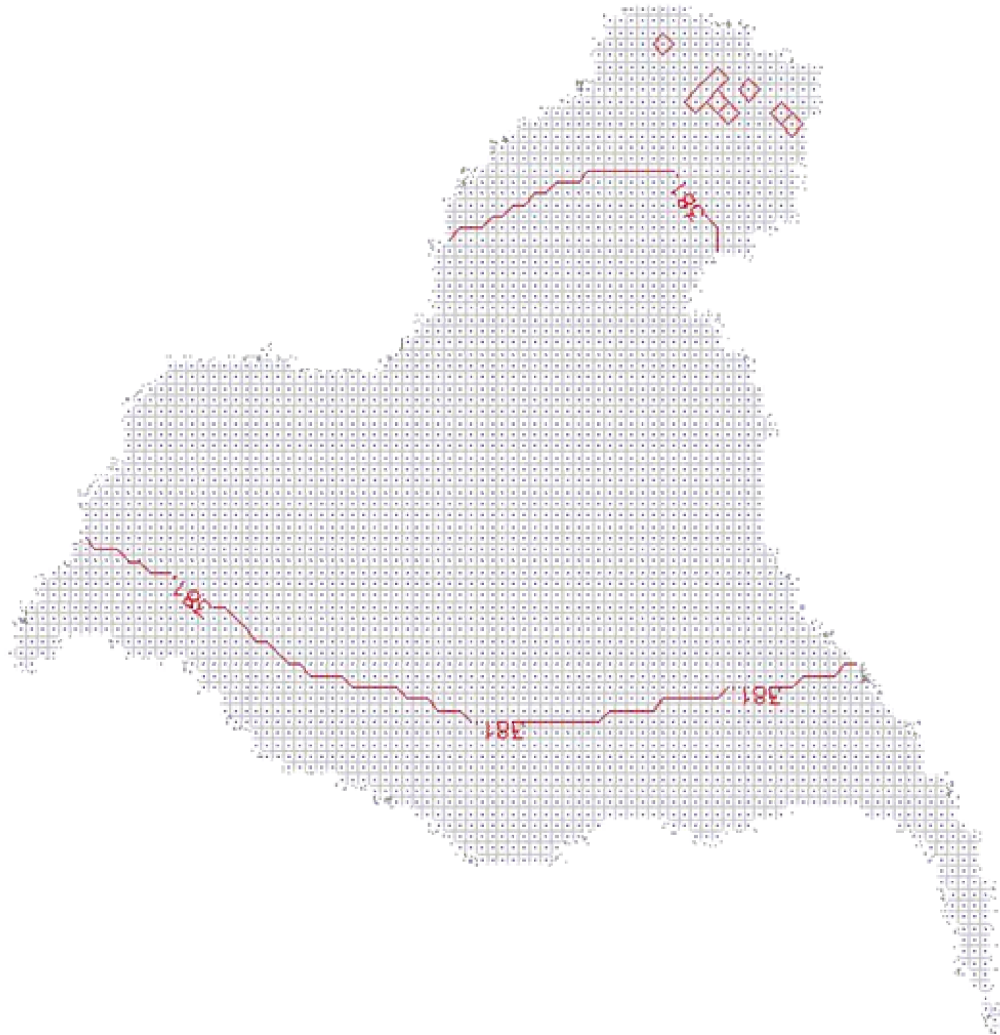


Figura50. Direção do Fluxo na camada 4, e curvas potenciométricas de 0.0001 em 0.0001 metros, para o período chuvoso e estado transiente.

Os valores de carga hidráulica calculada nas camadas 4 e 5 praticamente se mantiveram na ordem dos 381 metros. O comportamento já esperado da formação Brejo Santo como aquífero, foi justificado pelas linhas equipotenciais e pela baixa velocidade, mas a formação Mauriti, que é definida como aquífero e parte integrante do Sistema Aquífero Inferior (FERNANDES, 2005) teve um comportamento semelhante à formação Brejo Santo, nas 3 simulações, no que concerne às equipotenciais, vetores de fluxo e velocidade média. Isso pode ser explicado pelo fato de que a maioria dos parâmetros hidrodinâmicos, encontrados na literatura, da 4ª camada sejam valores da mesma ordem de grandeza da 5ª camada, com exceção da condutividade hidráulica, além de que há o “isolamento” da formação Mauriti, pelo aquífero Brejo Santo com os demais aquíferos.

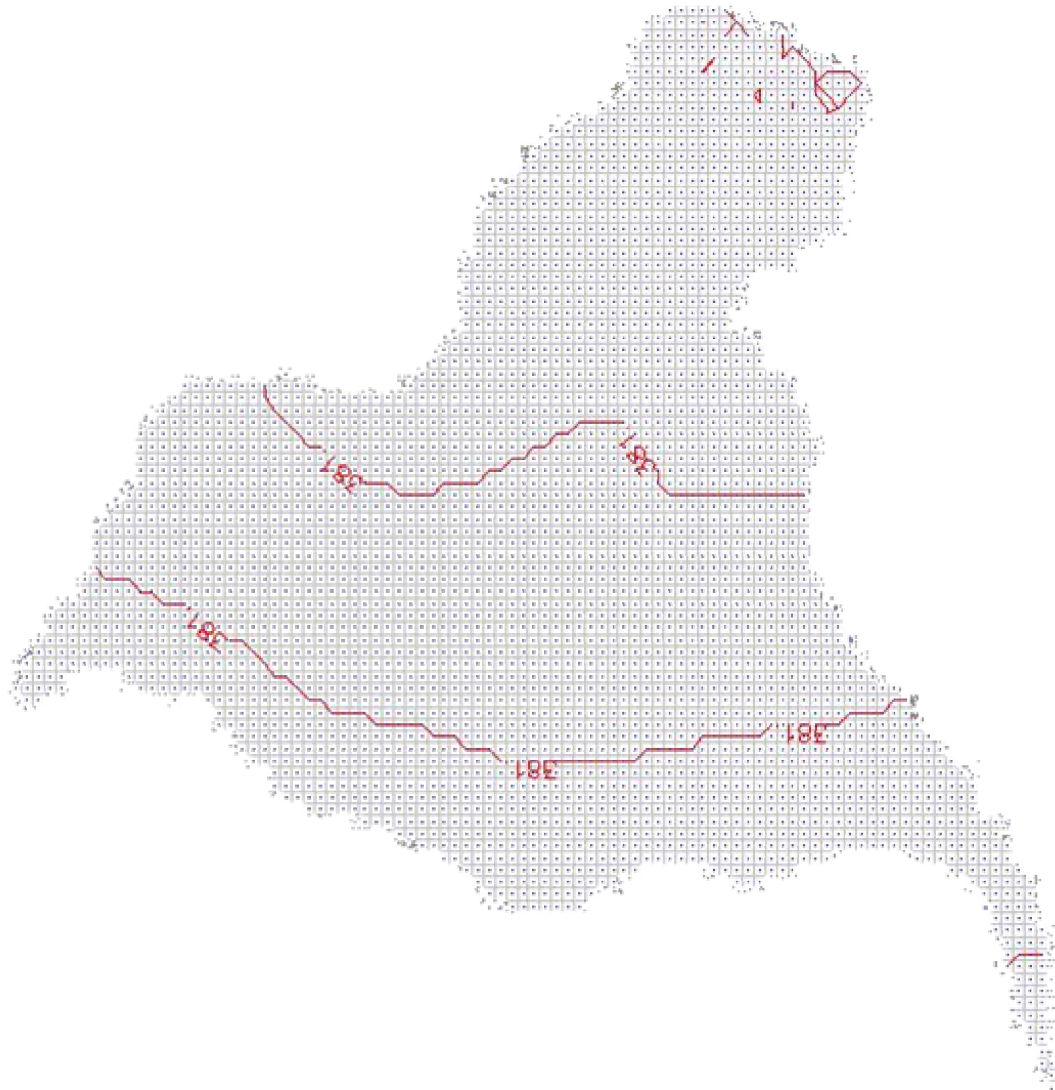


Figura51. Direção do Fluxo na camada 5, e curvas potenciométricas de 0.0001 em 0.0001 metros, para o período chuvoso e estado transiente.

3.3.3 Estado transiente para o período seco

Para a simulação computacional do período seco no estado transiente foi estabelecida os mesmos dados que para o período chuvoso permanente, com exceção da recarga. O quadro abaixo sumariza os principais dados de entrada do modelo.

Quadro20. Algumas características para a simulação no estado transiente seco.

Parâmetros	Camada	Valores
Condutividade Hidráulica (K) [m/s]	Camada 1	5×10^{-6}
	Camada 2	1×10^{-5}
	Camada 3	1×10^{-5}
	Camada 4	1×10^{-10}
	Camada 5	4×10^{-6}

Porosidade Efetiva	Camada 1	0.1
	Camada 2	0.1
	Camada 3	0.1
	Camada 4	0.03
	Camada 5	0.02
Armazenamento Específico [1/m]	Camada 1	1×10^{-7}
	Camada 2	1×10^{-7}
	Camada 3	1×10^{-7}
	Camada 4	$1,3 \times 10^{-3}$
	Camada 5	1×10^{-4}
Coeficiente de Armazenamento	Camada 1	2×10^{-4}
	Camada 2	2×10^{-4}
	Camada 3	2×10^{-4}
	Camada 4	1×10^{-2}
	Camada 5	1×10^{-4}
Duração [dias]	*	180
Infiltração Efetiva (recarga) [mm]	*	0

O quadro 21 mostra o resultado das velocidades médias calculada para as células do modelo nessa simulação.

Quadro21. Velocidades médias das camadas para estado transiente seco .

	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
Velocidade Média (cm/dia)	1.406	2.139	1.948	3.71×10^{-5}	1.13×10^{-5}

Para a primeira camada no estado transiente seco o modelo gerou a figura 52 que possui as linhas equipotenciais, de 10 em 10 metros, ao final dos 180 dias de simulação.

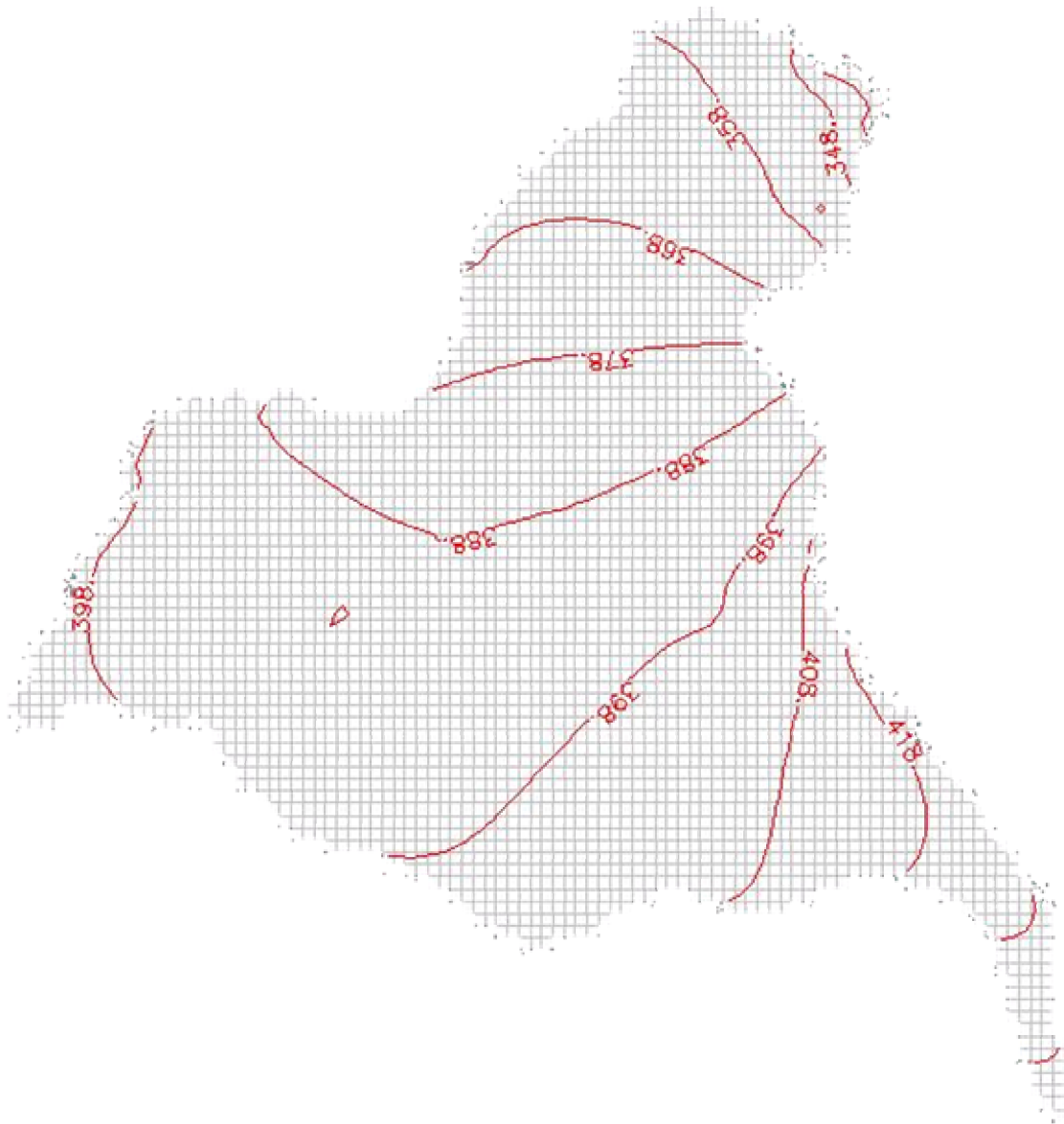


Figura52. Fluxo na camada 1 de 10 em 10 metros, para o período seco e estado transiente.

O valor máximo de carga hidráulica calculada foi de 443.96 metros e a mínima de 328.39 metros. Os vetores de fluxo gerados pelo PMWIN estão representados na figura abaixo.

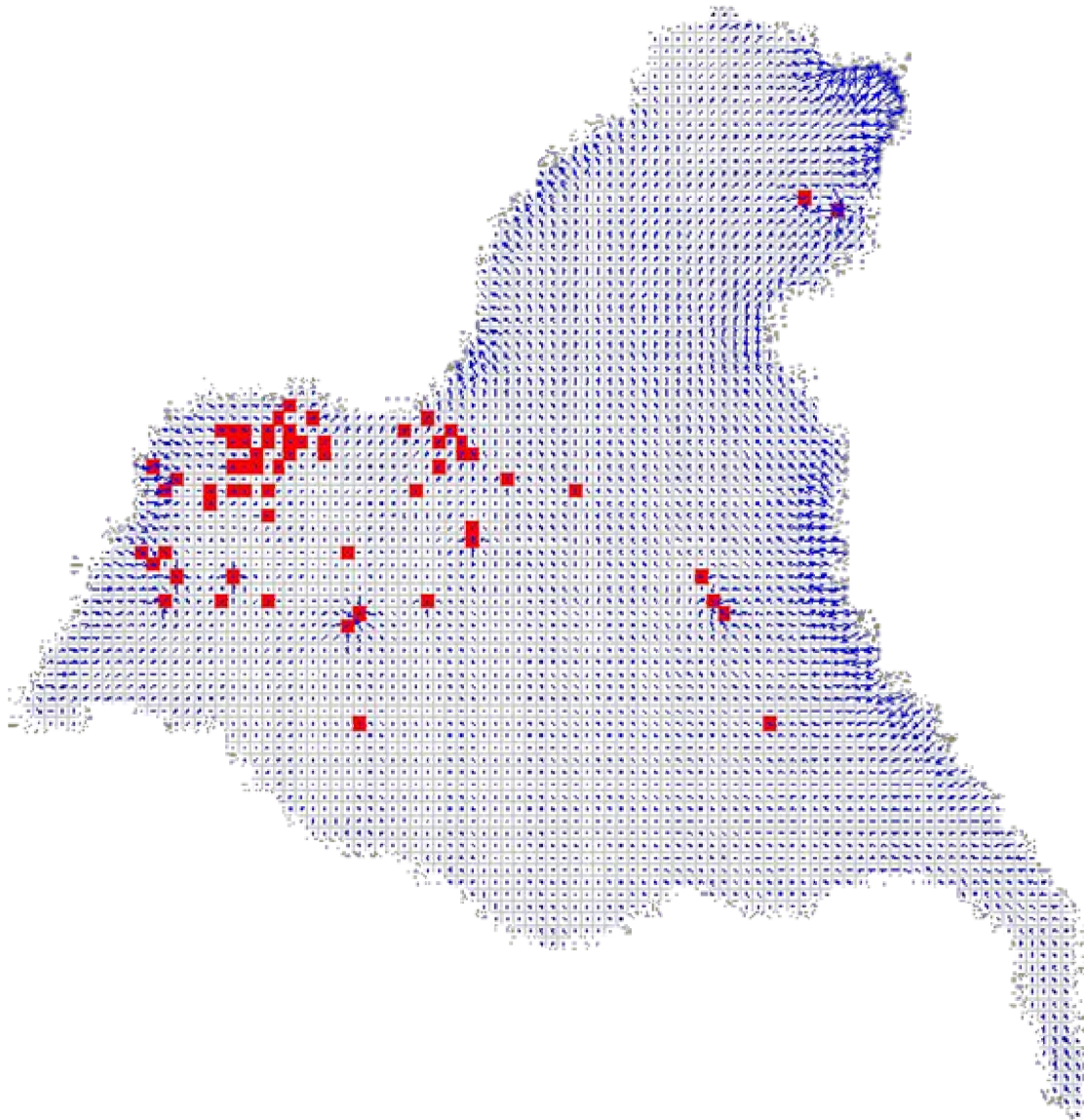


Figura53. Vetores de fluxo na camada 1, para o período seco e estado transiente.

O comportamento das equipotenciais e dos vetores de fluxo no período seco no estado transiente mostrado nas figuras 52 e 53, respectivamente, se assemelham na configuração do período chuvoso no estado transiente, diferenciando-se na diminuição do nível potenciométrico e da redução da intensidade dos vetores de fluxo, uma vez que as condições de contorno e de bombeamento são as mesmas para os dois períodos, mas caracterizadas no momento das modelagens diferentes apenas na recarga (infiltração efetiva).

As figuras abaixo mostram as linhas equipotenciais e dos vetores de fluxo no modelo conceitual adotado para esta pesquisa nas formações Abaiara, Missão Velha, Brejo Santo e Mauriti para a simulação do estado transiente seco.

A figura 54 mostra a camada 2 que representa a formação Abaiara para esta simulação. O nível potenciométrico calculado nas células variou de 439.10 a 341.17 metros.

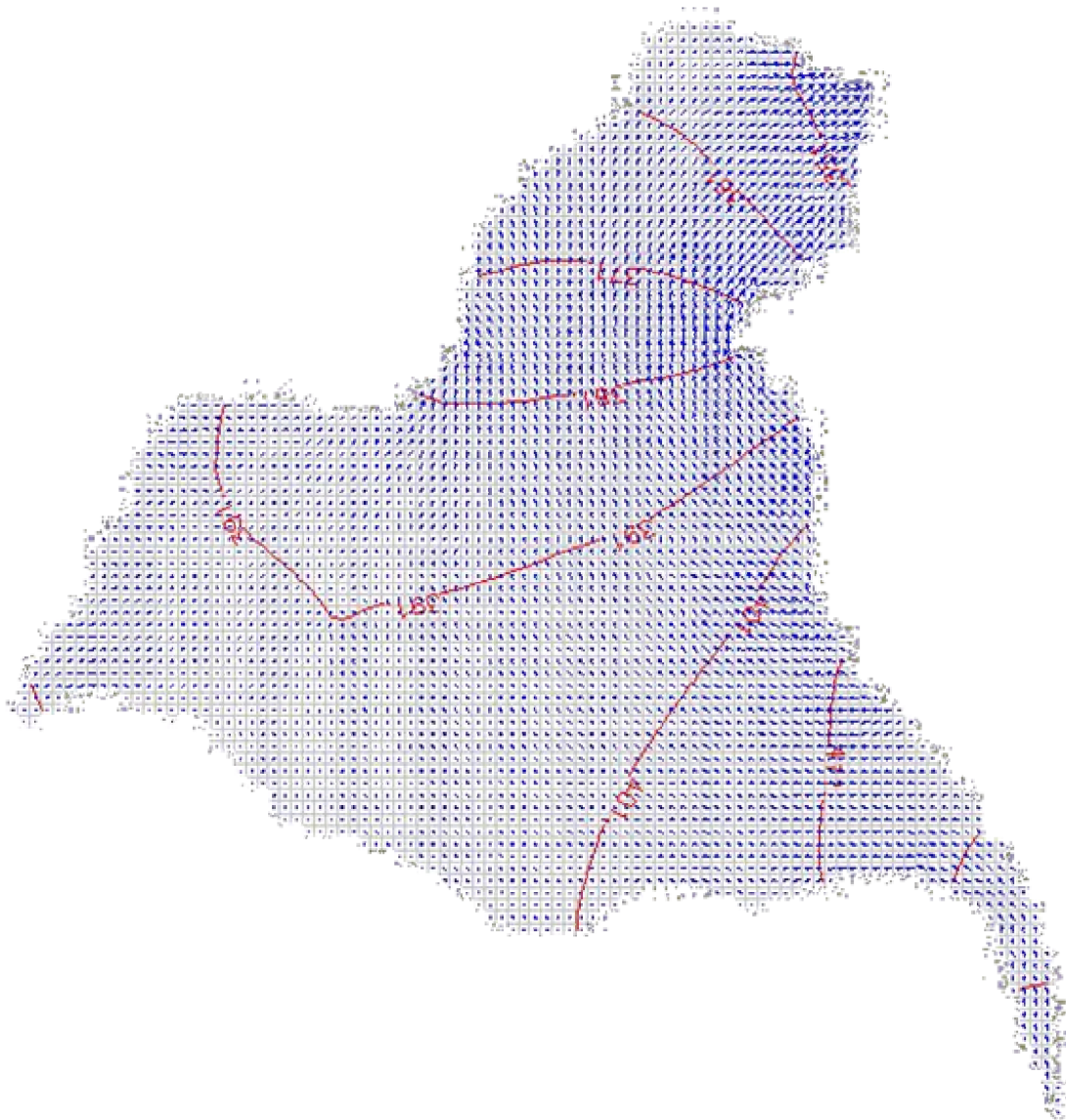


Figura54. Direção do Fluxo na camada 2, e curvas potenciométricas de 10 em 10 metros, para o período seco e estado transiente.

A figura 55 mostra as equipotenciais e vetores de fluxo para a formação Missão Velha pertencente ao Sistema Aquífero Médio e definido como aquífero.

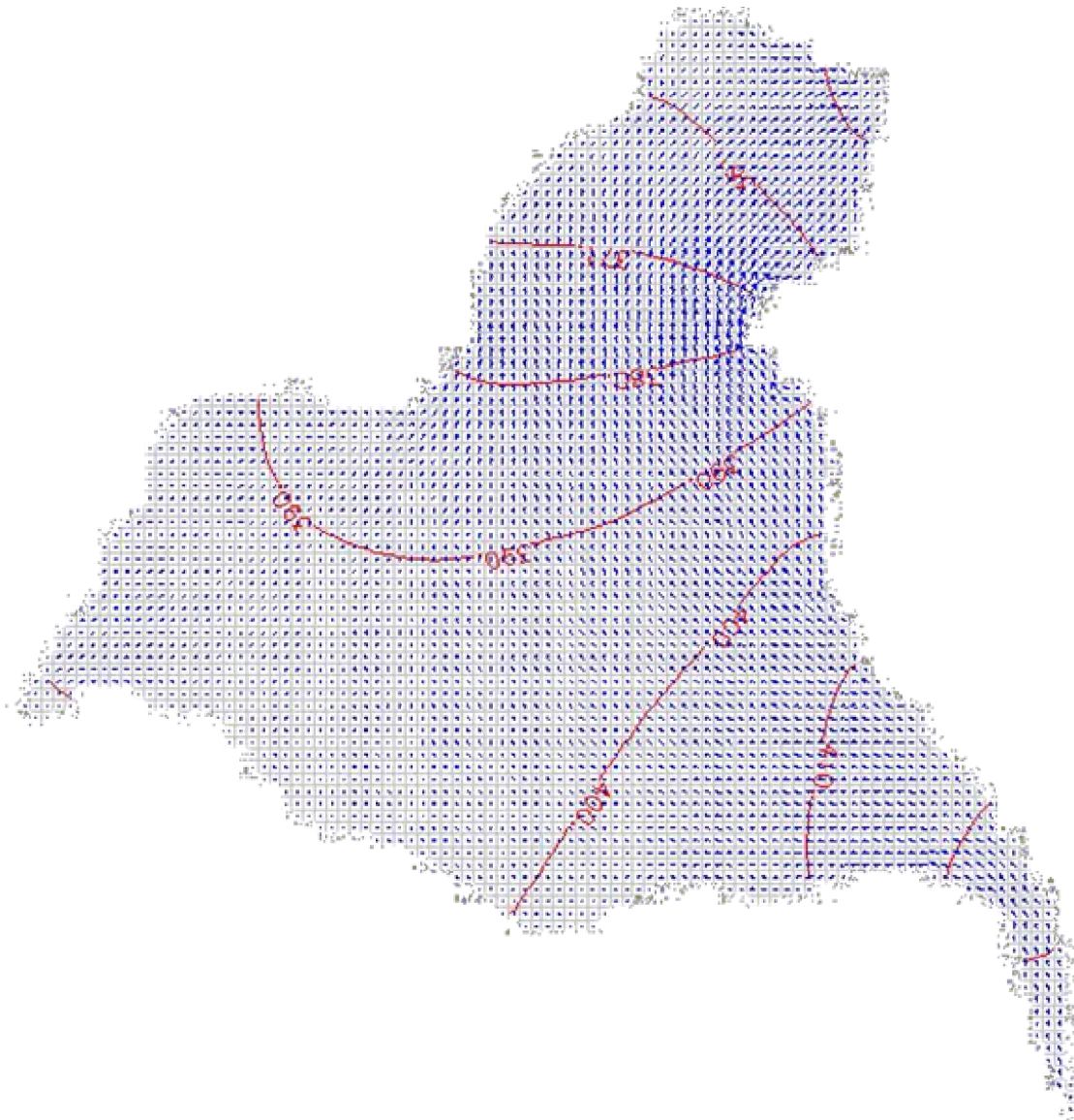


Figura55. Direção do Fluxo na camada 3, e curvas potenciométricas de 5,0 em 5,0 metros, para o período seco e estado transiente.

O valor máximo de carga calculada para essa camada foi de 437.42 metros e a mínima de 347.89 metros.

A formação Brejo Santo (Figura 56) mostrou, como nas outras simulações, nenhuma variabilidade das equipotenciais e dos vetores do fluxo.

A camada 4 apresentou um comportamento esperado, pois como aquífero possui condições de armazenar água, mas sem condições de movimentá-las. A carga máxima e mínima calculada pelo modelo ficou na casa dos 381 metros, mesmo valor que para a simulação do período chuvoso.

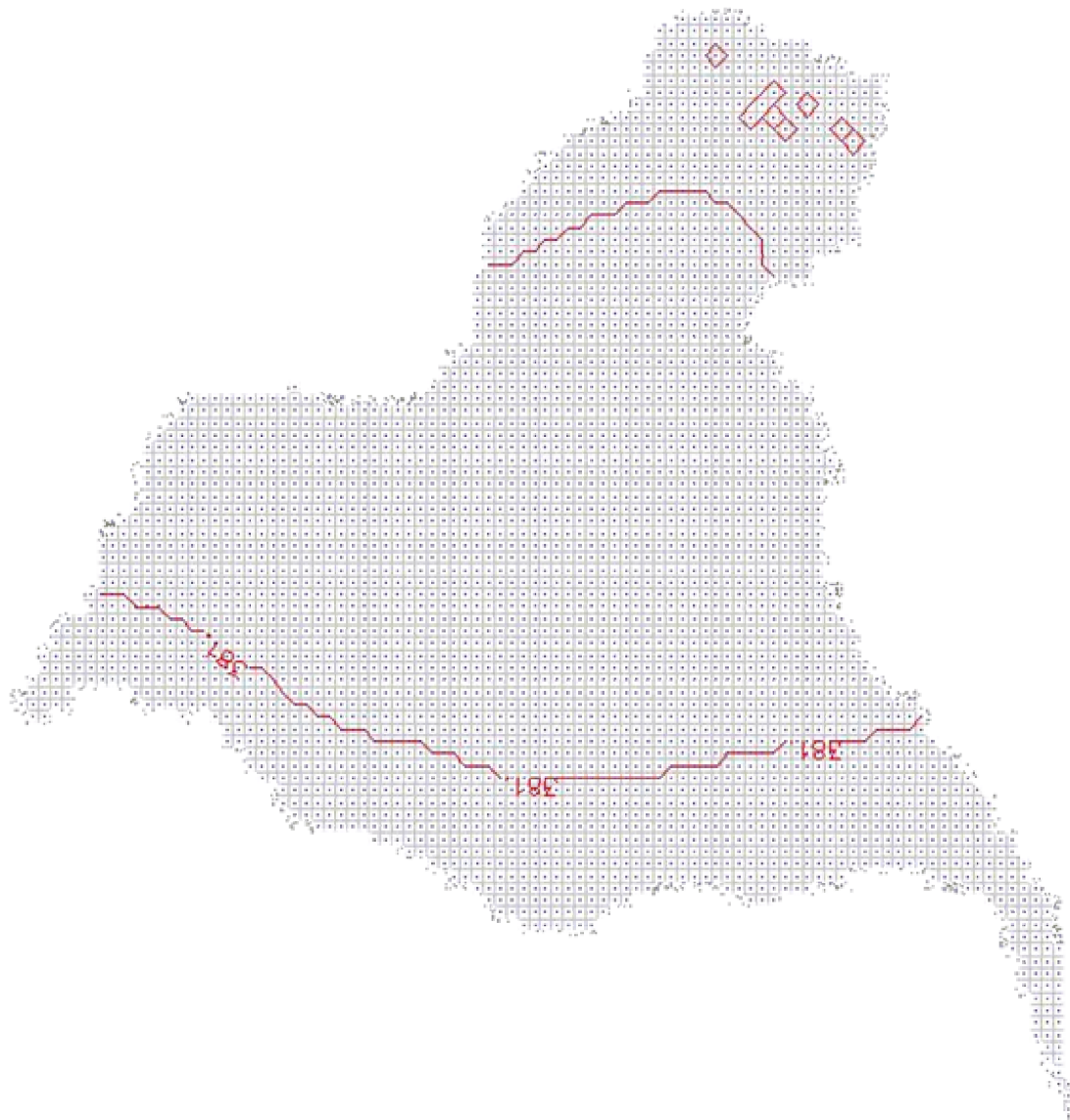


Figura56. Direção do Fluxo na camada 4, e curvas potenciométricas de 0.0001 em 0.0001 metros, para o período seco e estado transiente.

Como já mencionado na simulação do período chuvoso transiente a camada 5, formação Mauriti, mostrou um comportamento parecido com o da camada 4 também para o período seco, conforme ilustra a figura 57. Uma possível vertente para essa pouca variabilidade e baixa velocidade, já que essa formação é definida como aquífero e não como aquífero, é de que a formação Mauriti não possui uma conexão hidráulica com os rios nem com os aquíferos do Sistema Aquífero Médio, pois se isola desse pela formação Brejo Santo, e nem tampouco está propensa aos stress produzidos pelo bombeamento da primeira camada.

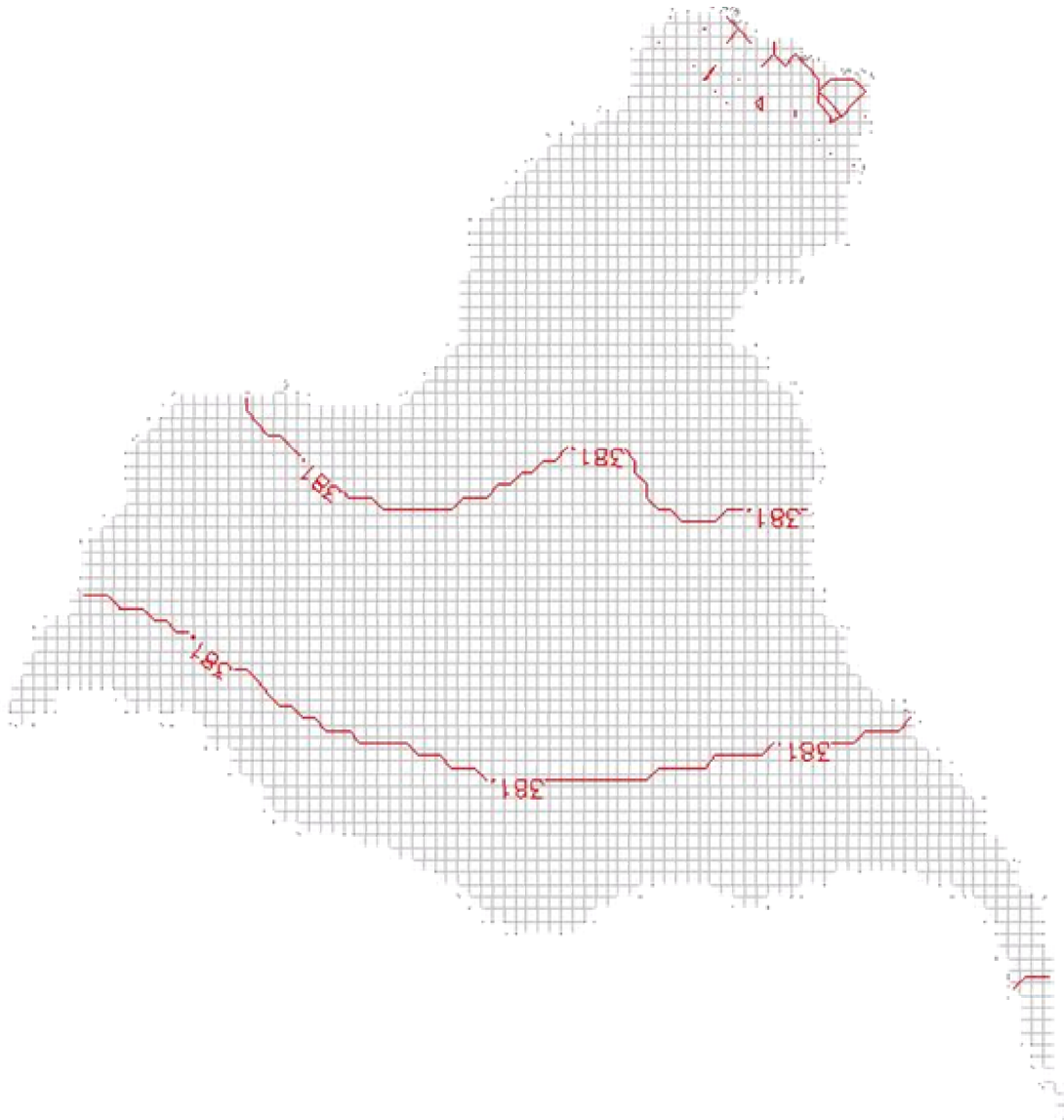


Figura57. Direção do Fluxo na camada 5, e curvas potenciométricas de 0.0001 em 0.0001 metros, para o período seco e estado transiente.

Essas foram as simulações realizadas com o programa PMWIN, os resultados da próxima etapa foi a tentativa de calibração da condutividade hidráulica para a área do modelo.

3.4 Calibração (modelo II)

A partir do mapa potenciométrico observado gerado com os dados de poços fornecidos pela CPRM, foi realizado o processo de calibração do modelo. Como já referido neste trabalho, o procedimento adotado foi o método inverso direto através do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico.

O parâmetro calibrado foi o da condutividade hidráulica para a primeira camada que corresponde à formação Rio Batateira. A primeira tentativa de calibração foi a partir dos poços coletados pela CPRM realizado no ano de 2006, e a segunda tentativa somente com os poços da COGERH coletados no ano de 2001. Uma idéia para atingir a área ao máximo com dados de carga hidráulica medida seria vincular todos os dados disponíveis, mas pela

diferença das épocas de medição certamente não iria ser realizado uma calibração condizente com as características do nível potenciométrico observado.

A figura 58 mostra a distribuição dos poços na região de estudo. A partir d a carga conhecida desses poços foi gerado o mapa de carga hidráulica observada (Figura 59) para toda a área do modelo, sendo esse arquivo de saída o primeiro necessário para a calibração. Pelas medições da CPRM terem sido realizadas na maior parte no perío do chuvoso do estado do Ceará (dezembro de 2005 a julho de 2006) foi então considerada, para a calibração da condutividade, a modelagem do estado permanente chuvoso.

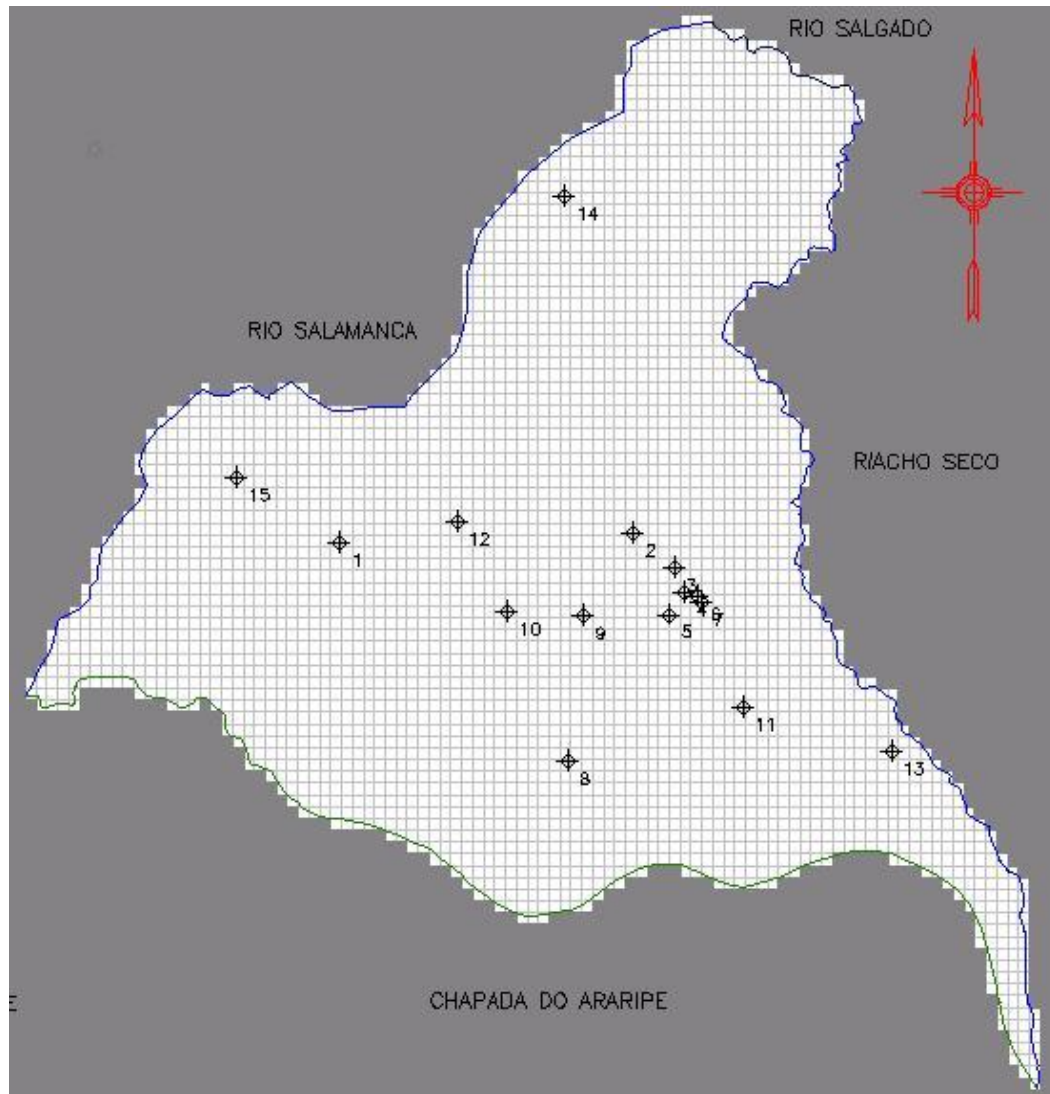


Figura58. Distribuição dos poços medidos pela CPRM.

A partir dos dados observados de nível estático o é que foi gerado o mapa potenciométrico. Pela figura 59 é possível perceber o comportamento das equipotenciais de fluxo hídrico, um aspecto a se notar é que algumas “ilhas” de equipotenciais se formam ao redor dos poços de nível estático, o que pode vir a dificultar o procedimento de calibração.

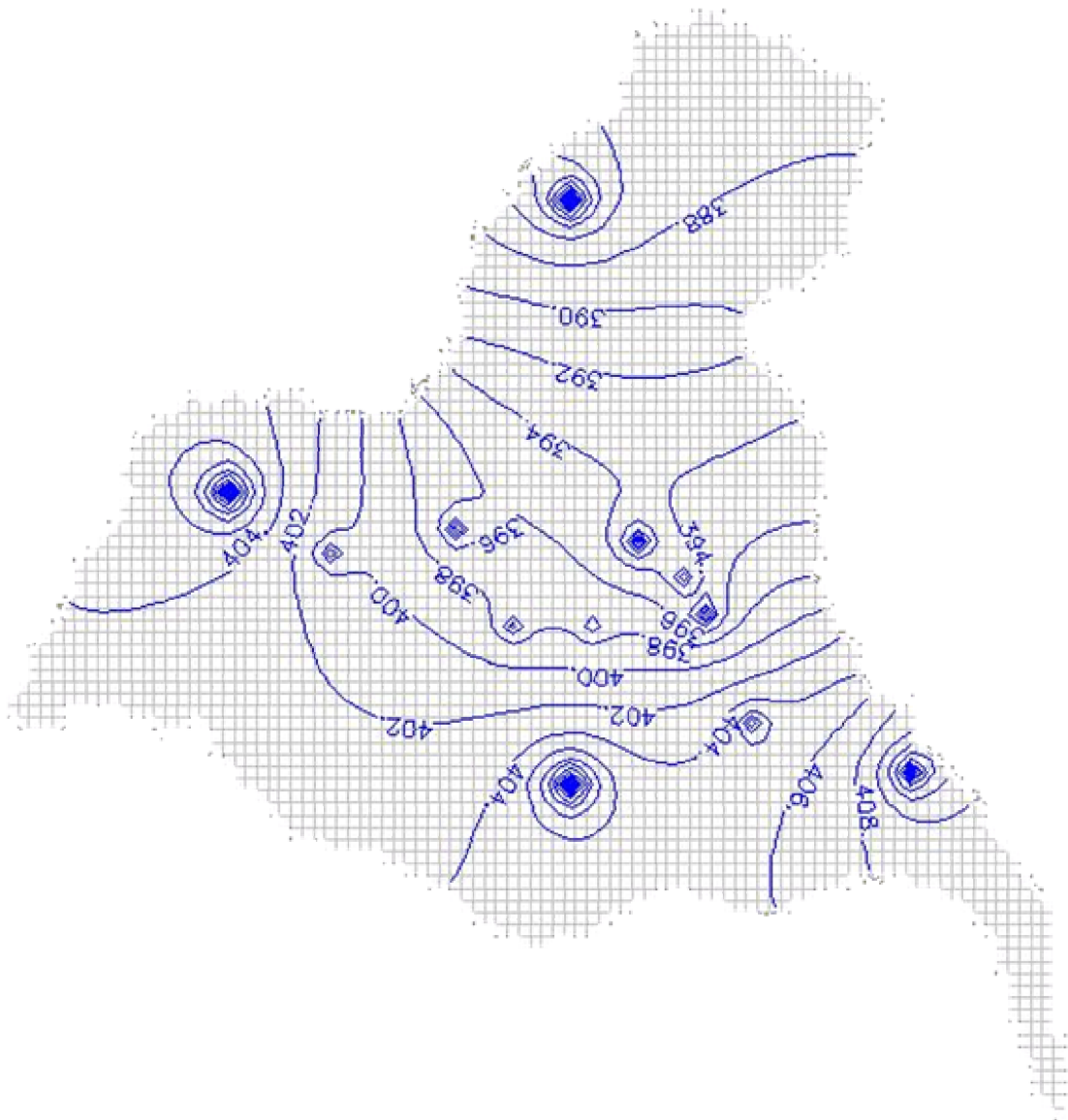


Figura59. Linha potenciométricas observadas de 3 em 3 metros para a região de estudo.

Depois de gerar a carga hidráulica observada, foi gerada a carga calculada pelo PMWIN. A figura 60 mostra as linhas em azul das cargas observadas e as linhas vermelhas das cargas calculadas, o resultado dessa figura abaixo ainda não entrou no processo iterativo para a calibração, uma vez que foi calculado para o valor inicial da condutividade de 0 .000005 m/s encontrado na literatura para a formação Rio Batateira.

O gráfico da figura 61 mostra o erro quadrático médio - RMSEH (root mean square error of head) de acordo com o número de iterações.

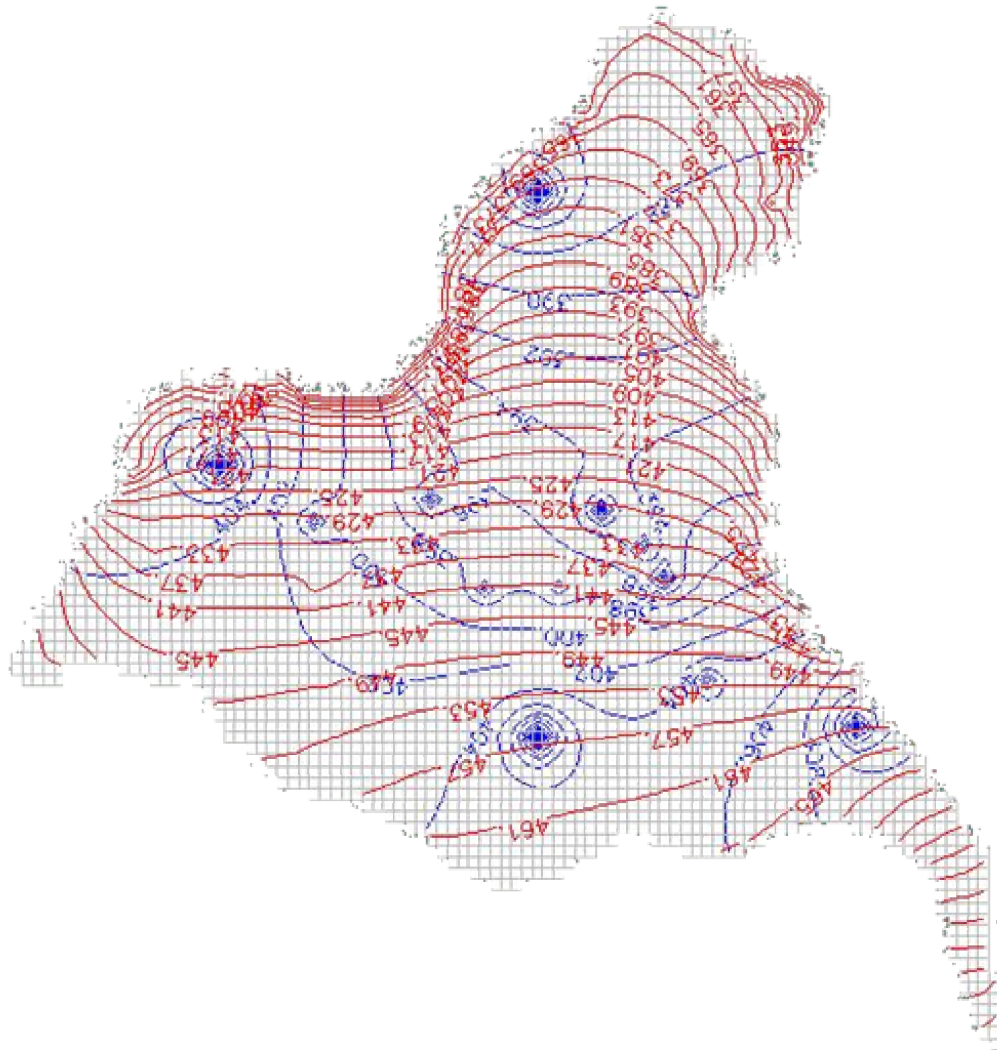


Figura60. Linha potenciométricas observadas em azul (2 em 2 metros) e calculadas em vermelho (4 em 4 metros).

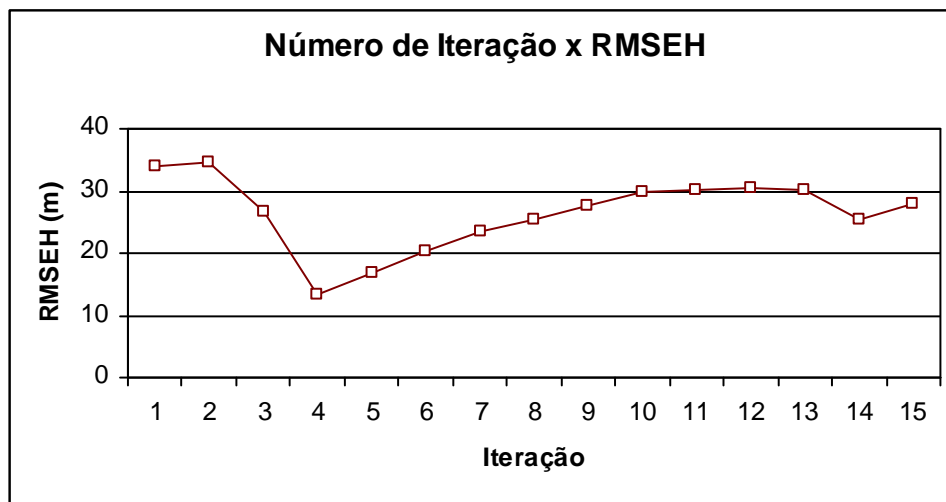


Figura61. Curva da raiz do erro quadrático médio (RMSEH) em relação às cargas calculadas e observadas versus o número de iterações com os poços da CPRM .

O processo iterativo, conforme o gráfico começou com um valor de erro de 34.12 metros e variou até 27.88 metros na 15ª iteração. O RMSEH mostra como estão variando, na respectiva iteração, as novas cargas calculadas em relação às cargas observadas em campo. Os valores altos do erro quadrático médio apontam para a pequena quantidade e certa irregularidade da distribuição dos poços em relação à área de estudo, o que dificulta na convergência de valores satisfatórios das condutividades hidráulica a partir do gradiente hidráulico calculado.

Pode-se constatar isso também devido à divergência do fluxo a partir da soma dos ângulos ϕ (ângulos entre os vetores dos gradientes observados e calculados) como mostra a figura abaixo. Os valores da soma dos ângulos ϕ variaram de valores na primeira iteração de 64.67 graus, passando por valores como 48.54 graus na sexta iteração, chegando a 66.1 graus na décima quinta iteração.

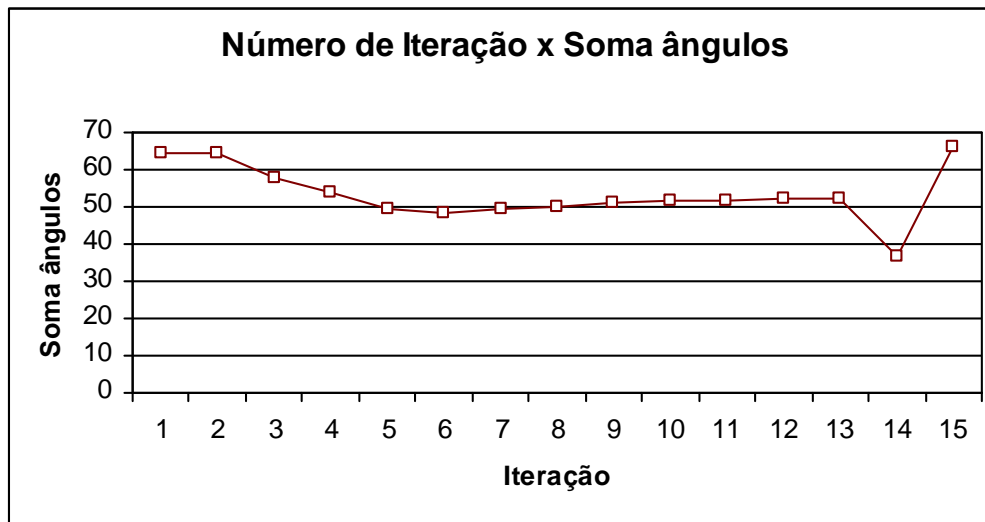


Figura62. Curva da soma dos ângulos ϕ entre os gradientes das cargas calculadas e observadas versus o número de iterações com os poços da CPRM.

A realização da calibração não produziu resultados satisfatórios pela não aproximação das novas cargas calculadas geradas para as cargas observadas bem como pela variação irregular do erro quadrático médio (que indica a minimização das diferenças entre as cargas observadas e calculadas) e pelo não ajuste da direção do fluxo que é indicado pelo somatório dos ângulos formados pelos vetores dos gradientes hidráulicos observados e calculados. A figura abaixo mostra a tendência de algumas linhas equipotenciais se ajustarem (compare à Figura 60 que retrata a 1ª iteração).

Essa disposição de ajuste entre as cargas calculadas e observadas ocorre devido às novas condutividades hidráulica gerada pelo MIGHA tenderem em cada ciclo iterativo seguirem o gradiente das cargas hidráulicas de cada célula, mas com uma área extensa não foi possível realizar a calibração devido ao reduzido número de poços que possuem nível estático conhecido, o que dificulta um ajuste simultâneo para todas as células do modelo na área em estudo.

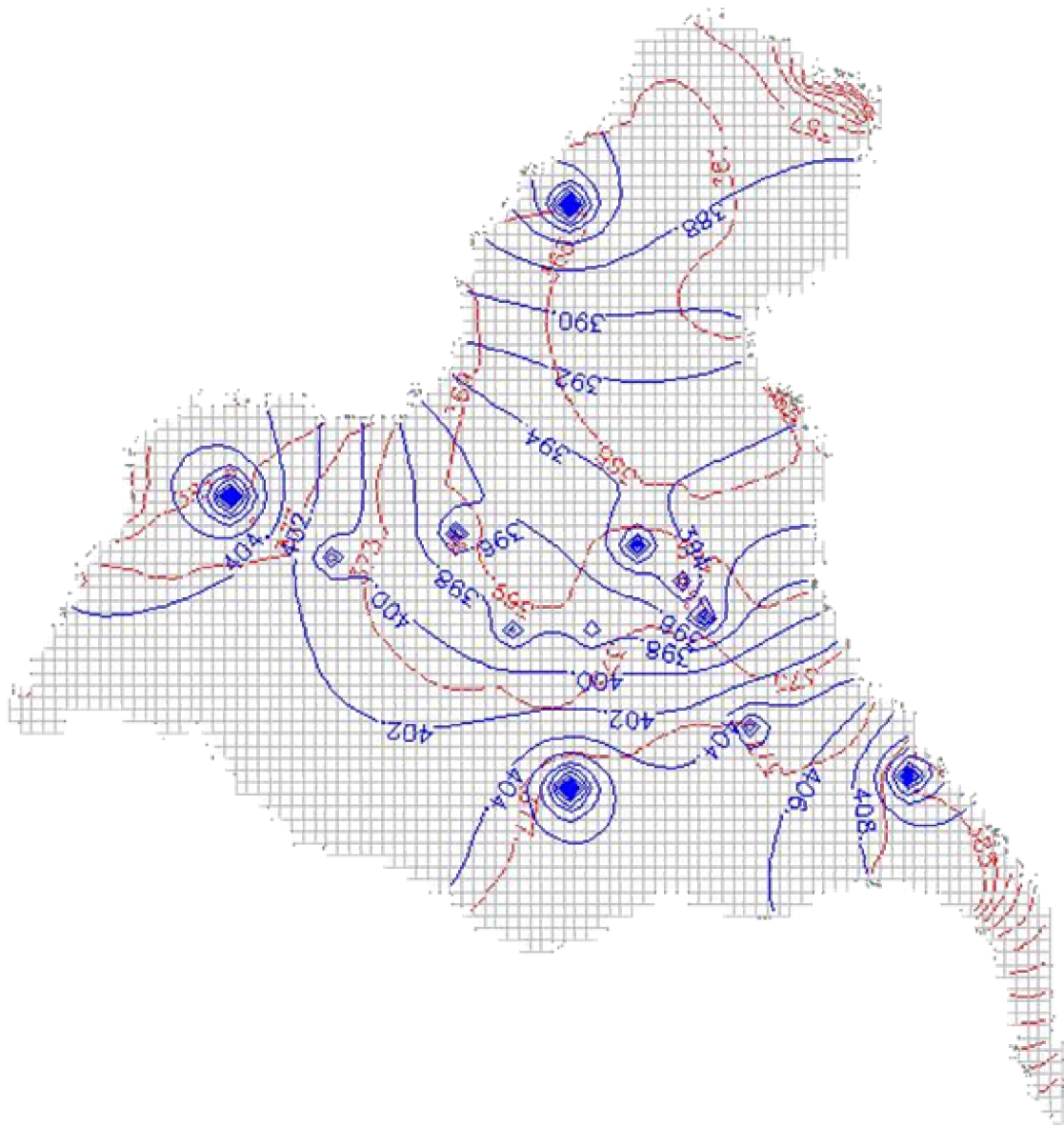


Figura63. Linha potenciométricas observadas em azul (2 em 2 metros) e calculadas em vermelho (4 em 4 metros) na quarta iteração.

Apesar de não calibrado, na 4ª iteração obteve-se um erro das diferenças entre as cargas observadas e calculadas de 14.1 metros. O zoneamento dos valores das condutividades hidráulica gerados na 4ª iteração está na figura 64.

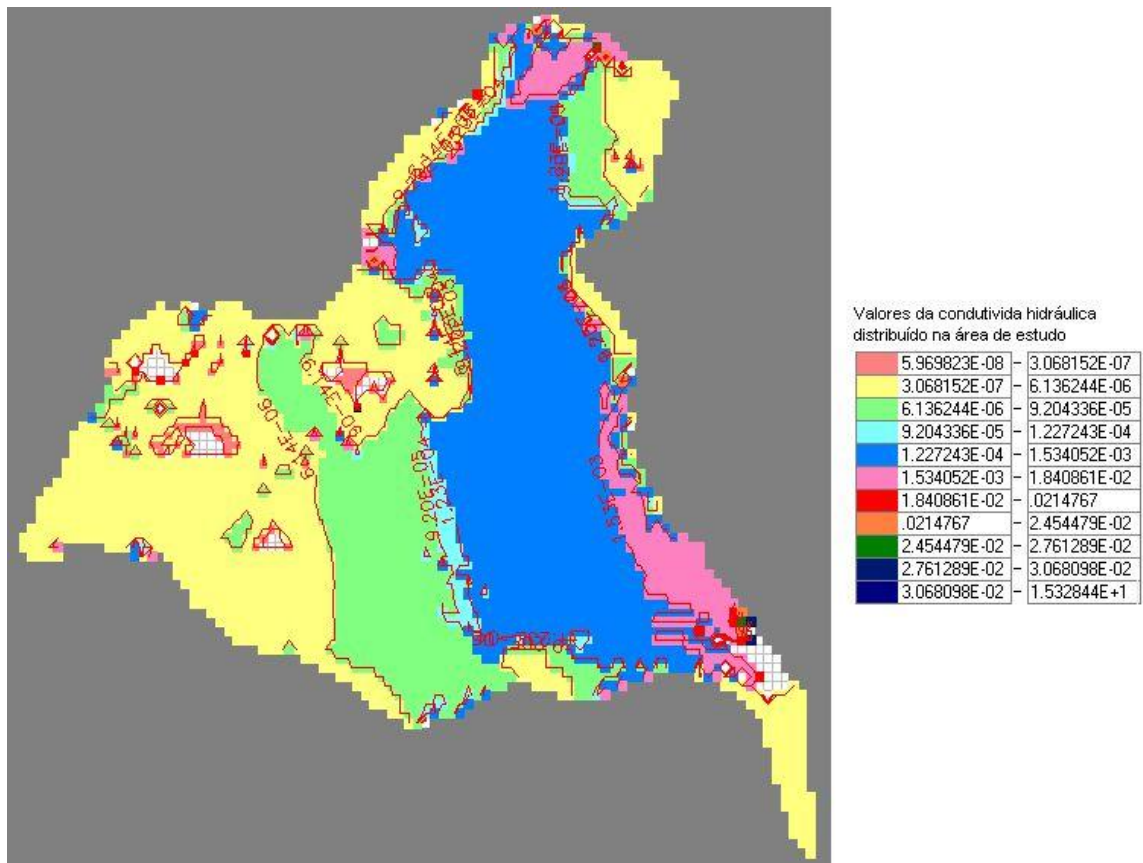


Figura64. Valores de condutividade hidráulica obtidos através do MIGHA, visualizado no PMWIN.

Uma tentativa de calibração também foi realizada com os dados fornecidos pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGER H).

A distribuição dos poços na área de estudo está indicada na Figura 65.

O comportamento das cargas observadas geradas pelo PMWIN está configurado na figura 66.

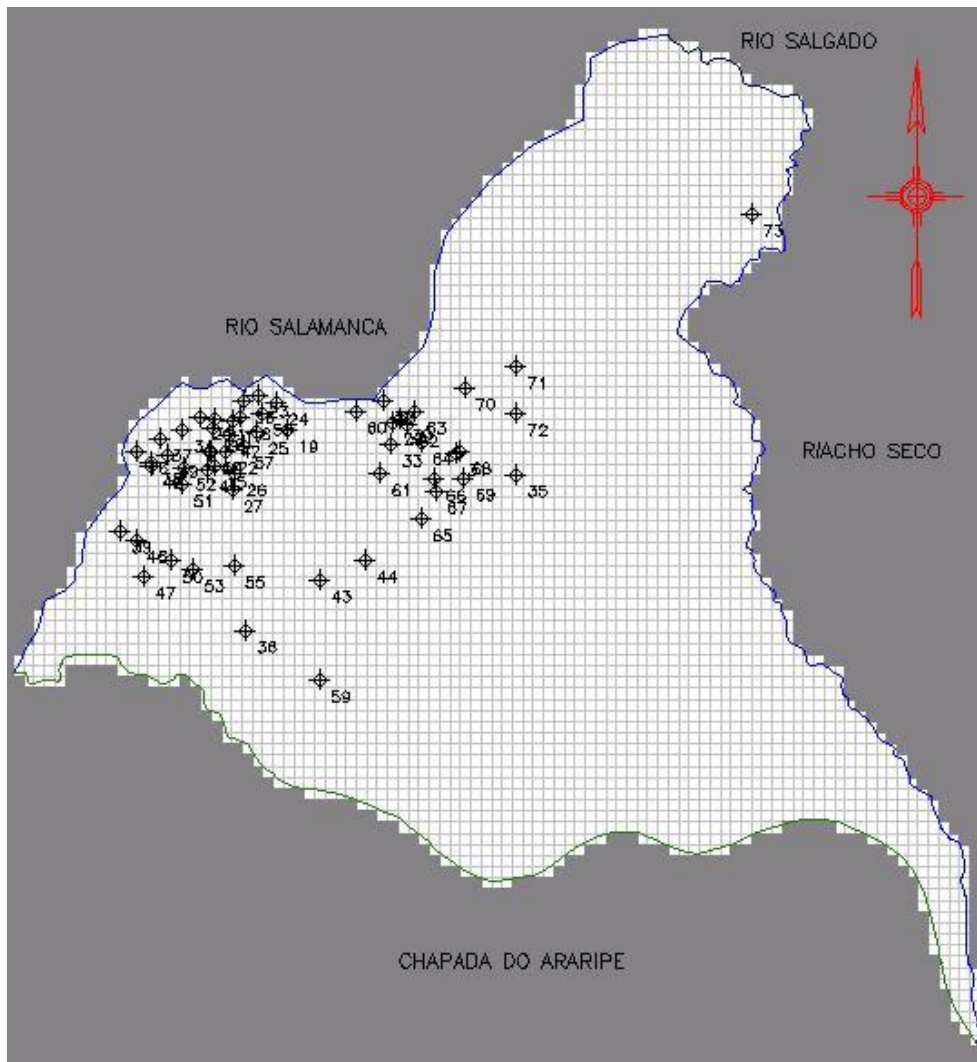


Figura65. Distribuição dos poços da COGERH na área de estudo.

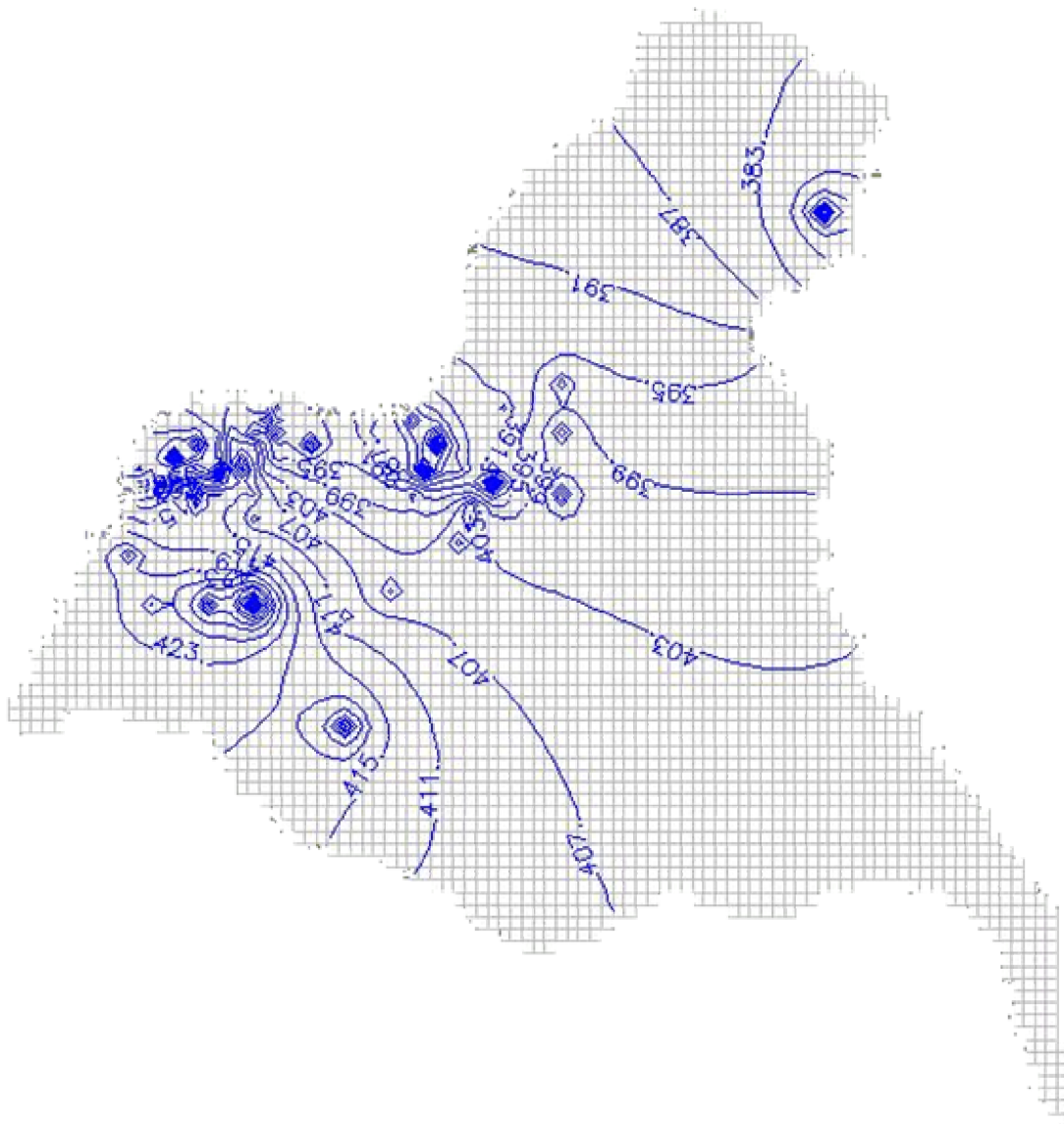


Figura66. Linha potenciométricas observadas de 3 em 3 metros a partir dos dados da COGERH para a região de estudo.

Depois de realizar o mesmo procedimento feito para os poços da CPRM, foi gerado o gráfico do erro quadrático médio (Figura 67) e da soma dos ângulos entre os gradientes observado e calculado em função dos números de iterações (figura 68). O número de iterações com os dados da COGERH só foi possível até a 7ª tentativa, pois o PMWIN, ao rodar, mostrou como resultado um valor elevado (10^{30} m) para todas as células de carga hidráulica calculada, depois de ler o arquivo de condutividade hidráulica da 7ª iteração do MIGHA. Esse valor de carga calculada não permitiu a convergência do método para valores mais satisfatórios de condutividade.

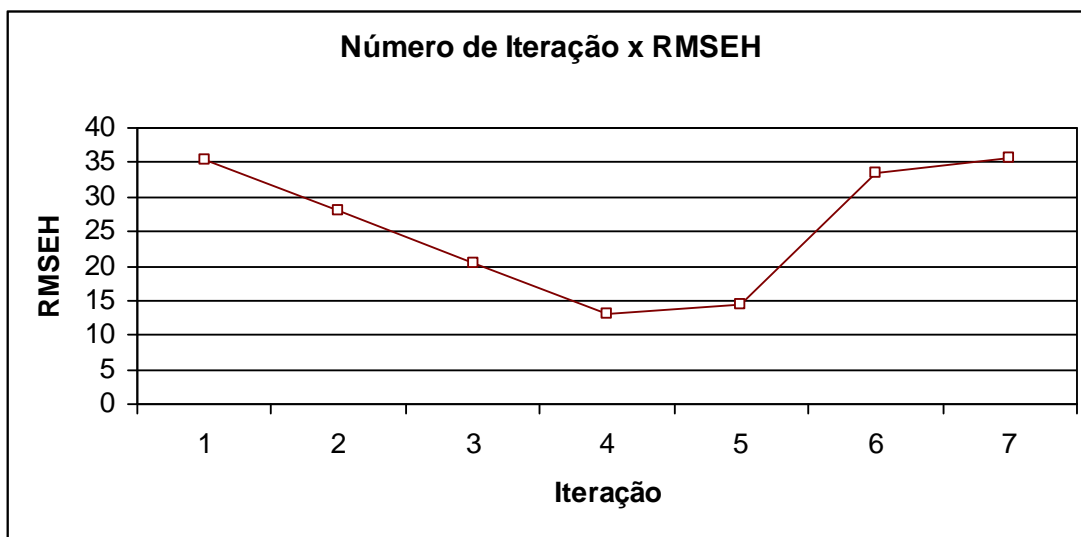


Figura67. Curva da raiz do erro quadrático médio (RMSEH) em relação às cargas calculadas e observadas versus o número de iterações com os poços da COGERH.

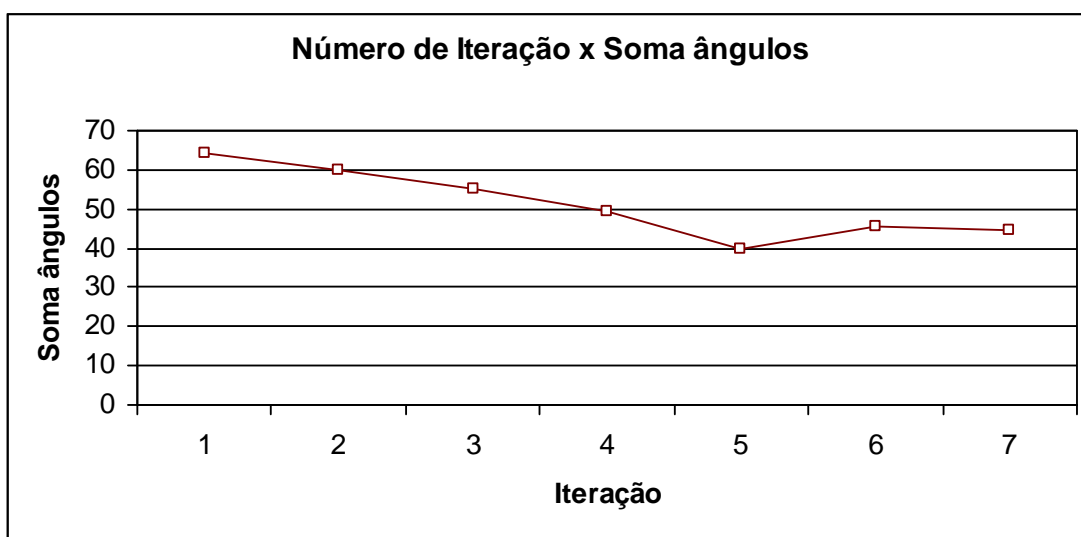


Figura68. Curva da média dos ângulos ϕ entre os gradientes das cargas calculados e observados versus o número de iterações com os poços da COGERH.

Pelo gráfico da figura 67 percebe-se que na 4ª e 5ª iteração o erro das diferenças entre a carga hidráulica observada e calculada chegou em 13,07 metros e 14,44 metros, respectivamente na 4ª e 5ª iteração. E a soma dos ângulos formados entre os gradientes hidráulicos calculados e observados chegou a 49,6 graus e 39,8 graus, na mesma ordem. Como dito, o RMSEH corrige a diferença entre a carga calculada e observada já a soma dos ângulos corrige a direção do fluxo em cada iteração.

A figura 69 mostra então as linhas equipotenciais das cargas calculadas nesta iteração (em vermelho) e das observadas (em azul).

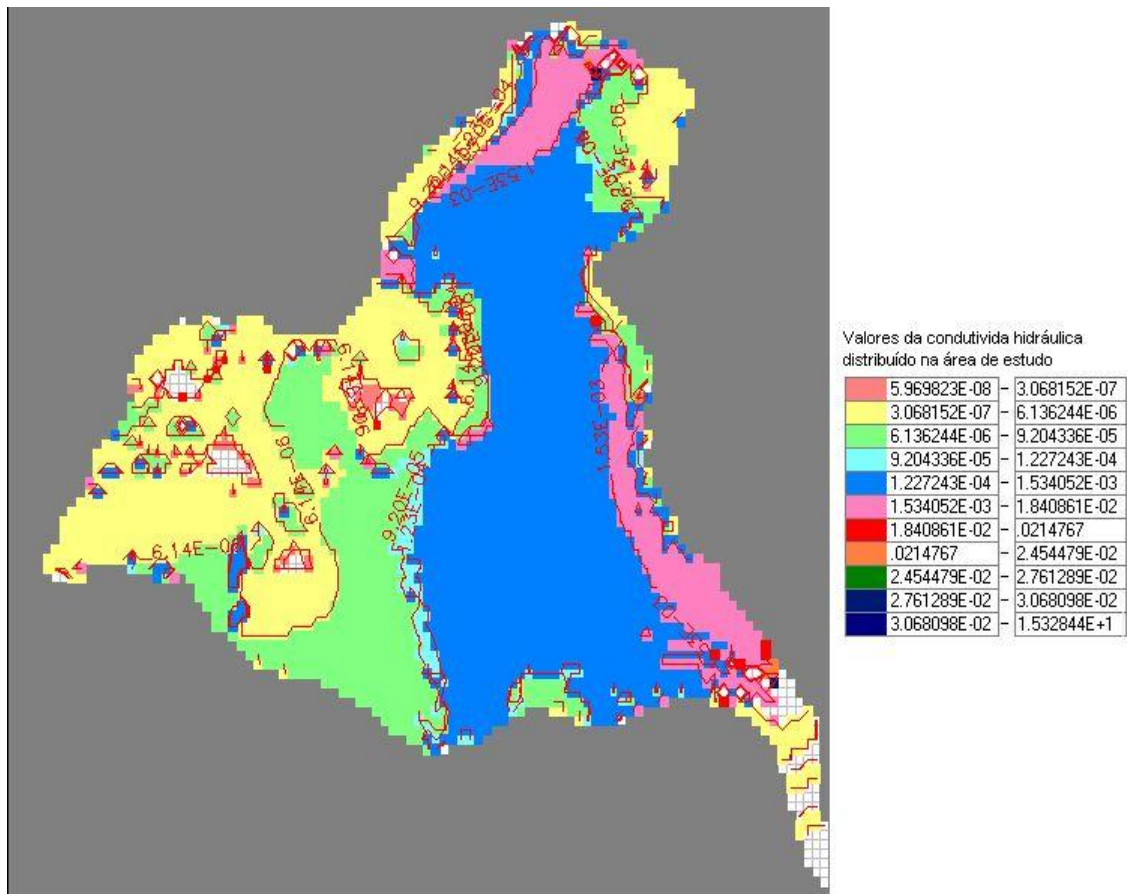


Figura70. Valores de condutividade hidráulica obtidos através do MIGHA, na 4ª iteração para os poços da COGERH, visualizado no PMWIN.

Os valores das condutividades mostrado na figura 70 foram gerados a partir das cargas hidráulicas conhecidas e das calculadas pelo PMWIN. A não convergência para um zoneamento de valores da condutividade se deu justamente pela ausência de dados bem distribuídos, principalmente de poços e rios (cargas hidráulicas conhecidas). Apesar dos poços fornecidos pela COGERH serem em maior quantidade, eles estão concentrados no lado sudoeste da área de estudo como pode ser verificado na Figura 65 que mostra a distribuição dos poços para esta calibração, o que resulta em um cálculo disperso do gradiente hidráulico que é necessário para gerar as condutividades no processo iterativo.

4 CONCLUSÕES

As conclusões deste trabalho são relatadas em função de dois contextos : primeiramente as conclusões referem-se a análise que retrata a aplicação do PMWIN, como ferramenta de modelagem nas áreas definidas de estudo e dos dados necessários para as simulações. O outro contexto aborda a aplicação do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGHA), desenvolvida para o procedimento de calibração.

A modelagem realizada com o PMWIN mostrou uma análise do comportamento do fluxo hídrico subterrâneo existente na região. Os mapas potenciométricos simulados dão uma idéia da direção do fluxo e da interferência dos usos pelos poços de bombeamento. A respeito dos mapas potenciométricos observados, que foram gerados também pelo PMWIN a partir somente das cargas conhecidas dos poços, vale a pena salientar que a carga hidráulica, das células dos poços, foi obtida a partir da diferença entre a topografia interpolada pelo modelo e

o nível estático medido em campo (altura da boca do poço até a zona saturada), o que certamente levou a produzir erros na elaboração dos mapas potenciométricos observado e conseqüentemente na matriz de carga observada, o que pode ter contribuído para a não calibração da condutividade das duas áreas do modelo conceitual.

Sabe-se que a qualidade dos dados é imprescindível para qualquer modelagem numérica. No caso da simulação de fluxo hídrico subterrâneo, o conhecimento das camadas hidrogeológicas é peça fundamental para a realização das simulações. Na área do modelo I (Grabén Crato - Juazeiro) há os dados das espessuras das formações geológicas que permitiu uma interpolação de valores de base e de fundo de cada formação para toda a área.

Na região de estudo do modelo II (Barbalha e Missão Velha) foi elaborado um modelo conceitual, em que foram atribuídos às camadas existentes da região valores médios interpolados da área adjacente do modelo II, com exceção da topografia e do embasamento cristalino. Esse procedimento de se colocar espessuras médias de aquíferos ocorre em vários trabalhos de modelagem de águas subterrâneas, mas uma mensuração ideal do comportamento do fluxo hídrico subterrâneo seria a partir dos dados de geofísica do local, o que não foi possível ser obtido nesta pesquisa para a segunda área modelada, porém, como dito, é de praxe adotar valores médios constantes de camadas de sistemas aquíferos.

Um outro dado que merece comentário é o valor adotado como recarga. Como o único dado disponível, e a primeira vista, aceitável, foi a infiltração efetiva calculado no balanço hídrico dos postos de Juazeiro do Norte, Crato, e Missão Velha, adotou-se os valores para toda a região dos modelos, o que não acontece na prática, uma vez que, tanto a precipitação pluviométrica quanto as condições de recarga do solo apresentam variabilidade espacial e temporal.

O que se deve ter em mente é que há uma diferença entre as simulações a partir do modelo conceitual adotado e o cenário real de fluxo hídrico existente. A dificuldade de se modelar fluxo de água subterrânea é que a obtenção de dados não é algo imediato e prontamente reparável. No entanto o PMWIN mostrou coerência nos resultados, no sentido de mostrar as equipotenciais saindo da chapada em direção ao vale do Cariri, o que era previsto para as duas áreas modeladas, pois esse é o sentido do fluxo das águas superficiais obedecendo a topografia. Além disso, quando da diminuição da recarga, para simular o regime seco, houve um decréscimo no valor do nível freático, o que comprova a resposta do modelo à sensibilidade na mudança dos parâmetros de entrada.

No que concerne ao Método Iterativo do Gradiente Hidráulico, pode-se dizer que há uma vantagem desse procedimento em relação aos tradicionais, como o PEST (Parameter Estimation). A principal vantagem, além da redução do tempo computacional, pois o procedimento de otimização multidimensional (PEST e UCODE) é transformado em múltiplos procedimentos unidimensionais (MIGHA), é que para a calibração da direção do fluxo pelo MIGHA não necessita de um zoneamento pré-definido das condutividades (ou transmissividades), caso requerido pelo PEST. Esse zoneamento é definido através de testes de bombeamento distribuídos pela região, o que na prática torna o trabalho um pouco oneroso e cansativo. Ou pode, ainda, ser determinado através de amostras no laboratório. Já para uma calibração correta com o MIGHA, é suficiente o conhecimento das cargas hidráulicas (medição do nível estático dos poços e nível dos rios, lagos, córregos etc.), desde que sejam em uma quantidade suficientes e distribuídos em toda a região.

Um aspecto interessante desse processo, é que a otimização através do MIGHA, minimiza a diferença entre os vetores dos gradientes hidráulicos observados (interpolados para a área) e dos calculados, e também, minimiza simultaneamente, as diferenças das cargas hidráulicas.

A aplicação nas áreas de estudo deste procedimento de calibração, não apresentou convergência para valores ótimos, pelo motivo perceptível nas duas áreas, no caso da tentativa dos poços da CPRM tem-se a pouca quantidade de poços com nível estático, e no caso da COGERH a má distribuição dos poços nas áreas.

Por fim, pode-se afirmar, apesar de não ter funcionado para a área de estudo pelos motivos supracitados, que a utilização do Método Iterativo de Gradiente Hidráulico (ou Calibração da Direção do Fluxo) pode ser utilizado sem restrições, mas que deve ser empregado somente em aquíferos sedimentares, em meios porosos, pois nesses meios o gradiente hidráulico obedece às trajetórias das linhas equipotenciais, o que não ocorrem em meios fraturados, onde os gradientes hidráulicos podem apresentar valores corretos, mas pode haver um desvio significativo das ortogonalidades entre as linhas de corrente (direção do gradiente) e das equipotenciais.

5 RECOMENDAÇÕES

As recomendações para futuros trabalhos com relação à modelagem de fluxo hídrico subterrâneo, não só para esta área do Cariri, mas de uma maneira generalista, estão apresentadas nos tópicos numerados a seguir, no âmbito das aquisições de dados mais precisos:

1. Fazer a geofísica da região de estudo do modelo II, para determinar o comportamento da espessura das camadas hidrogeológicas.
2. Instalar pluviômetros distribuídos na região do Cariri para uma melhor avaliação da infiltração efetiva a partir do balanço hídrico, bem como da aquisição de mapas de usos de solo para quantificar melhor o zoneamento da recarga. Ou ainda, instalar infiltrômetros e tensiômetros para uma mensuração mais precisa da recarga.
3. Coletar dados de carga hidráulica e de profundidade dos rios, reservatórios etc.
4. Realizar o maior número possível de testes de bombeamento distribuídos na área de estudo para se conhecer alguns parâmetros hidrodinâmicos (porosidade, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento) na área de abrangência do poço de observação, e/ou realizar testes laboratoriais do material poroso;
5. Coletar, em uma maior gama possível, dados de nível estático, se possível um monitoramento durante os períodos secos e chuvosos;
6. Fazer um levantamento dos principais usos dos recursos hídricos, principalmente da bateria de poços que utilizam da técnica de bombeamento para os usos agrícolas, industrial e abastecimento de povoados e cidades.

No que concerne ao aprimoramento da técnica de calibração e da facilitação ao usuário (modelador) do emprego do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico, sugere-se como pesquisa:

1. Implementar adicionalmente ao método iterativo que gera as matrizes das novas condutividades hidráulica, um outro método opcional ao usuário para gerar essas novas matrizes, como a técnica do Algoritmo Genético;
2. Elaborar um modo automático para a calibração. Da forma que, um único clique na interface de um executável entre com os dados (saída do MIGHA) no PMWIN, faça o rodar, e o resultado (cargas) seja lido na MIGHA para gerar uma nova matriz, repetindo esse processo até atingir o critério estabelecido para a calibração.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, P. M.; WOESNER, W. W. 1992. **Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport**. San Diego, California. Academic Press.

ANJOS, F.T. 2000. **Estudo Hidrogeológico do Aquífero Rio da Batateira e Caracterização da Possibilidade de Abastecimento d'água nos Municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha - CE, no ano de 2020**. Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal do Ceará.

BEAR, J. 1972. **Dynamics of Fluids in Porous Media**. New York. American Elsevier. 764 p.

BOUWER, H. 1978. **Groundwater Hydrology**. McGraw-Hill Book Company.

CABRAL, J. P. 1997. Movimento das Águas Subterrâneas. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.) **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE. Capítulo 3.

CAICEDO, N. L. (2001). Água Subterrânea. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª.ed. Porto Alegre: Editora da Universidade : ABRH. (Coleção Brasileira de Recursos Hídricos; v4). Volume 4, Capítulo 8.

COSTA, C. T. F. 2005. **Modelagem Numérico-Analítica do Fluxo Hídrico e da Contaminação de Água Subterrânea por Derivados de Petróleo**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará. UFC.

COSTA, W. D.; NETO, M. S. C. C.; SOUZA, F. J. A. 1998. **Plano de Gestão da APA da Chapada do Araripe – CE/PE/PI – Estudos dos Recursos Hídricos**. FUNDETEC, 99 p.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. 1996. **Programa Nacional de Estudos dos Distritos Mineiros: Projeto Avaliação Hidrogeológica da Bacia Sedimentar do Araripe**. Recife: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Distritos Regionais Pernambuco e Ceará. 101 p.

DOHERTY, J.; BREBBER, L. and WHYTE P. 1994. **PEST - Model-Independent Parameter Estimation**. User's manual. Watermark Computing. Australia.

DOMENICO, P. A. & Schwartz, W. 1997. **Physical and Chemical Hydrogeology**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons. 506 p.

FERNANDES, R. A. 2005. **Gestão Integrada de Águas Subterrâneas: Critérios Gerais Orientadores para Definição e Caracterização de Áreas Estratégicas de Abastecimento**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. UFMG.

GOLDER/PIVOT. 2005. **Implantação do Sistema de Monitoramento/Gestão de Uma Área Piloto do Aquífero Missão Velha na Bacia Sedimentar do Cariri, no Estado do Ceará**. Relatório Final do Projeto. IX volumes.

GUO, X.; ZHANG, C. M. 2000. **Hidraulic Gradient Comparison Method to Estimate Aquifer Hydraulic Parameters Under Stead-State Conditions**. GroundWater 38. no. 6:815-826.

HEATH, R.C.1983. **Water Supply Paper**. U.S. Geological Survey. 81 p.

HILL, M. C. 1992. **MODFLOW/P - A computer program for estimating parameters of a transient, three-dimensional, groundwater flow model using nonlinear regression**. U.S.Geological Survey, Open-file report 91-484.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. 2000. **Sistema IBGE de Recuperação automática – SIDRA**. Disponível em:
<<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/popul/default.asp?z=t&o=21&i=P>>. Acesso em: 10 dez. 2006.

IPLANCE – Fundação Instituto de Planejamento do Ceará. 1997. **Atlas do Ceará**. Governo do Estado do Ceará. Secretaria do Planejamento e Coordenação – SEPLAN. 65 p.

KIMURA, G. 2003. **Caracterização Hidrogeológica do Sistema Sedimentar do Gráben Crato-Juazeiro, no Vale do Cariri (CE)**. Departamento de Engenharia Sanitaria e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado, 198 p.

KRESIC, N. 1997. **Quantitative Solution in Hydrogeology and Groundwater Modeling**. Lewis Publishers, Florida.

MANOEL FILHO, J. 1997. Contaminação das Aguas Subterraneas In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.) **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza:CPRM,LABHID-UFPE. Capítulo 6.

MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. 1988. **A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model**. Technical report, U.S. Geol. Survey, Reston, VA.

MENDONÇA, L. A. R. 2001. **Recursos Hídricos da Chapada do Araripe. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará**. Tese de Doutorado, Fortaleza, 193 p.

MIYASAKI, G. S. 2006. **Modelagem Computacional do Fluxo Hídrico Subterrâneo de um Aquífero Aluvial, Ibicutinga e Morada Nova (CE)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. UFC.

NEWELL, C. J.; MCLEOD, R. K.; GONZALEZ, J. R. 1996 . **Bioscreen User's Manual. National Attenuation Decision Support System**. Version 1.3, National Risk Management Research Laboratory, EPA/600/R -96/087, August.

POETER, E. P. and Hill, M. C. 1998. **Documentation of UCODE, a computer code for universal inverse modeling**, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 98-4080.

PONTE, F. C. & PONTE-FILHO, F. C. 1996. **Estutura Geológica e Evolução Tectônica da Bacia do Araripe**. Recife. DNPM, 68 p.

PROASNE. 2003. **Modelamento Matemático da Área de Recarga do Aquífero Açú, Rio Grande do Norte – Relatório Final**. Disponível em: < <http://proasne.net/acufinalreport.html#Tratamento> > Acesso em: 10 jan. 2007.

SCHUSTER, H. D. M. 2002. **Modelagem Matemática do Uso Conjunto das Águas Superficiais e Subterrâneas da Sub-Bacia do Rio das Femeas – Bahia**. - Projeto de gerenciamento integrado das atividades na bacia do são francisco – Ana/GEF/PNUMA/OEA,Salvador-BA, 59 p.

SCHUSTER, H. D. M.; ARAÚJO, H. D. B. 2004. **Uma Formulação Alternativa do Método Iterativo de Gradiente Hidráulico no Procedimento de Calibração dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Sistema Aquífero**. RBRH – Revista brasileira de recursos hídricos. Volume 9, no 2: 31-37.

SOUZA, C.D. 2007. **Simulação Computacional do Fluxo Hídrico Subterrâneo na Região do Cariri e Calibração Utilizando Gradiente das Cargas Hidráulicas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará - UFC. 134 p.

STRACK, O. D. L. 1989. **Groundwater Mechanics**. New Jersey: Prentice-Hall, 732 p.

SUDENE. 1967. **Estudo geral de base do Vale do Jaguaribe**. Recife, Série Hidrogeologia 7, 245 p.

TODD, D. K. 1980. **Groundwater Hydrology**. New York: John Wiley.

TUCCI, C. E. M. (org.) 2001. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. ABRH-EDUSP- Editora da Universidade (UFRGS).

VERISSIMO, L. S. 1999. **A importância das Águas Subterrâneas para o Desenvolvimento Socioeconômico do Eixo CRAJUBAR, Cariri Ocidental - Estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará - UFC. 140p.