

**CARACTERIZAÇÃO MORFOESTRUTURAL E HIDROGEOLÓGICA DE AQUÍFEROS
EM MEIO FRATURADO ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO
E ANÁLISE ESTATÍSTICA EM SETOR DO PLANALTO MERIDIONAL - RS**

TAKAHASHI, Hiroito Alberto

HAERTEL, Vitor

LISBOA, Nelson Amoretti

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

**Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia -
CEPSRM -**

Av. Bento Gonçalves 9500 - Campus do Vale - Cx. Postal: 15044

CEP : 91501-970 - Porto Alegre - RS

Tel : (051) 336-9822/339-1355/336-8399 Ramal : 6221

1 - INTRODUÇÃO

Este artigo tem por objetivo divulgar a metodologia desenvolvida pelo pesquisador Hiroito Alberto Takahashi em sua dissertação de Mestrado, bem como os resultados obtidos pelo trabalho deste geocientista desaparecido prematuramente da comunidade científica brasileira.

Os dois outros autores, respectivamente orientador e co-orientador da dissertação efetuaram uma síntese do trabalho, selecionando os tópicos mais pertinentes, ordenando-os em uma sequência lógica em forma de artigo.

A pesquisa consiste em uma análise morfoestrutural com objetivo hidrogeológico utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto, juntamente com dados de poços tubulares perfurados na região de estudo e fornecidos pela Companhia Riograndense de Saneamento - CORSAN. O trabalho foi desenvolvido no Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Os dados obtidos na análise morfoestrutural, junto com dados de natureza hidrogeológica foram trabalhados através de técnicas geomatemáticas, em especial, análise de superfície de tendência. Para a integração das análises efetuadas utilizou-se a do Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Verificou-se a possibilidade de conhecimento do padrão regional da ocorrência de lineamentos, bem como a identificação de morfoestruturas anômalas. Através da integração dos resultados pode-se detectar zonas de diferentes condições hidrogeológicas permitindo relacionar tais zonas com os parâmetros que as caracterizam.

A área em estudo situa-se ao Norte do Estado do Rio Grande do Sul, nas cabeceiras do Rio Jacuí, à sua margem direita, abrangendo uma superfície de 1200 Km² (Fig.1).

2. ANÁLISE DE PLANOS DE INFORMAÇÃO EM IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

A rede de drenagem foi analisada a partir de uma imagem de satélite LANDSAT 5, sensor TM, composição colorida das bandas 3,4,5, órbita-ponto 222/80, quadrante A, escala 1:100.000. Os traçados correspondentes foram então digitalizados. A Fig.2 apresenta a rede de drenagem na escala 1:250.000 correspondente a uma saída do SIG via "plotter" e constitui o primeiro plano de informações.

A drenagem foi analisada do ponto de vista de sua textura, padrão e anomalias. Na região estudada predomina a textura média com variações para (a) média-fina e (b) média-grosseira (Fig.2), o que indica condições razoáveis da infiltração e uma relativa anisotropia do meio apontada pelas variações texturais em (a) e (b). Ocorrem três padrões básicos de drenagem (1), o angular, com a distribuição superficial mais ampla, característico do meio fraturado, indicador de padrão de lineamentos multidirecional (2), o retangular com distribuição a nordeste da área característico do meio fraturado com predominância do padrão de lineamentos bidirecionais e (3) o anelar indicador de padrão de lineamentos anelar. Associada ao padrão de drenagem anelar, foi identificada na imagem LANDSAT uma anomalia do curso do Rio Colorado (Fig. 2,A) materializada pela ruptura do seu perfil longitudinal onde ocorre um alargamento anormal do vale que toma a forma de "U" aberto ao longo de um trecho de aproximadamente 6 Km lineares dentro do perfil normal encaixado no restante do aludido rio. O padrão anelar de drenagem associado à anomalia descrita assume importância na recarga do aquífero em meio fraturado, objeto da presente pesquisa e é fator de primeira ordem no controle da vazão dos poços.

Para a extração dos lineamentos, os produtos que se mostraram mais eficientes foram imagens de Radar-SLAR do projeto RADAN-BRASIL na escala 1:1 000 000 e fotografias aéreas pancromáticas da faixa do visível do Serviço Geográfico do Exército na escala 1:100.000 datadas de 1975. Nas imagens de radar foram levantados os lineamentos de médio e pequeno porte e nas fotografias aéreas lineamentos de pequeno porte e traços de fratura. A classificação acima adotada segue GOLD (1980).

Os critérios aplicados na identificação e extração dos lineamentos foram as expressões dos elementos topográficos retilíneos como linhas ou segmentos de escarpas, alinhamentos de cristas, vales, trechos de rios e depressões alongadas, elementos estes quase sempre controlados estruturalmente. Fraturas ou zonas de fraturas (incluindo falhas, zonas de falhas, zonas de cisalhamento e juntas na crosta terrestre afetam de várias formas a topografia ou feições do terreno LIU (1988).

É importante para a pesquisa hidrogeológica do meio fraturado com base em produtos de Sensoriamento Remoto, que fornecem essencialmente os lineamentos, a distinção entre morfoestrutura e litoestrutura. O lineamento é uma morfoestrutura por conceituação: é uma feição linear mapeável, simples ou composta, contínua ou descontínua, da superfície terrestre, cujas partes estão alinhadas em arranjo retilíneo ou suavemente curvo e que diferem distintamente dos padrões de feições que lhes são adjacentes e, presumivelmente, refletem um fenômeno de sub-superfície, conforme O'LEARY et alii (1976). Portanto o lineamento, a morfoestrutura reflete mas não se confunde com a litoestrutura, cujo domínio é a sub-superfície, que é a condição mesma da existência do aquífero como reservatório de água em meio fraturado. Esta distinção é aqui realçada com o objetivo de chamar a atenção para o fato de que os parâmetros passíveis de tratamento geomatemático como densidade e comprimento de lineamentos e que servem para a caracterização dos aquíferos, serem modelados pelos processos exógenos não correspondendo à litoestrutura em profundidade. Por outro lado, o parâmetro orientação dos lineamentos tem correspondência absoluta com a litoestrutura em sub-superfície.

As observações acima são essenciais na interpretação de dados provenientes de imagens de Sensoriamento Remoto com objetivo de caracterização hidrogeológica de aquíferos em meio fraturado.

A figura 3 representa o traçado dos lineamentos na área de estudo, correspondendo a uma saída do SIG via "plotter" e representando a análise visual dos produtos já aludidos. Constitui o segundo plano de informações. Como elemento complementar ilustrativo observa-se o

correspondente diagrama de rosetas, o qual ressalta o padrão multidirecional de lineamentos de pequeno porte com predominância das direções N 50° - 60° W e N 40° - 50° E. No traçado observa-se o padrão anelar já realçado no plano de informação da drenagem.

3 - GERAÇÃO DOS PLANOS DE INFORMAÇÃO POR TÉCNICAS GEOMATEMÁTICAS

Conforme mencionado anteriormente, este trabalho implementou técnicas de Sistemas de Informações Geográficas ao estudo de aquíferos em meio fraturado.

Neste contexto foram criados os seguintes planos de informações considerados relevantes :

- densidade de lineamento;
- textura do relevo;
- espessura do regolito;
- orientação dos lineamentos;
- vazões específicas

Esses temas devem inicialmente ser colocados em uma forma adequada ao seu tratamento em um SIG. Neste estudo, a solução adotada constitui na implementação das superfícies de tendência. Basicamente, a superfície de tendência é expressa por uma equação linear ou não, que descreve o comportamento de uma variável de interesse em função da localização (no caso presente, geográfica) de cada ponto . A forma mais simples pode ser escrita por :

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2, \quad (3.1)$$

Onde :

X_1, X_2 : coordenadas que definem a posição de um ponto no terreno.

y : variável (ou atributo) associado a esse ponto. (por exemplo, densidade de lineamento).

b_0, b_1, b_2 : coeficientes estimados a partir de amostras.

A equação (3.1) é linear em X_1 e X_2 . Superfícies mais complexas (segundo grau, por exemplo) podem ser também consideradas. Métodos estatísticos bem conhecidos (coeficiente de determinação, análise dos resíduos, etc.) permitem avaliar, com base nos dados amostrais, o quão bem a superfície obtida se ajusta aos dados observados, pois sempre ocorrerão discrepâncias entre os dados observados em um ponto (X_1, X_2) e o valor predito pela superfície de tendência para esse ponto.

Neste contexto, os dados em Recursos Naturais em geral, a Geologia Estrutural em particular, podem ser entendidos como a resultante de duas componentes: aquela descrita pela superfície de tendência (componente regional) e a segunda, descrita pelas discrepâncias entre o valor observado e o predito pela superfície de tendência (variações locais ou anomalias). O valor de cada componente depende obviamente do modelo escolhido para a superfície de tendência (linear, segundo grau, etc). Neste estudo modelos distintos foram testados, sendo selecionado o que mostrou ser mais adequado.

Os planos de informações foram então construídos a partir das superfícies de tendência, isto é, refletem a componente regional dos parâmetros hidrogeológicos de interesse.

3.1 - PI DENSIDADE DE LINEAMENTOS

Os lineamentos detectados via técnicas de Sensoriamento Remoto foram plotados em uma carta topográfica, que foi então discretizada em células regulares,, cobrindo cada uma , aproximadamente 18 Km² no terreno. Sobre cada célula foi então calculado o parâmetro "densidade de lineamento" (DL) :

$$DL = \frac{\sum L}{A}$$

Onde :

$\sum L$ = somatório do comprimento dos lineamentos na célula.

A = área total da célula.

Para uma melhor adequação aos valores numéricos, procedeu-se à uma normalização do valores DL :

$$DL^* = \frac{DL - DL_{MIN}}{DL_{MAX} - DL_{MIN}}$$

Onde :

DL_{MIN},DL_{MAX} são valores mínimo e máximo respectivamente, que ocorre nos conjuntos das células.

O valor DL* é então associado à posição geográfica (X₁, X₂), definida pelo centro da célula e implementado no PI densidade de lineamento.

Para esta variável, superfícies de 1º e 2º grau não apresentaram um ajustamento adequado aos dados da área de estudo (valor baixo para R²). Foi adotada uma superfície de 3º grau . Os resultados são apresentados na figura 4.

3.2 - PI ORIENTACAO DOS LINEAMENTOS

Para melhor identificar os padrões de orientação a nível regional, ao longo da área de estudo foi criado um PI correspondente, seguindo uma metodologia similar a adotada na criação do PI densidade de lineamentos. A orientação do lineamentos é descrita pelo azimute. Como uma análise inicial da área, evidenciou a tendência dos lineamentos apresentarem azimutes no intervalo 90° - 180°, a geração da superfície de tendência foi desenvolvida para esse intervalo.

Como na formação das demais superfícies de tendência, foram testadas superfícies de graus distintos, optando-se pela que apresentou melhor ajuste com os dados. No caso presente, isso ocorreu para uma superfície de 2° grau. Os resultados são apresentados na figura 5.

3.3 - PI TEXTURA DO RELEVO

Entre os vários fatores condicionantes para a existência de um ambiente favorável à ocorrência de água subterrânea, a textura do relevo apresenta-se como um parâmetro de alta relevância. Como ocorre para muitas outras variáveis em Recursos Naturais, a textura do relevo pode ser facilmente observada visualmente em pares estereoscópicos de fotografia aéreas. O problema surge quando se necessita quantificá-la e de uma forma acessível ao tratamento de um SIG. Neste estudo, a metodologia adotada consistiu inicialmente na geração de um modelo numérico do terreno (MNT) cobrindo a área de interesse. Sobre a matriz MNT implementou-se uma janela móvel de dimensão 9x9. Para cada posição da janela sobre a matriz MNT foi estimada a variância das altitudes. Regiões com variações grandes em altitude na área compreendida pela janela, geram variâncias altas, o oposto ocorrido para regiões de relevo mais suave. O valor da variância na janela móvel é portanto um bom indicador das variações de altitude e portanto da textura do relevo. O PI textura foi então formado, atribuindo o valor da variância,

normalizada no intervalo 0 - 255 à posição correspondente da célula central da janela em cada uma de suas posições. Visando tornar sua utilização mais simples, o PI assim formado foi "fatiado" em intervalos, aos quais foi dada a denominação de relevo pouco dissecado, mediantemente dissecado e muito dissecado. O resultado, para a área de estudo está ilustrado na figura 6.

3.4 - PI ESPESSURA DO REGOLITO

O regolito ou manto de alteração constitui um parâmetro físico significativo no comportamento da água subterrânea.

A partir dos dados de perfis de poços tubulares disponíveis na área de estudo foi criado um PI adicional descrevendo o comportamento espacial dessa variável. Valores obtidos estão na figura 7.

3.5 - PI VAZAO ESPECIFICA

Como já foi mencionado anteriormente, este estudo visa estabelecer as relações entre parâmetros anteriormente descritos e a produtividade dos poços, utilizando técnicas de SIG. Essa comparação obviamente requer dados de vazão de poços, na área de estudos, para fins de validação da metodologia. Com essa finalidade foi desenvolvido um último PI, relativo as vazões específicas dos poços existentes na área. A metodologia seguida foi a mesma utilizada para os demais parâmetros: geração de uma superfície de tendência com bom ajuste aos dados para posterior geração de um PI no formato requerido pelo SIG. O resultado obtido está ilustrado na figura 8.

4 - INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS E CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS DO MEIO FRATURADO PESQUISADO

Foram integrados em um Sistema Geográfico de Informações (SIG), tres parâmetros considerados no início da pesquisa, como fundamentais na circulação de água em meio fraturado, quais sejam, a densidade dos lineamentos, a espessura do regolito e o grau de dissecação do relevo, através de tres planos de informação.

Considerou-se para cada plano tres graus de variação ou classes denominadas alta, média e baixa. Como resultado do cruzamento dos planos de informação no SIG, obteve-se uma carta temática com 27 áreas individualizadas associadas a uma única combinação possível entre as classes presentes nos planos de informação. Esta carta foi denominada de prognóstico hidrogeológico, (figura 9).

Comparando a carta de prognóstico hidrogeológico com a figura 8, a superfície de tendência da variação das vazões específicas, resultante do tratamento estatístico de 27 poços tubulares existentes na área pesquisada, verifica-se que as áreas de alta vazão específica (19 e 17) coincidem com a classificação alta densidade de lineamentos, média espessura do regolito e baixa ou média dissecação do relevo, o que permite generalizar que para o meio fraturado do aquífero Formação Serra geral, as condições acima são as mais favoráveis às altas vazões específicas de poços, levando em conta os parâmetros analisados.

Por outro lado, as áreas 2,12,21,24 e 26 correspondem a tendência de baixas vazões específicas e verificou-se que cada uma delas difere em pelo menos duas das condições definidas para a tendência das altas vazões específicas.

Da análise da carta temática da figura 9 resulta então a formulação da seguinte regra sintética, guia para a locação de poços tubulares : no meio fraturado da Formação Serra Geral a tendência a altas vazões específicas coincide com alta densidade de lineamentos, médias espessuras do regolito e baixos a médios graus de dissecação do relevo. A inexistência de pelo menos duas destas condições em uma

localidade é um indicador de prováveis baixas vazões específicas dos poços.

O estudo também verificou que os tres parâmetros ou planos de informação cruzados no SIG não excluem outros controles na circulação da água subterrânea no meio fraturado, que se caracteriza por extrema anisotropia. A análise visual dos planos de informação da rede de drenagem (figura 2) e do traçado dos lineamentos, (figura 3) evidenciou a presença de um padrão anelar com anomalia da drenagem, associado às altas vazões específicas (figura 9). Esta constatação chamou a atenção para a importância da orientação dos lineamentos como fator controlador da circulação hidrogeológica subterrânea.

O tratamento estatístico dos dados de orientação dos lineamentos (figura 5) confirmou o padrão anelar identificado na análise das imagens.

Devido a características da área onde predominam lineamentos de pequeno porte, o parâmetro comprimento de lineamentos não foi analisado, mas pode assumir papel relevante no controle da vazão específica dos poços, em outras condições de terreno.

A pesquisa constatou que a investigação hidrogeológica do meio fraturado, com as características da Formação da Serra Geral, direcionada para um prognóstico de áreas mais ou menos promissoras de vazão utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto e Geomatemáticas, deve analisar os seguintes cinco parâmetros fundamentais : densidade de lineamentos, orientação dos lineamentos, comprimento dos lineamentos, grau de dissecação do relevo e espessura do regolito. Em dependência das características das área estudadas cada uma destas variáveis podem assumir um peso mais ou menos relevante.

BIBLIGRAFIA

- DAVIS, John C. 1973. Statistics and data analysis in Geology. New York: John Wiley. 550p.
- GOLD, D.P. 1980 . Structural Geology. In: SIEGAL, B.S. e GILLESPIE, A.R. eds. Remote Sensing in Geology. New York: John Wiley. pp 419-483.
- LIU, C.C. 1988. A Geologia estrutural do Estado do Rio de Janeiro vista através de imagens MSS do LANDSAT. In : V Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1988, Natal-RN. Vol.2 p 282-287.
- O'LEARY, D.W., FRIEDMAN, J.D. e POHN, H.A. 1976. Lineament, linear, lineation: Some proposed new standarts for old terms. Geol. Soc. Am. Bull.; 87(10) : 1463-1469.

A B S T R A C T

Morphostructural and hydrological data collected across a test area located on the Brazilian Southern Plateau was used for hydrogeological studies.

Landsat, radar and aerial photographs were employed to collect the relevant data : lineaments density, length and orientation (azimuth).

A digital elevation model - DEM - was established in order to analyze the effects of terrain relief, along with the depth of the weathering layer. Interpolation techniques were employed in order to format these data in a fashion compatible with a GIS system.

These parameters were then introduced in a GIS in order to explain the region's hydrogeological conditions. Relevant results are presented.

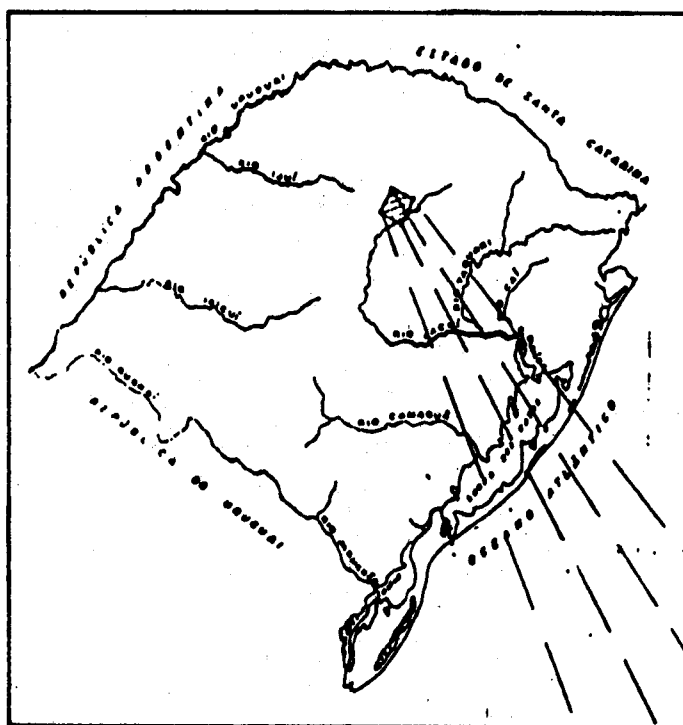
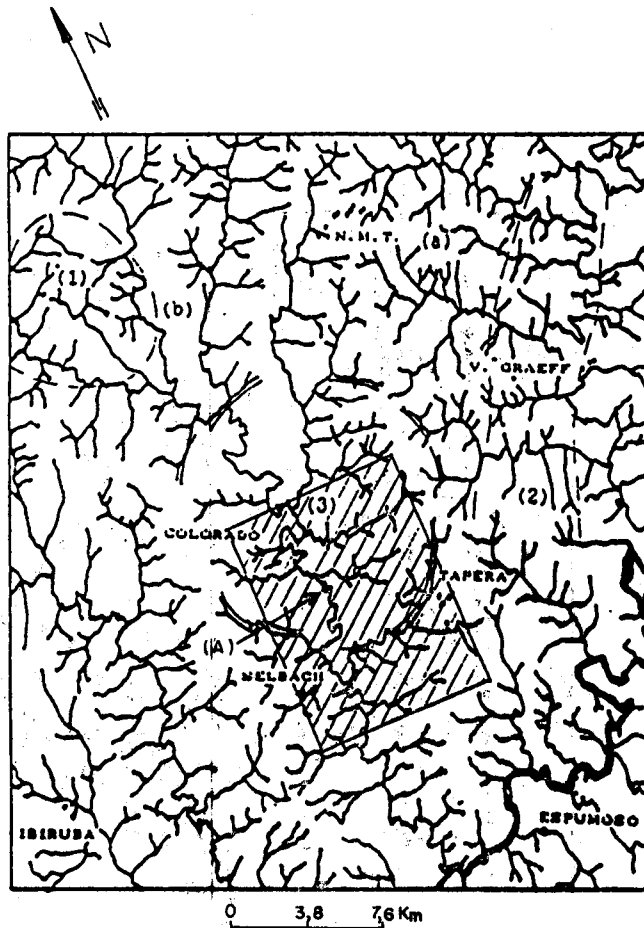


FIG. 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA.



CONVENÇÕES

- (a) - Textura média-fina da drenagem
- (b) - Textura média-grosseira da drenagem
- (1) - Padrão de drenagem angular
- (2) - Padrão de drenagem retangular
- (3) - Padrão de drenagem anelar-radial
- (A) - Anomalia da drenagem
- - Poço tubular profundo
- - - Destaque de padrões de drenagem
- Rede de drenagem

FIG. 2 - TRAÇADO DA REDE DE DRENAGEM.

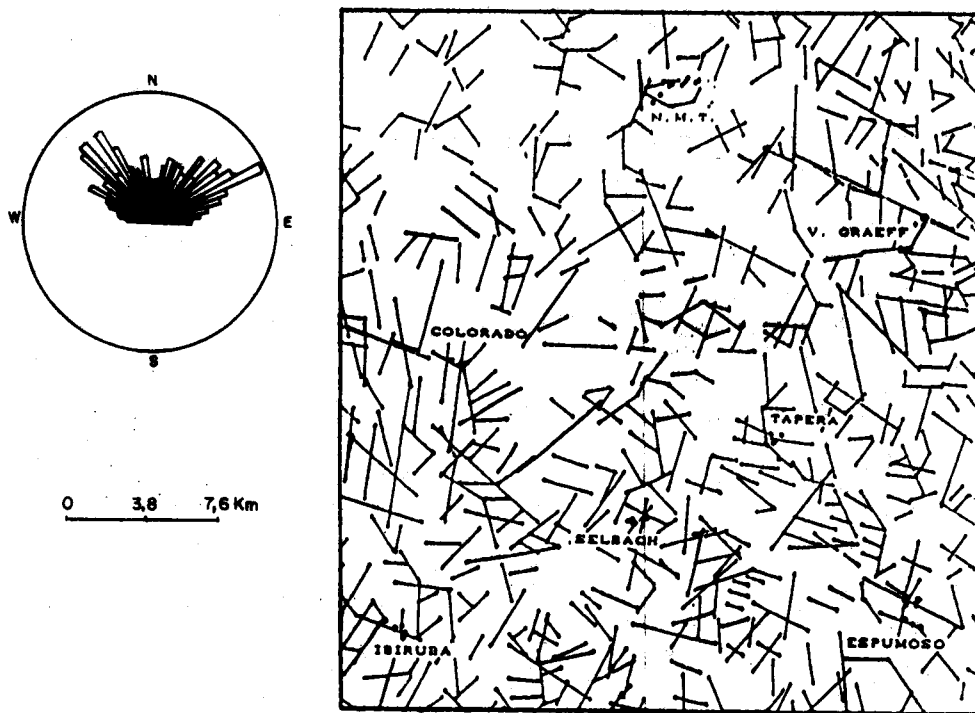


FIG. 3 - TRAÇADO DOS LINEAMENTOS E DIAGRAMA DE ROSETAS.

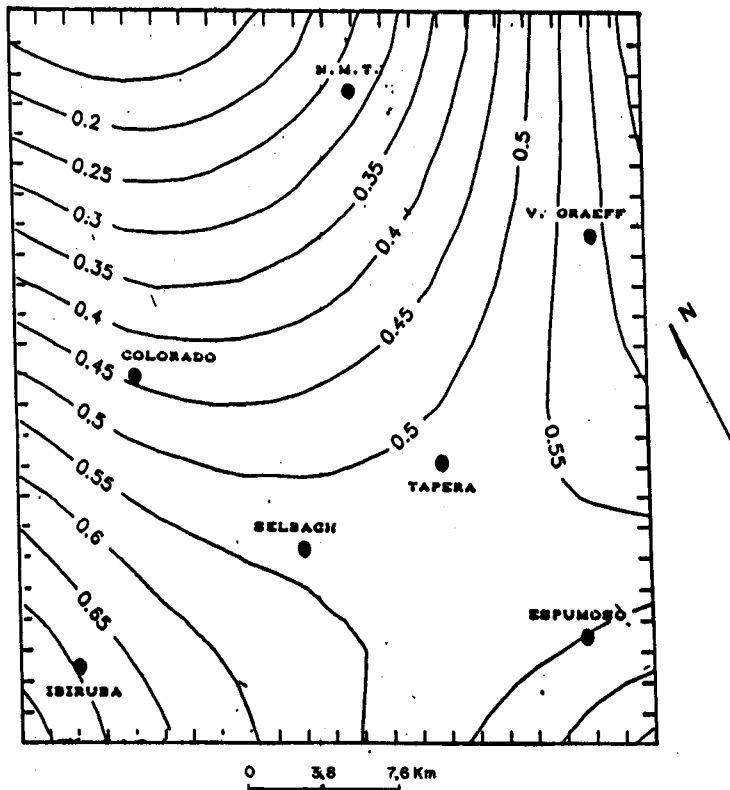


FIG. 4 - SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA, DENSIDADE DE LINEAMENTOS.

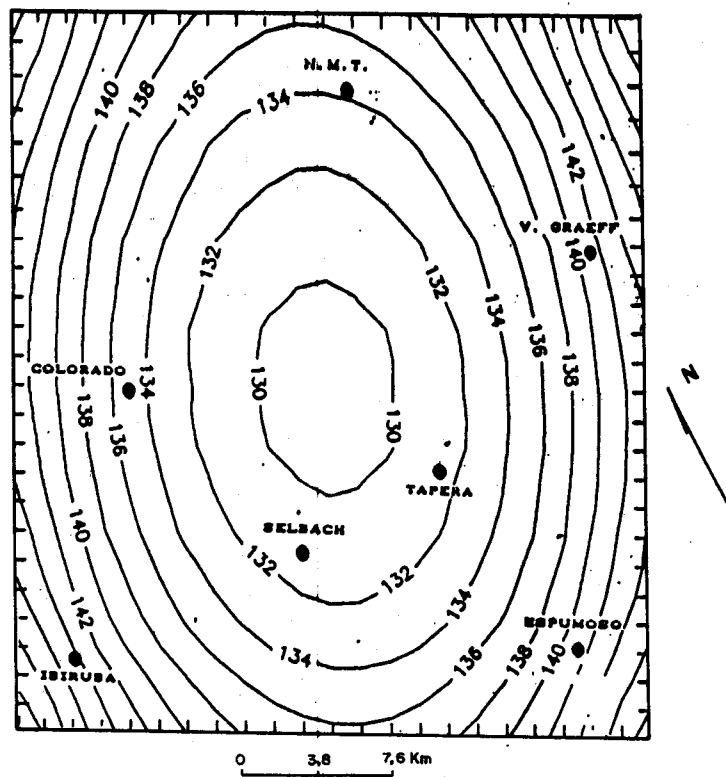
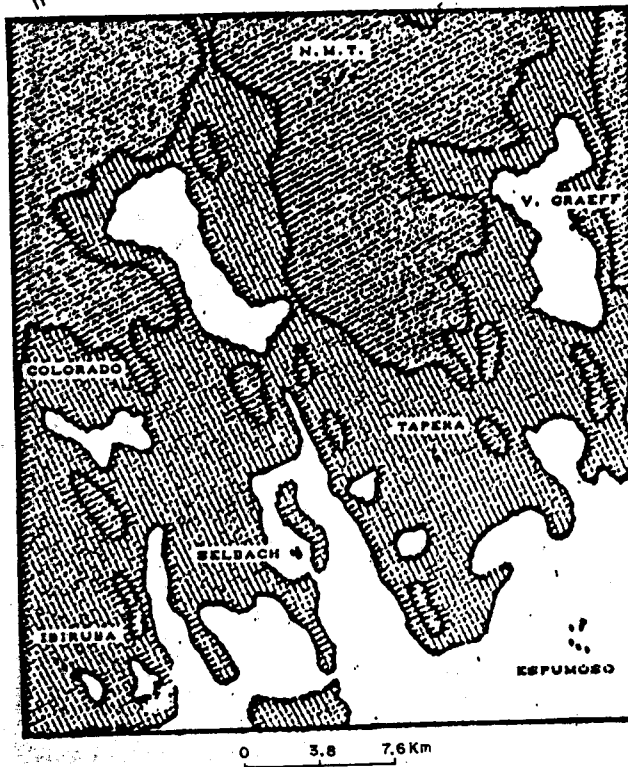


FIG. 5 - SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA, ORIENTAÇÃO DOS LINEAMENTOS.



LEGENDA

- Relevo pouco dissecado
- Relevo medianamente dissecado
- Relevo muito dissecado

FIG. 6 - DISSECAÇÃO DO RELEVO.

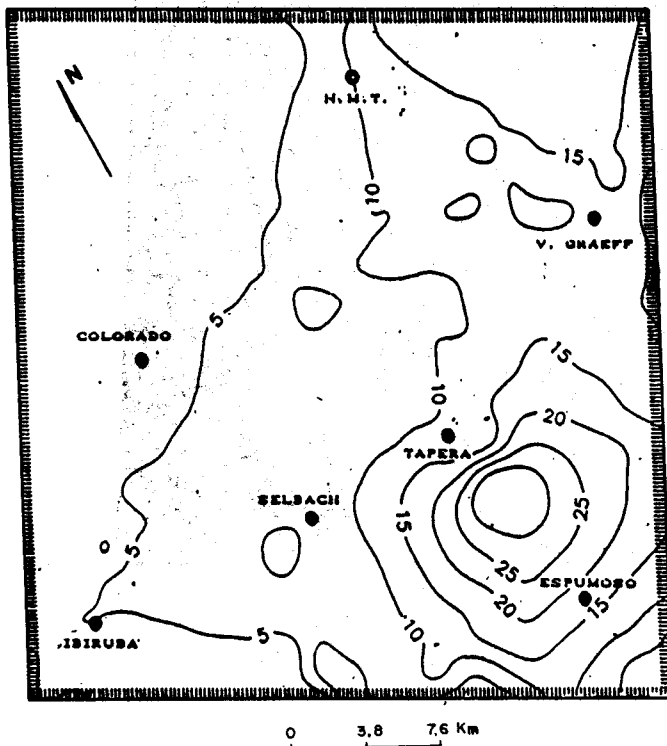


FIG. 7 - ESPESSURA DO REGOLITO.

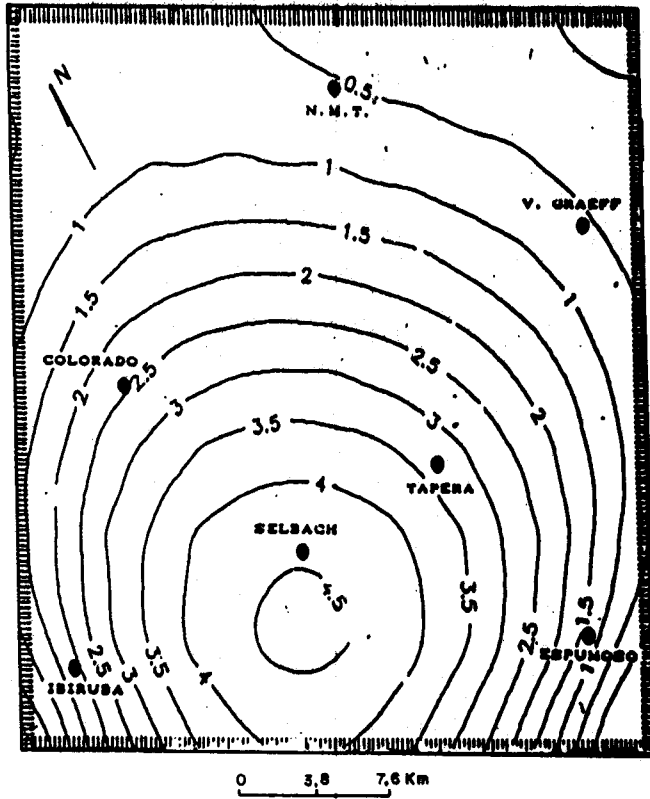


FIG. 8 - SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA, VAZÕES ESPECÍFICAS.

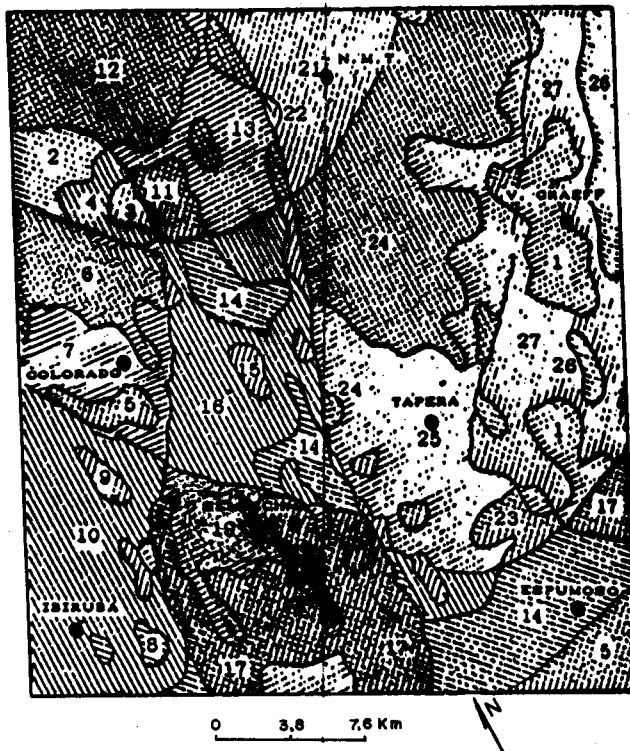


FIG. 9 - TEMA DE PROGNÓSTICO HIDROGEOLÓGICO.