

XIV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO: METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO DA CAPTURA DE ÁGUA DE RIOS POR POÇOS ALUVIONAIS

Artur Holanda de Souza¹ & Francisco de Assis de Souza Filho²

RESUMO – A água subterrânea é extraída de aquíferos por meio de poços para diversos fins, desde o abastecimento da rede pública até como insumo de atividades industriais e agropecuárias. Isso causa um rebaixamento do lençol freático, e se houver um rio próximo que esteja hidráulicamente conectado ao aquífero, uma parte significativa da água deste rio pode ser desviada para alimentar o poço, um fenômeno chamado de captura. Diversos fatores influenciam a porcentagem da vazão do poço que passa a provir do rio e na sua variação temporal, dentre eles a proximidade do poço ao rio e a barreiras de fluxo, dimensão e forma da bacia hidrográfica e características geológicas do aquífero. No presente trabalho, foram feitas simulações numéricas de diferenças finitas de aquíferos retangulares conectados a rios centrais e submetidos ao efeito de três poços com vazão de 1000 m³/dia cada um, a uma distância de 200 m do rio central, utilizando-se o software Modflow, com a intenção de avaliar a influência do comprimento dos aquíferos ao longo do rio central, das cargas hidráulicas pré-bombeamento no aquífero e da posição dos poços na magnitude e variação temporal da captura.

ABSTRACT– Groundwater is extracted from aquifers through wells to serve many purposes, from public supply to industrial and farming activities. This causes a decline in phreatic water level, and if there is a river in the vicinity that is hydraulically connected to the aquifer, a significant part of the river water may be diverted to feed the well, a phenomenon called capture. Several factors influence the percentage of the flow rate that can comes from the river and its temporal variation, among them well proximity to the river and flow barriers, size and shape of the hydrographic basin and geological characteristics of the aquifer. In the present work, finite difference numerical simulations of rectangular aquifers connected to central rivers and subjected to the effect of 3 pumping wells with a flow rate of 1000 m³/day each, at a distance of 200 m of the central river on

1) Mestrado em Engenharia Civil na área de especialização de Recursos Hídricos. UFC. Av. da Universidade, 2853 – Benfica, Fortaleza – CE.
Fone: (85) 997378253, e-mail: artur.holanda.souza@gmail

2) Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. UFC. Av. da Universidade, 2853 – Benfica, Fortaleza – CE. Fone: (85) 33669774, e-mail: assis@ufc.br

Modflow software, with the purpose of evaluating the influence of aquifer length along the central river, pre-pumping hydraulic heads and well position on capture magnitude and temporal variation.

Palavras-Chave – Água subterrânea. Interação rio-aquífero. Modflow.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Barlow e Leake (2012), um poço próximo a um rio extrai inicialmente toda a sua vazão do aquífero, e com o tempo passa a extrair uma parcela do rio e, normalmente, tende a extrair 100% da vazão do rio ao longo do tempo. Isso ocorre conforme mostra a figura 1. Dois parâmetros muito usados são o tempo a partir do qual a captura do compõe a maior parte da água bombeada, chamado de t_{dds} , e o tempo em que o percentual captura se torna um valor próximo de 100%, como 95 ou 99%, ou tempo de captura total.

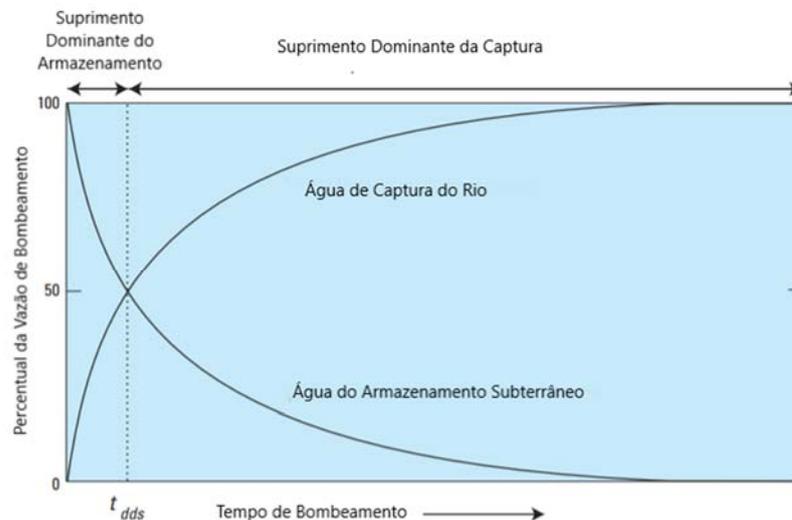


Figura 1 – Curva de Captura de Poço Próximo a um Rio.

Segundo o inciso XIX do artigo 21 da Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, compete à União instituir sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e definir critérios de outorga de direitos de seu uso.

A regulamentação desse inciso se dá na lei 9433, de 8 de janeiro de 1997, também chamada de “lei das águas”, em que o artigo 11 estabelece que o regime de outorga do direito de uso dos recursos hídricos tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água.

No artigo 12 da mesma lei, estão sujeitos à outorga pelo Poder Público os direitos dos seguintes usos dos recursos hídricos:

I – derivação ou captação de parcela da água existente num corpo de água para consumo final, inclusive abastecimento público, ou insumo de processo produtivo;

II – extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo.

A instituição que efetivamente emite as outorgas depende do domínio sobre o qual o corpo hídrico está sujeito. No caso de corpos de água sobre o domínio da União, a Agência Nacional de Águas (ANA) concede as outorgas. Segundo o artigo 20 da Constituição Federal, são bens da União os lagos, rios ou quaisquer correntes de água em terrenos do seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais.

Para corpos hídricos sobre o domínio dos Estados, o órgão gerenciador de recursos hídricos do Estado emite as outorgas. O artigo 26 da Constituição Federal estabelece que se incluem entre os bens dos Estados as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes ou em depósito, ressalvadas, neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União.

Diante da imprescindibilidade que a água possui para as mais diversas atividades humanas, a emissão das outorgas e são muitas vezes motivo de conflitos sociais que entram para a esfera jurídica, e, assim, torna-se necessário estabelecer de forma clara e objetiva quem determina e como se dá a distribuição dos direitos de uso.

No entanto, isso pode se tornar um desafio dado que a água está sempre circulando no ciclo hidrológico, onde ocorrem trocas constantes entre os a atmosfera e as águas superficiais e subterrâneas. Um exemplo disso, que é o tema do presente trabalho, é a extração de água em poços localizados em aquíferos aluviais, que misturam os usos I e II citados no artigo 12 da lei 9433.

Nestes casos, torna-se necessário estabelecer qual a parcela da água bombeada pelo poço que é proveniente do rebaixamento do nível do lençol freático e qual a parcela que se deve ao aumento na taxa de infiltração no leito do rio devido ao aumento do gradiente hidráulico, pois essas duas fontes podem ser distintas juridicamente no que se refere à legislação pertinente à outorga.

2. METODOLOGIA

Percebeu-se que o fluxo em aquíferos se dá de forma mais horizontal. Assim, o problema pode ser aproximado como bidimensional, o que consiste na chamada aproximação de Dupuit-Forchheimer [Haitjema, 1995]. Seguindo essa hipótese e admitindo um solo isotrópico e homogêneo, tem-se a equação 1.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = -\frac{S}{T} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Sendo T a transmissividade e S o armazenamento, dados por:

$$T = K \times b \quad (2)$$

Para aquíferos não-confinados:

$$T = S_y \quad (4)$$

Em que h é a carga hidráulica, x e y são as posições horizontais, b é a espessura do aquífero e S_y é a descarga específica.

Para simular essa evolução temporal, foram feitas simulações de fluxo em meio poroso pelo método das diferenças finitas, implementado por meio do software MODFLOW-2005 (The U.S. Geological Survey Modular Groundwater Model). Foi utilizada a interface gráfica do PMWIN (Processing Modflow for Windows) de Wen-Hsing Chiang e Wolfgang Kinselbach para a construção dos modelos e visualização dos resultados.

Assim, para modelar o fenômeno da captura, foram gerados 2 sistemas numéricos de diferenças finitas de aquíferos homogêneos e não-confinados pelo Modflow com um rio central as dimensões apresentadas na tabela 1:

Tabela 1 – Dimensões dos Sistemas

	Comprimento (m)	Largura (m)	Espessura (m)
Sistema 01	2.100	2.100	40
Sistema 02	4.100	2.100	40

Os sistemas foram discretizados por células de dimensões 100 x 100 x 40 m, com fronteiras impermeáveis. A cota da superfície do terreno é igual a 40 m e a do fundo impermeável do aquífero é igual a 0. Para ambos os sistemas, foi simulada a captura transiente de uma bateria de 3 poços distribuídos do lado direito do rio. Cada poço terá uma vazão de 1000 m³/dia, sendo a vazão total de bombeamento igual a 3000 m³/dia.

No sistema 02, com o aquífero mais alongado, foram analisados 3 posicionamentos da bateria de poços, uma central, uma mais a jusante e uma mais a montante, de modo a quantificar o efeito do posicionamento nos resultados.

As figuras 2 e 3 mostram os 2 sistemas no PMWIN, plataforma em que eles foram construídos.

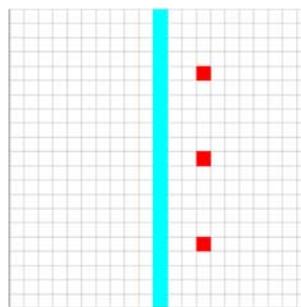


Figura 2 – Sistema 01 com poços inseridos nas células em vermelho e rio em azul (fluxo fluvial de cima para baixo).

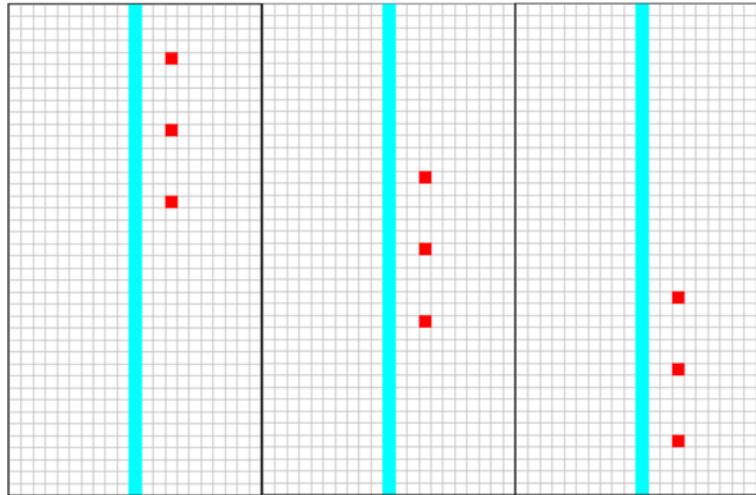


Figura 3 – Sistema 02 com os 3 posicionamentos dos poços inseridos nas células em vermelho e rio em azul (fluxo fluvial de cima para baixo).

Os parâmetros hidrogeológicos considerados para o solo, considerado arenoso, foram de condutividade hidráulica igual a 0,0001 m/s e descarga específica igual a 0,25.

Em todas as simulações foi assumida para o nível do rio uma declividade de 1m para cada 1000m, com ponto inicial na cota 40m e final na cota 38m, para o sistema 1 e cota final 36 m no 2.

A carga inicial do aquífero foi tomada como 40 e 38, no sistema 1 e 40 e 36, no aquífero 2. Isso foi feito para avaliar se as condições iniciais afetam os resultados.

Foram calculadas e plotadas a curva temporal de captura e a distribuição espacial vazão de captura ao longo do comprimento fluvial, para dois (02) comprimentos de bacia diferentes e dois (02) níveis diferentes do rio, ou seja, quatro (04) condições distintas.

Para fazer a montagem da curva de captura, é preciso simular a infiltração pelo leito do rio com e sem a influência da bateria de poços e subtrair as vazões de infiltração, pois assim obtém-se a vazão de água que efetivamente passa do rio para o poço.

Como explicitado anteriormente, três (03) posicionamentos da bateria de poços foram analisados, e, além disso, dois (02) níveis iniciais do aquífero foram simulados. Portanto, foi necessário realizar no total dezesseis (16) simulações transientes.

3. RESULTADOS

As isolinhas de carga para as duas cargas iniciais diferentes são muito similares, o que atesta que o tempo foi suficiente para os sistemas se estabilizarem e convergirem para a mesma situação estacionária.

Para o sistema 1, houve um comportamento muito semelhante ao que seria esperado baseado no relatório de Barlow e Leake, ou seja, houve uma convergência para a situação em que 100% da vazão é proveniente da infiltração no leito do rio, conforme mostra a figura 4.

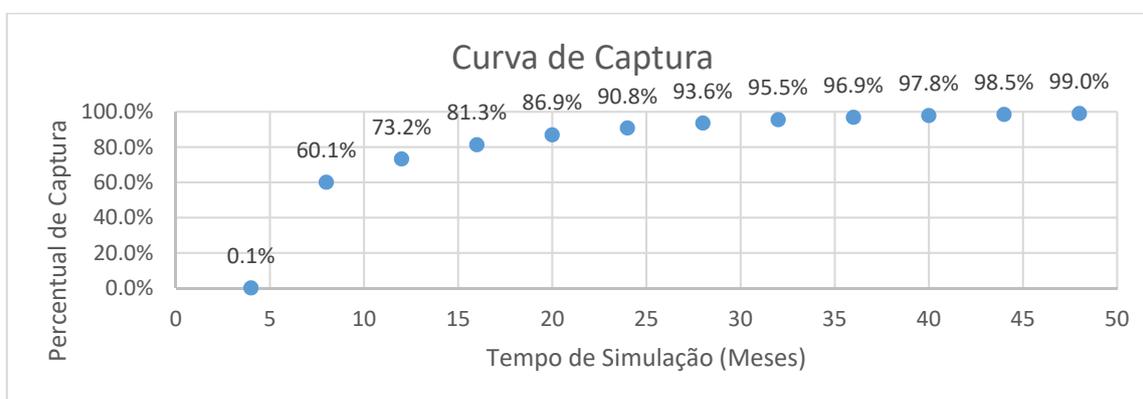


Figura 4 – Percentual de Captura x Tempo (Sistema 01, Carga Inicial = 40 m).

Já para o sistema 2, a curva de captura se estabilizou em um percentual de captura do rio inferior a 100%, como pode ser observado nas figuras 5, 6 e 7.

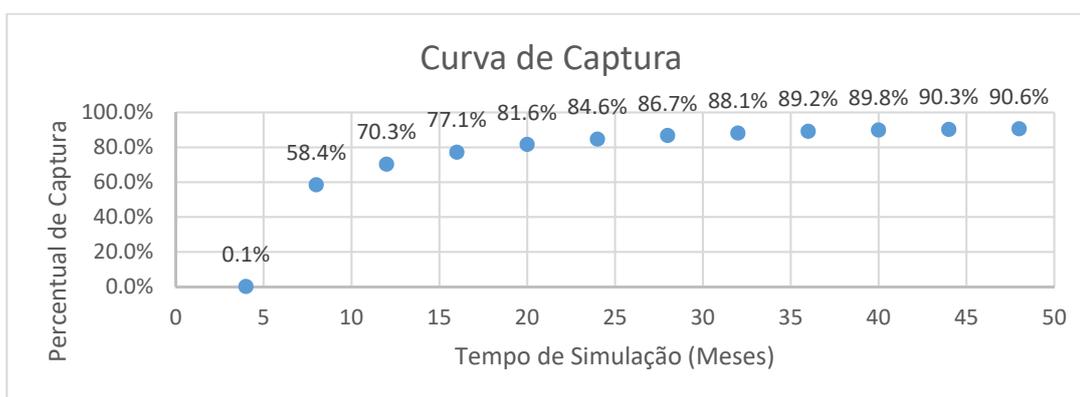


Figura 5 – Percentual de Captura x Tempo (Sistema 02, Carga Inicial = 40 m, Poços Posicionados a Montante).

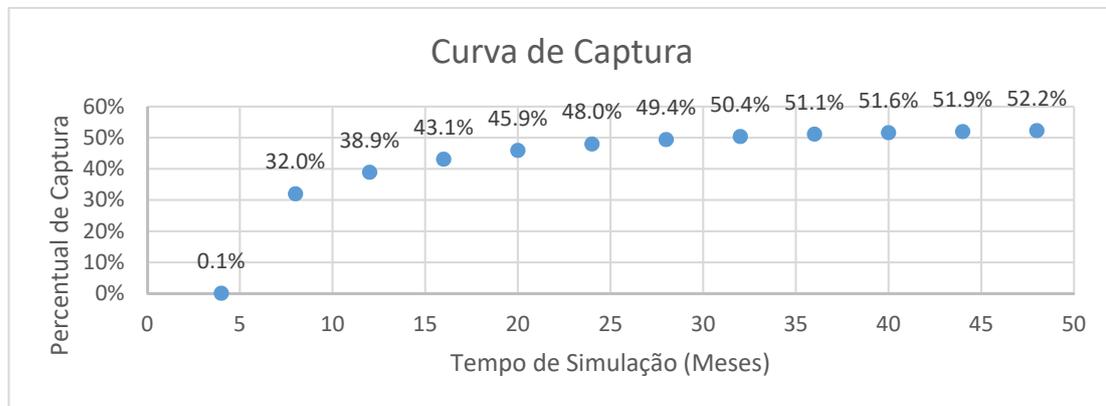


Figura 6 – Percentual de Captura x Tempo (Sistema 02, Carga Inicial = 40 m, Poços Posicionados no Centro).

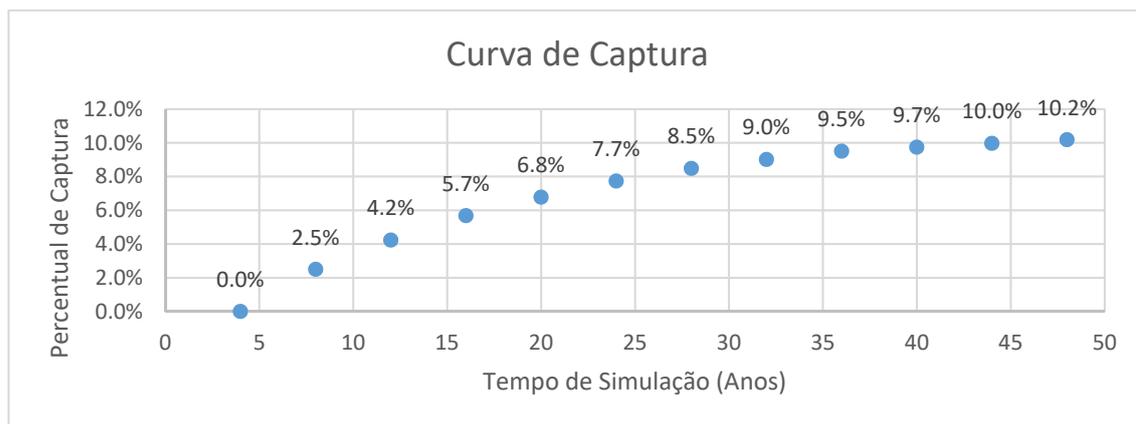


Figura 7 – Percentual de Captura x Tempo (Sistema 02, Carga Inicial = 40 m, Poços Posicionados a Jusante).

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi possível desenvolver uma metodologia de avaliação do impacto de poços aluviais no regime de escoamento fluvial. O modelo foi aplicado a diferentes configurações do sistema rio-aquífero-poços. Duas (02) configurações foram analisadas utilizando modelos computacionais de diferenças finitas aplicados a sub-bacias esquemáticas de 2,1 km de largura e 2,1 e 4,1 km de comprimento ao longo de um rio central, com um aquífero de profundidade constante

isolado por barreiras impermeáveis, e a distribuição temporal da taxa de captura de uma bateria de poços localizados a 200 m do rio pôde ser devidamente calculada.

Para a bacia de 2,1 km de comprimento ao longo do rio, houve o estabelecimento de uma condição de captura total, com toda a vazão do poço sendo proveniente do rio, depois de um tempo de simulação de aproximadamente 2 anos e 7 meses, para a carga inicial no aquífero de 40 m, e 2 anos, 6 meses e 21 dias, para a carga inicial de 38 m.

Para uma bacia de maior comprimento 4,1 km de ao longo do rio, a captura total não se estabeleceu, e a parcela de captura variou com o posicionamento do rio de aproximadamente 10,7 % na posição de jusante até 52,9% na posição central e 91,4% na posição de montante. Isso pode ser um indício de que posições mais a montante podem minimizar o impacto ambiental do poço no rio.

Pela comparação de resultados obtidos para duas (02) cargas iniciais diferentes, verificou-se que os gradientes hidráulicos preliminares do aquífero não têm influência significativa na curva de captura.

5. REFERÊNCIAS

- ARANTES, E. J.; CHAUDHRY, F. H.; MARCUSSI, F. F. N. (2006) *Caracterização da interação entre rio e aquífero com o uso de infiltrômetros*. Revista Águas Subterrâneas. São Paulo. v.20, n.2. p.97-108.
- BARLOW, P.M., LEAKE, S.A. (2012) *Streamflow Depletion by Wells – Understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow*. U.S. Geological Survey Circular 1376. 84 p.
- Disponível em :<https://pubs.usgs.gov/circ/1376/pdf/circ1376_barlow_report_5_08.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2017.
- BATISTA, J. A. N. (2007); WENDLAND, E.; SCHULZ, H. E. *Simulação da interação entre águas subterrâneas e superficiais no aquífero Barreiras na região da Lagoa do Bonfim por elementos analíticos*. Revista Brasileira de Geofísica. São Paulo. v.25. no.2. p. 107-116.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988. 292 p.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da república Federativa do Brasil. Brasília, DF, 8 jan. 1997.

Disponível em: <http://www.in.gov.br>. Acesso em: 20 jun. 2018.

CHIANG, W.H. (2005) *3D Groundwater Modeling with PMWIN*. 2. ed. Springer, Berlin. 441 p.

Dupuit, J. (1863) *Etudes Théoriques et Pratiques sur le mouvement des Eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*. 2 ed. Dunod, Paris. 304 p.

FETTER, C.W. (2001) *Applied Hydrogeology*. 4. ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 549 p.

Forchheimer, P. (1886) *Über die Ergiebigkeit von Brunnen-Anlagen und Sickerschlitzten*. Z. 1 ed. Architekt. Ing.-Ver. Hannover. 563 p.

FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. (1979) *Groundwater*. 3. ed. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey,. 588 p.

HAITJEMA, H.M. (1995) *Analytic Element Modelling of Groundwater Flow*. 1. ed. Academic Press, San Diego, California. 394 p.

HARBAUGH, A. W. (2005) *Modflow-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model – The Ground-Water Flow Process*. 253 p.

Disponível em: <<https://water.usgs.gov/ogw/modflow/MODFLOW.html>>. Acesso em: 13 jun. 2017.

MAIDMENT, D.R. (1993) *Handbook of Hydrology*. 1. ed. McGraw Hill, Austin, Texas. 1424 p.