

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

MAPEAMENTO DAS SUPERFÍCIES DE DESCONTINUIDADE DOS
DERRAMES DE BASALTO DA BARRAGEM DE ITAIPU

Malena D'Elia Otero

Orientadora: Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2011 / 38)

SÃO PAULO
2011

TF
O87
MD.m

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC




30900030266

MAPEAMENTO DAS SUPERFÍCIES DE DESCONTINUIDADE DOS DERRAMES
DE BASALTO DA BARRAGEM DE ITAIPU

Malena D'Elia Otero



Orientador: Prof. Dr.  Jorge Kazuo Yamamoto

Monografia de Trabalho de Formatura
(TF-2011/38)

São Paulo
2011

*Todo abismo é navegável
a barquinhos de papel.*
(João Guimarães Rosa)

Dedico este trabalho às minhas avós, Nona e Linda, e aos meus avôs, Betos e Cacho, exemplos pra mim de força e perseverança.

Agradecimentos

Ficam meus agradecimentos a todos aqueles que de certa forma fizeram parte de tudo isto.

Ao Prof. Jorge Kazuo Yamamoto pelos ensinamentos e orientação. À Fundação Itaipu, em especial ao Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens, por viabilizar o trabalho e, principalmente, a Josiele Patias pelo apoio e acompanhamento. Aos meus colegas de trabalho, Luiz Henrique, Lígia e Carlos pela ajuda e discussões pertinentes. Ao Sidnei e ao Antônio por permitir realizar este trabalho na Sala de Projetos e pela ajuda em questões de informática.

Aos meus pais, Mariana e Roberto pelo exemplo, dedicação e educação. Ao meu irmão, Guido, à Juana e a Lola pela companhia incondicional. Ao Renato, por ser, por estar sempre e por sempre e pela ajuda na edição e correção do trabalho. À paciência de todos eles.

Aos amigos e colegas de faculdade por todos os momentos nestes cinco anos juntos e pela ajuda e força neste último ano, principalmente, a Camila, Jacqueline, Lyvia, Leonardo e Priscila.

Aos amigos da vida, de sempre, que sempre me acompanharam e continuarão acompanhando: Cecília, Júlia, Luísa, Alex.

Sumário

1. Resumo	2
2. Introdução.....	4
3. Metas e Objetivos.....	5
4. Trabalhos Prévios.....	6
4.1 Aspectos Geológicos da Área de Estudo	6
4.3 Aspectos Geostatísticos	15
4.3.1 Krigagem Ordinária	15
4.3.2 Equações Multiquádricas	18
5. Materiais e Métodos	21
5.1 Levantamento de dados	21
5.2 Organização e formatação de dados.....	21
5.3 Tratamento Geoestatístico.....	24
6. Desenvolvimento do Trabalho.....	26
7. Resultados Obtidos	27
7.1 Interpolação de cotas topográficas	27
7.2 Interpolação de espessuras.....	32
8. Interpretação e Discussão dos Dados.....	35
9. Conclusões.....	41
10. Referências Bibliográficas	43

1. Resumo

A Usina Hidrelétrica de Itaipu localiza-se no contexto geológico dos derrames basálticos da Formação Serra Geral. Neste local encontram-se cinco derrames denominados A, B, C, D e E. Existem diversas feições de descontinuidades geradas por processos sin a pós-magmáticos, como as juntas-falhas, as diáclases horizontais e verticais e os próprios contatos intra-derrames; estes últimos, objeto de estudo deste trabalho. Os contatos entre derrames são marcados pela presença de uma camada de rocha denominada brecha.

A presente monografia objetivou o mapeamento destas superfícies de descontinuidade dado o interesse de se conhecer o comportamento do maciço rochoso e do fluxo d'água subterrâneo, considerando a alta porosidade das brechas, através do uso de ferramentas geoestatísticas: krigagem ordinária e equações multiquádricas.

Assim, obtiveram-se quatro superfícies de brecha e suas respectivas espessuras. As superfícies apresentam mergulho para norte-nordeste. As brechas BA, DC e ED possuem topografia suave, sem morfologias abruptas de queda ou aumento de relevo. Já a brecha CB exibe morfologia de vale, refletindo o comportamento de uma zona de cisalhamento situada abaixo do leito do rio. É a brecha com maior espessura tendo 10 metros de média enquanto as outras três mostram espessuras, predominantemente, entre 2 e 4 metros.

Nos casos das brechas BA, CB e DC foi possível determinar uma relação inversamente proporcional entre o comportamento espacial das brechas e a espessura. Já, a brecha ED apresenta espessura homogênea.

Através da definição de espessura de cada brecha, a presença do vale na brecha CB e da malha de sondagens executadas, foi possível identificar o local onde o Rio Paraná está localizado.

Com relação ao fluxo d'água, os resultados obtidos não permitem chegar a conclusões consistentes, sendo sugerido um estudo aprofundado e detalhado do mesmo.

Abstract

Itaipu's dam is located in the geological context of flood basalts from Serra Geral Formation. In this area, five flood basalts are present, called A, B, C, D and E. There are different types of discontinuities formed by synmagmatic to postmagmatic processes, such as joint-faults, cooling vertical and horizontal joints and boundaries between different lava flows; these last are the object of study of this thesis. The boundaries between floods are characterized by the presence of a layer of breccia.

This study aims to map these breccia layers because of the interest on knowing its underground configuration and groundwater behavior, considering the higher porosity of breccia layers, using geostatistical methods: ordinary kriging and multiquadric equations.

Therefore, four breccia surfaces were defined with their respective thickness. All of them showed north-northeast dip direction. Breccias BA, DC and ED presented a smooth topographic surface without abrupt changes on its height. Breccia CB, on the other hand showed the presence of a valley, indicating a shear zone located right down of river bed. This breccia is the thickest one, with an average thickness of 10 meters, while the other three presented thickness mainly between 2 and 4 meters.

In the case of breccias BA, CB and DC was possible to determine an inversely proportional relation between its dimensional characteristics and its thickness, while breccia ED presents a homogeneous thickness.

Through the establishment of each breccia thickness, the presence of the valley in breccia CB and drill hole mesh was possible to identify the location of Paraná River.

The results obtained regarding topography and thicknesses are not enough to draw conclusions about groundwater behavior which would require further studies.

2. Introdução

A Usina hidrelétrica de Itaipu (**figura 1**) se localiza no Rio Paraná, a montante da cidade de Foz de Iguaçu e de Ciudad del Este (Paraguai). Sua construção se iniciou no ano de 1974 e as unidades geradoras de energia foram postas em operação a partir do ano de 1989. A Usina gera 18,9% da energia consumida no Brasil e 77,0% da consumida no Paraguai; trata-se de uma das maiores usinas hidrelétricas produtoras de energia do mundo.

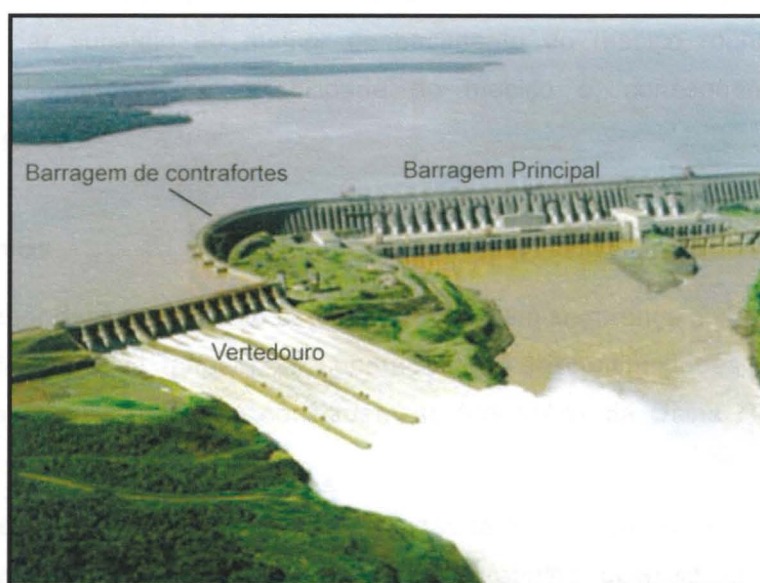


Figura 1 Imagem da barragem de Itaipu, com a localização da barragem principal, da barragem de contrafortes e do vertedouro, totalmente aberto. **Fonte:** Agência Nacional de Energia Elétrica, 2002.

A área das obras da Usina tem sua fundação constituída por derrames de rochas basálticas da Formação Serra Geral; formação esta que se estende desde a porção Meridional do Brasil até a Argentina. No local da barragem, afloram cinco desses derrames. Os derrames podem ser subdivididos em três camadas: camada superior (vesicular e/ou amigdalóide), núcleo denso com fraturamento predominantemente vertical e camada inferior com fraturamento horizontal, por vezes vesículo-amigdaloidal. O contato entre cada derrame é ondulado, com sedimentos preenchendo as irregularidades. Em termos estruturais, apresentam descontinuidades, podendo estas ser verticais – falhas, fraturas, diáclases – e horizontais – contato entre os derrames. Estas descontinuidades se apresentam como potenciais fontes de risco para a estabilidade da barragem visto que a percolação de água se dá preferencialmente pelas mesmas. A presença de água provoca tanto alteração do maciço rochoso como a diminuição da resistência ao cisalhamento do mesmo devido à tensão que a presença da água gera.

Ferramentas geoestatísticas vêm sendo amplamente utilizadas nas áreas de geotecnia e geologia de engenharia para a elaboração de zoneamentos geotécnicos, mapas de risco, bem como para a modelagem de fluxo de água subterrâneo. No caso em estudo, a krigagem ordinária e as equações multiquádricas foram utilizadas para estabelecer a partir

de dados de sondagens, interpretados como variáveis regionalizadas, as superfícies de descontinuidades presentes no maciço rochoso e a espessura das mesmas. Adicionalmente, o uso de ambos métodos permitiu realizar uma comparação entre os mesmos.

O Parque Tecnológico de Itaipu (PTI) abriga já o Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB). O estabelecimento dessas superfícies a partir da krigagem ordinária e de equações multiquádricas se manifesta, então, como mais instrumentos para dar subsídio ao melhor conhecimento do maciço rochoso, aspecto considerado muito importante na estabilidade do maciço e, conseqüentemente, na segurança da barragem.

3. Metas e Objetivos

Face ao melhor desenvolvimento do conhecimento em segurança de barragens, este trabalho de pesquisa objetiva mapear as superfícies de descontinuidades presentes no maciço rochoso basáltico no qual se constituem as fundações da Usina Hidrelétrica de Itaipu.

As superfícies de descontinuidade são definidas tanto por estruturas de fraturamento e distensão como pelos contatos entre derrames. Este trabalho focou-se na definição das superfícies determinadas pelos contatos entre os derrames, denominadas brechas.

Visou-se assim a definir a superfície topográfica de cada brecha e a respectiva espessura, com o objetivo de se determinar o comportamento espacial das mesmas na região de estudo e, posteriormente, tentar compreender o comportamento da água dentro do maciço rochoso.

4. Trabalhos Prévios

4.1 Aspectos Geológicos da Área de Estudo

O contexto geológico da Barragem de Itaipu é definido pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral, a qual se insere na Província Magmática do Paraná (PMP), dentro da bacia sedimentar intra-cratônica do Paraná (**figura 2**), estendendo-se por aproximadamente 1.200.000 km², entre Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina. Os derrames resultaram da intensa atividade magmática ocorrida no Cretáceo Inferior de lavas predominantemente basálticas (MARQUES & ERNESTO, 2004) em decorrência da ruptura do Gondwana, que teria reativado e gerado conjuntos de falhas permitindo o extravasamento de grandes volumes de rochas ígneas (MILANI, 2004). Tal província constitui uma das maiores e mais importante ocorrência de derrames continentais de basaltos do mundo (PICCIRILLO *et al.* 1988).

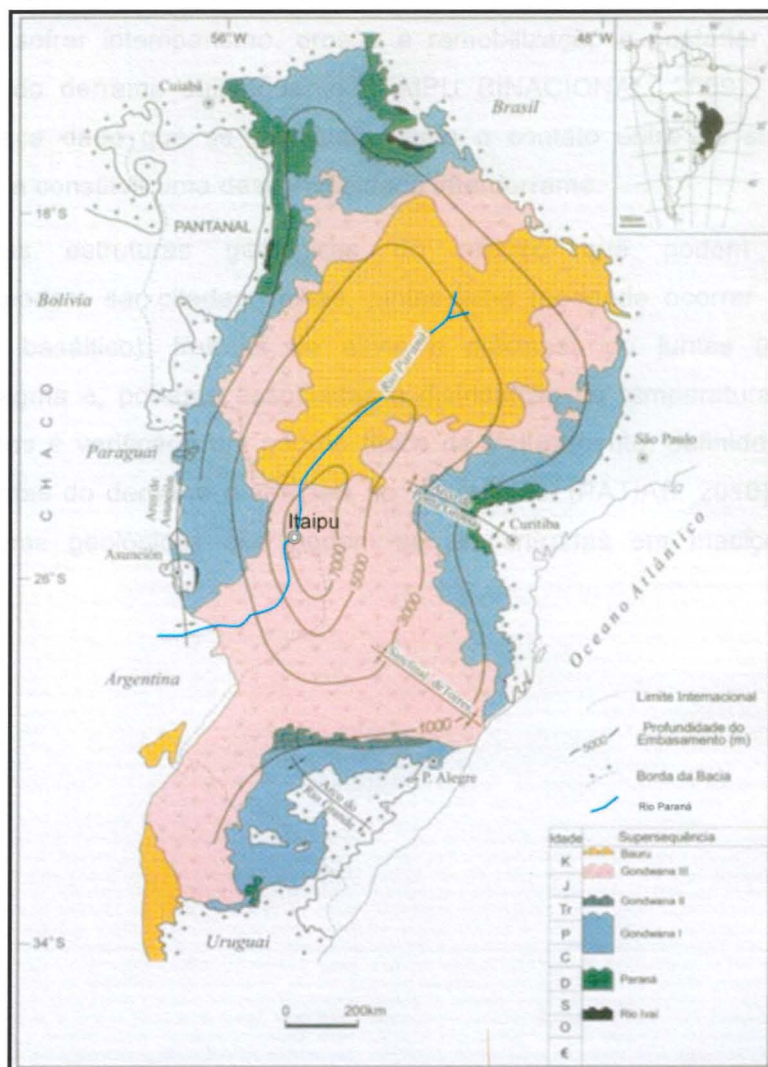


Figura 2 Localização da barragem de Itaipu dentro do contexto da Bacia do Paraná. **Fonte:** MILANI, 2004.

Os derrames recobrem os arenitos eólicos da Formação Botucatu na maior parte da Bacia do Paraná. Localmente, podem ser encontrados sobre sedimentos do Grupo Passa Dois ou sobre o embasamento cristalino, como ocorre em algumas regiões do Estado de Mato Grosso (PICCIRILLO *et al.* 1988). Os mesmos formam uma seqüência de espessura total variável, sendo que a média é de 650 m, com espessuras individuais em torno dos 10 a 80 m. Apresentam comportamento sub-horizontal, com mergulhos suaves, de no máximo 5°, em direção ao centro da bacia; localmente, podem apresentar mergulhos maiores em função da topografia do embasamento subjacente (MARQUES & ERNESTO, 2004). Milani (2004) situa os derrames basálticos da região da Usina de Itaipu na Superseqüência estratigráfica Gondwana III.

Cada derrame é dividido internamente em três camadas – basal, central e superficial – posteriormente melhor detalhadas. Entre a camada superficial de um derrame e a basal do derrame sobrejacente, existe um nível de brecha basáltica, resultante da sedimentação sobre superfícies irregulares de basalto de fragmentos de outras rochas, bem como do próprio basalto ao sofrer intemperismo, erosão e remobilização e posterior fundição do material pela lava do derrame subsequente (ITAIPU BINACIONAL, 2009). Esta porção brechóide se destaca dado que se manifesta como o contato entre as superfícies de derrame, passando a constituir uma descontinuidade interderrame.

Entre outras estruturas geológicas do maciço que podem representar descontinuidades, podem ser citadas: falhas, juntas-falha (podendo ocorrer em diversas partes do maciço basáltico), fraturas de alívio e diáclases ou juntas (geradas por resfriamento do magma e, portanto associadas à distribuição de temperatura). Ainda, no interior dos derrames é verificado um padrão típico de fraturamento, definido por fraturas horizontais nas bordas do derrame e verticais no seu núcleo. (PATIAS, 2010). A **tabela 1** resume as estruturas geológicas que podem ser encontradas em maciços rochosos basálticos.

Tabela 1 Estruturas geológicas dos maciços.

Estrutura Geológica	Descrição
Contato entre derrames	Fenda de abertura centimétrica de grande extensão lateral. Pode conter ou não material de preenchimento (em geral, argila). Nível principal de percolação de água.
Zona de basalto vesicular	Zona localizada, em geral, no topo dos derrames. Elevada porosidade vacuolar (fechada). Porosidade efetiva baixa.
Zona de basalto compacto/denso	Núcleo do derrame que ocupa em média 2/3 da espessura da camada. Quando o derrame é delgado, em geral, o diaclasamento é irregular. Quando a espessura aumenta, o diaclasamento passa a ter um padrão que resulta na formação de basalto colunar. As diáclases se apresentam, em geral, fechadas ou soldadas por material rígido. Esta zona se comporta como impermeável, em relação a outras estruturas que podem ocorrer no maciço.
Zona da base do derrame	Pode ser vesicular ou não. Apresenta fraturamento acentuado, paralelamente ao contato, podendo adquirir aspecto de laminação. Fraturas, em geral, soldadas por calcita.
Zona de brecha	Ocorre com maior frequência na zona do topo, subordinadamente, no núcleo do derrame. Forma bolsões ou lentes. Constituídas por fragmentos de basalto e natureza argilosa, calcária, siltítica. Quando alteradas apresentam caminhos preferenciais de percolação em canalículos que se distribuem irregularmente na zona.
Zonas fraturadas	Ocorrem com grande extensão lateral, com andamento sub-horizontal. O fraturamento destaca blocos de forma tabular os quais podem apresentar faces alteradas ou oxidadas ou constituir juntas-falha. Representam zonas de percolação preferencial.
Juntas-falha	Estruturas de similar importância aos contatos entre derrames. Ocorrem como uma falha de andamento sub-horizontal. A caixa de falha é constituída por fragmentos angulosos de basalto e matriz argilosa ou calcária. Constituem horizontes de percolação de água.

Fonte: adaptado de Oliveira *et al.* (1976 *apud* PATIAS, 2010).

A fundação da barragem de Itaipu é constituída por rochas basálticas da Formação Serra Geral divididas em cinco derrames de espessuras individuais variando entre 20 e 60 m e aos quais intercalam-se horizontes de brechas basálticas, estas de espessuras variando entre 1 e 20 m. Cada derrame na região da barragem é denominado, da base ao topo, derrames A, B, C, D e E (ITAIPU BINACIONAL, 2009). Durante a etapa de estudo de viabilidade da obra e de construção da barragem foram estudados detalhadamente para determinar o comportamento do maciço rochoso em função da construção da barragem. A **figura 3** mostra um perfil geológico esquemático dos derrames na barragem principal.

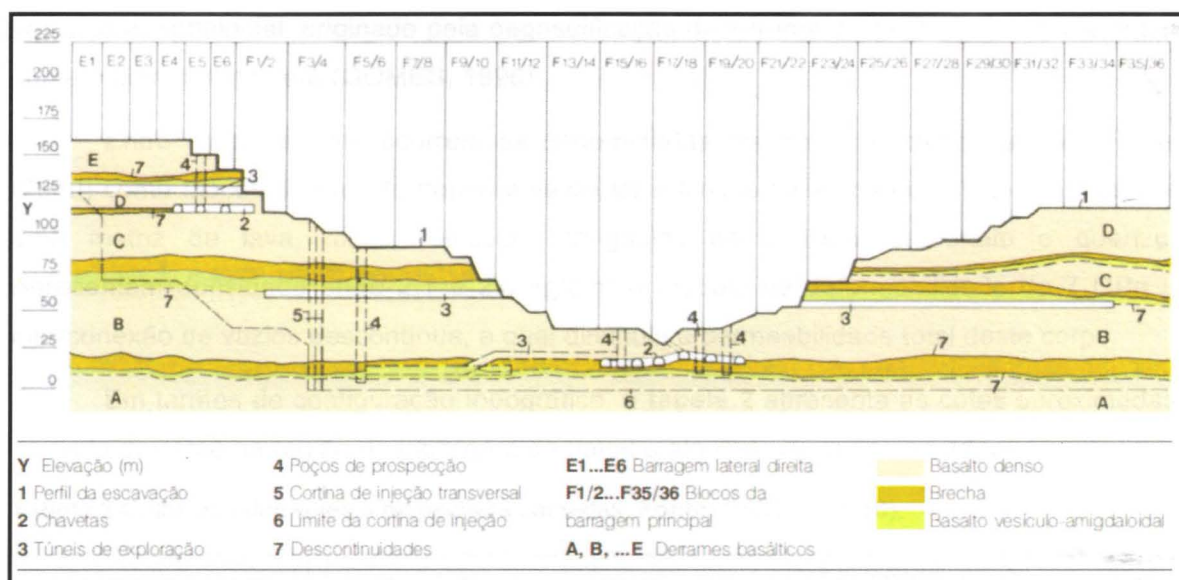


Figura 3 Seção Geológica na barragem principal. Fonte: Itaipu Binacional, 2009.

No tocante a morfologia dos derrames, Gomes (1996) divide os basaltos da Formação Serra Geral em dois tipos: derrames tipo I e derrames tipo II, em função da espessura e das texturas e estruturas presentes nos mesmos. Os derrames do tipo I têm espessura entre 15 e 35 metros, enquanto os do tipo II, entre 30 e 50 metros. No entanto, a compartimentação de ambos os tipos é semelhante, subdivididos em três porções – basal, central e superficial – determinadas pelas estruturas e texturas. A **figura 4** apresenta a compartimentação dos derrames basálticos.

A porção basal – vesículo-amigdaloidal – apresenta espessura centimétrica, variando de 40 a 100 cm de espessura, e alta ocorrência de vesículas cujo tamanho aumenta em direção ao topo. As vesículas podem se encontrar preenchidas por quartzo e calcita e podem atingir até 10 cm de diâmetro (GOMES, 1996). Segundo Patias (2010), na região da Barragem de Itaipu, esta porção dos derrames basálticos apresenta textura microcristalina, com vesículas e amígdalas, densidade entre 2,6 e 2,7 kg/cm³ e módulo de deformabilidade de 10 a 15 GPa.

A porção central possui a maior espessura e é caracterizada pelo fraturamento vertical do basalto denso, o qual no caso dos derrames tipo I resulta de fraturas irregulares e pouco pronunciadas, e no caso dos derrames tipo II apresenta um padrão típico de fraturas tipo colunas nos níveis inferior e superior e entablamento no nível intermediário. É comum, na porção superior, encontrar geodos de sílica na forma de ágata, calcedônia e ametista, bem como de zeólitas e calcita (GOMES, 1996). De acordo com Patias (2010), na área em estudo, esta porção é densa, com textura microcristalina, e apresenta elevada densidade (2,9 kg/cm³) e elevado módulo de deformabilidade (20 GPa).

Finalmente, a porção superficial é caracterizada por basalto denso, não vesicular, com intenso fraturamento horizontal recoberto por uma camada mais fina de basalto

vesículo-amigdaloidal, originado pela degaseificação decorrente do resfriamento da lava em contato com a atmosfera (GOMES, 1996).

Entre cada derrame ocorrem as denominadas brechas, caracterizadas por Patias (2010) como blocos de basalto denso e vesicular e blocos de arenito ou siltito envolvidos por uma matriz de lava, muito vesicular, amígdalas de zeólitas, carbonato e quartzo. Apresentam densidade entre 2,1 e 2,4 kg/cm³ e módulo de deformabilidade de 7 GPa e interconexão de vazios descontínua, a qual diminuiu a permeabilidade total deste corpo.

Em termos de configuração topográfica, a **tabela 2** apresenta as cotas aproximadas de cada derrame na região da barragem de Itaipu e algumas de suas camadas.

Tabela 2 Cotas dos derrames e respectivas camadas. **Fonte:** PATIAS (2010).

Derrame	Cota media de contato superior	Espessura	
		Camada de basalto denso	Zona de transição (b. Vesicular e brecha)
E	170	50	9-10
D	135	21-23	8-9
C	112	30-32	4-5
B	80	40	15-30
A	20	55	6-9

A **figura 4** apresenta um bloco diagrama com a disposição topográfica de cada derrame e suas camadas e a localização do Rio Paraná.

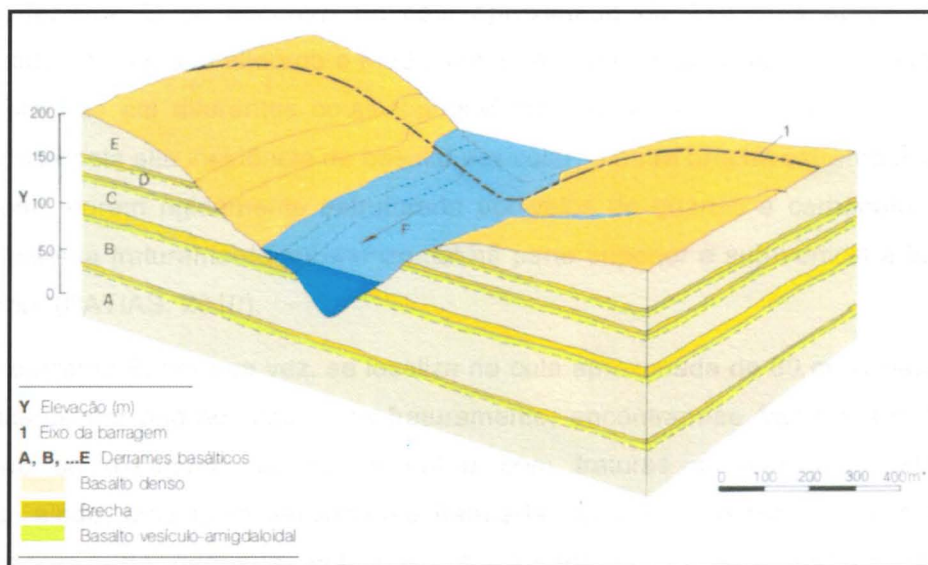


Figura 4 Bloco diagrama com os derrames presentes na área da barragem de Itaipu e suas respectivas camadas. **Fonte:** Itaipu Binacional, 2009.

O derrame E, localizado aproximadamente na cota 170 m, expõe apenas a camada densa, devido à erosão ter retirado o material das camadas subjacentes de basalto vesicular-amigdaloidal e de brecha. O basalto denso é caracterizado por fraturamento

vertical e sub-vertical. De modo geral, apresenta grau de consistência alto, grau de alteração baixo e grau de fraturamento médio. Existem zonas de fraqueza restritas, correspondentes a feixes de fraturas sub-horizontais e com parâmetros desfavoráveis de classificação geotécnica (muito alterada, pouco coerente e extremamente fraturada). Em termos de comportamento hidrológico, o basalto é impermeável e o fraturamento sub-vertical, por ser fechado, impede a recarga de aquíferos subjacentes (PATIAS, 2010). No tocante ao fraturamento vertical, foi realizado um estudo específico (IECO; ELC, 1978) com o intuito de determinar direções preferenciais e eventuais sistemas de fraturas. A partir dos resultados, observou-se ausência de uma direção preferencial de fraturas, com faixa de maior frequência (17%) das diáclases compreendida entre N10°W e N30°W.

O derrame D, localizado na cota 135 m, apresenta intercalações irregulares de basalto denso com fraturas em padrão hexagonal e basalto com fraturas de direção predominante NW, pouco extensas (BARBI, 1981). Quando exposto, desagrega rapidamente. O topo de basalto denso apresenta espessura entre 2 e 7 m e fraturas próximas entre si formadas pelo resfriamento rápido do magma em contato com o basalto vesicular. A camada de basalto denso, de espessura em torno de 9 a 16 m, ainda, se apresenta subdividida em três zonas secundárias: a zona superior (espessura de 3 m) apresenta diáclases moderadamente espaçadas; a zona intermediária de maior espessura é mais resistente e apresenta juntas de resfriamento; por último, a zona inferior apresenta juntas muito próximas entre si (PATIAS, 2010).

O derrame C se encontra na cota aproximada de 112 m e apresenta basalto caracterizado como muito alterado e medianamente a pouco consistente. Observam-se dois tipos de brechas em diferentes cotas topográficas. Encontram-se uma brecha resistente, porém porosa pela alta incidência de basalto vesicular, e outra brecha extremamente porosa e cavernosa, porém rigidamente estruturada por veios de quartzo e carbonato. O basalto denso apresenta fraturamento sub-horizontal na parte superior e sub-vertical a inclinado na parte inferior (PATIAS, 2010).

O derrame B, por sua vez, se localiza na cota aproximada de 80 m. O basalto denso não apresenta um padrão regular de fraturamento; encontram-se fraturas sub-horizontais curtas que se extinguem ao se encontrar com fraturas sub-verticais. Esta camada apresenta, ainda, uma faixa densamente fraturada, de 0,5 m de espessura, com fraturas entrecruzadas e de pequena inclinação. A camada de basalto vesicular-amigdaloidal apresenta vesículas revestidas de argila e amígdalas preenchidas por calcedônia no topo e na base. A camada brechóide tem espessura de 4 m e é resistente e muito porosa pela alta ocorrência de basalto vesicular. Na base deste derrame, ainda, encontra-se uma zona cisalhada que coincide com o leito do rio.

Por último, o derrame basal A apresenta uma camada de basalto denso muito fraturado, com fraturas curtas dispostas em feixes de 3 a 5 fraturas (IECO; ELC, 1977a). A camada de basalto vesicular-amigdaloidal apresenta uma porção apenas amigdaloidal na porção central. Ocorrem neste derrame também dois tipos de brecha. Na porção superior ocorre uma brecha altamente resistente e compacta, com fragmentos de basalto fortemente cimentados; na porção inferior a brecha encontrada é semelhante às encontradas nos derrames C e B e trata-se de uma brecha resistente e muito porosa pela alta ocorrência de basalto vesicular (PATIAS, 2010).

De acordo com Itaipu Binacional (2009), as principais descontinuidades da fundação são:

- Junta D;
- Contato dos derrames C e D;
- Área fraturada do derrame C;
- Junta B;
- Brecha B; e
- Junta A.

A Junta D é considerada a mais importante feição em termos de controle hidrológico. Elevadas perdas d'água específica e absorção de calda de cimento observadas em ensaios realizados durante a etapa de estudos geológicos denotaram a alta permeabilidade desta feição, a qual pode apresentar um espesso preenchimento de areno-argiloso (BARBI, 1981). Esta descontinuidade é a de maior extensão e se desenvolve desde o vertedouro até a barragem de enrocamento, atingindo aproximadamente 6 km e se localiza numa porção de basalto do derrame D com alto teor de argilas (montmorilonita), próximo da porção amigdaloidal (IECO; ELC, 1977d). É importante destacar que o alto teor de argilas resulta do grau de alteração ser caracterizado como alteração completa (PATIAS, 2010). De acordo com Barbi (1981), o pacote acima desta junta apresenta permeabilidade vertical pequena, atribuindo a alimentação da mesma a partir de jusante onde ela aflora. A descontinuidade D apresenta características geotécnicas diferentes em função da sua localização na barragem, sendo que na margem direita as mesmas são mais favoráveis, apresentando-se, de modo geral, como uma descontinuidade fechada; já, na margem esquerda, a feição pode variar, ora se apresentando como um contato rocha-rocha, ora como uma descontinuidade com abertura da ordem de 25 cm com preenchimento argiloso, sendo então uma feição semi-aberta a aberta (IECO; ELC; 1977d).

O contato entre os derrames C e D estabelece o caminho preferencial de água e se define ora como um contato rocha-rocha, ora brecha-rocha, quando ocorre a substituição do

basalto denso do derrame C por brecha (BARBI, 1981). De modo geral, o contato é aberto, irregular e pode apresentar infiltrações onde ocorre a brecha (IECO; ELC, 1977c; PATIAS, 2010).

A Junta B se localiza no basalto denso do derrame B, próximo ao basalto vesicular-amigdaloidal do mesmo derrame (PATIAS, 2010). Consiste num feixe de 10 a 20 fraturas sub-horizontais e subparalelas soldadas principalmente com sílica e subordinadamente com carbonato de cálcio e parcialmente abertas, e abrange uma faixa de aproximadamente 1 metro de espessura que se caracteriza por apresentar dureza menor em relação à rocha vizinha (IECO; ELC, 1977b). A feição apresenta-se muito a extremamente fraturada (ITAIPU BINACIONAL, 2009; PATIAS, 2010), com fraturas predominantemente fechadas em vista das perdas d'água baixas observadas durante os ensaios de viabilidade da obra. É importante destacar que o preenchimento silicoso apresenta fraca aderência no lado superior das fraturas em função da rugosidade da superfície, o que resulta numa diminuição de resistência à ruptura, e que a densidade das mesmas confere à rocha menor consistência, resultando numa faixa de fraqueza. (IECO; ELC, 1977b).

A brecha B, por sua vez, apresenta características geotécnicas diversas, como estrutura compacta, com pouca porosidade ou estrutura cavernosa, com vazios isolados dispostos aleatoriamente (ITAIPU BINACIONAL, 2009). Essas características geológicas influenciam diretamente na quantidade de água presente nesta camada. Barbi (1981) aponta esta brecha como sendo a mais desfavorável em termos de infiltração, com maiores infiltrações nas porções cavernosas.

Finalmente, a descontinuidade A, segundo Patias (2010) se localiza no basalto vesicular-amigdaloidal do derrame A, acima do basalto denso. Em termos de características geotécnicas, a rocha se apresenta alterada, de consistência média e grau de fraturamento baixo. A descontinuidade se apresentou fechada em sondagens realizadas na margem direita enquanto em sondagens da margem esquerda e da barragem principal se apresentou aberta, em vista das elevadas perdas d'água sob pressão e absorção de calda de cimento (IECO; ELC, 1977a). Especialmente, apresenta atitude semelhante à dos derrames, seguindo um mergulho médio de 2° para N-NE.

Alem as das descontinuidades constituídas pelas juntas e brechas, existe a zona cisalhada do derrame B, formada por quatro zonas de cisalhamento, a qual constituiu um aspecto muito importante durante os estudos de viabilidade da obra quanto à estabilidade da barragem principal e da casa de força (ITAIPU BINACIONAL, 2009). A **figura 5** ilustra a zona cisalhada.

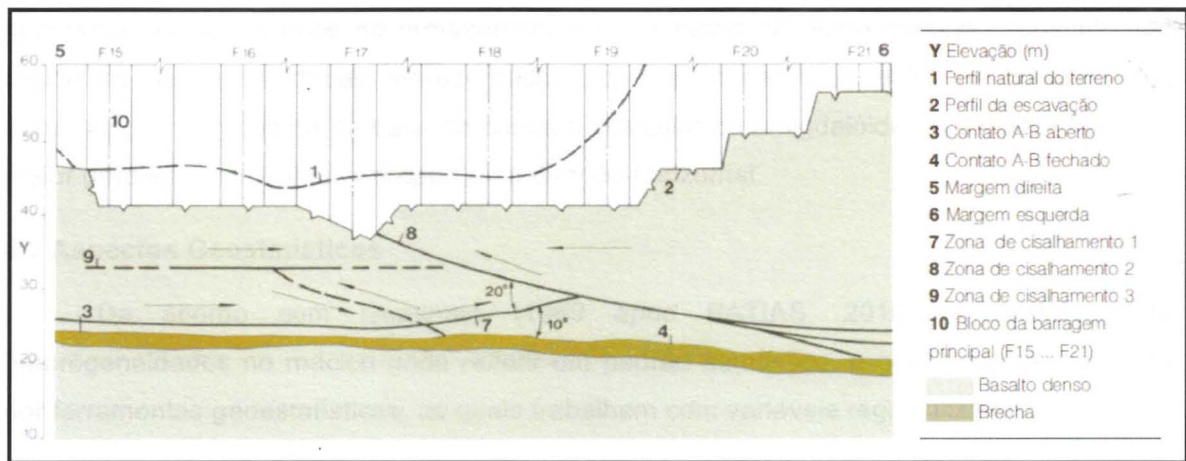


Figura 5 Zona cisalhada da base do derrame B. **Fonte:** Itaipu Binacional, 2009.

Paes de Barros & Guidicini (1981 *apud* Curti, 2011) denominaram esta zona “falha em bigode”, e a descreveram como uma complexa zona de cisalhamento definida por planos de falhas conjugadas abaixo do leito do rio, de extensão de até centenas de metros, grande continuidade lateral e comportamento espacial complexo. Sua origem teria sido resultante do alívio de tensões residuais tectônicas regionais gerado durante a descompressão devido à erosão do leito do rio. Segundo estes autores, o aumento de pressão horizontal na camada de basalto no leito do rio provocaria o arqueamento e a geração de uma zona de cisalhamento conjugada com movimentação de falha de empurrão sob o leito do rio

De modo geral, maciços basálticos apresentam gradientes hidráulicos em função da presença das discontinuidades anteriormente comentadas. Em obras de engenharia de grande porte, como no caso da Barragem de Itaipu, é extremamente importante o conhecimento do comportamento hidráulico dentro do maciço dado que este condiciona os projetos de vedação e drenagem das fundações (PATIAS, 2010).

De acordo com Patias (2010), a recarga de água dos maciços basálticos se dá pela relação de precipitações e evaporação. Para a região específica da Barragem de Itaipu, o clima úmido sem estação seca permite garantir infiltrações durante praticamente o ano inteiro; ainda, o clima de temperaturas não muito elevadas, garante uma evaporação limitada. A infiltração de água permite a formação de aquíferos subterrâneos alocados nas discontinuidades. No entanto, a presença de água pode provocar intensas alterações e lixiviação de alguns níveis em função da constituição dos mesmos, notadamente nas brechas basálticas, as quais tendem a ser mais facilmente intemperizadas, erodidas e lixiviadas. A alteração intempérica de alguns níveis pode comprometer a estabilidade das fundações.

O sistema de discontinuidades dos maciços basálticos garante uma boa circulação de água dentro dos mesmos, porém por não apresentar um grau de porosidade alto não

apresenta condições boas de armazenamento. Destacam-se neste contexto específico da região as descontinuidades representadas por planos paralelos entre os contatos dos derrames, nas brechas e na base da camada vesicular ou amigdalóide do basalto. Assim, o maior gradiente hidráulico verificado é na direção horizontal.

4.3 Aspectos Geostatísticos

De acordo com Goodman (1989 *apud* PATIAS, 2010), a presença de heterogeneidades no maciço pode refletir um padrão estatístico, o qual pode ser avaliado por ferramentas geoestatísticas, as quais trabalham com variáveis regionalizadas.

As variáveis regionalizadas têm o diferencial de representar valores de variáveis referenciadas regionalmente (YAMAMOTO, 2001). Assim, para cada local de amostragem é associado um par de coordenadas geográficas. Ainda, variáveis regionalizadas apresentam aparente continuidade no espaço, isto é, apresentam valores muito próximos em dois pontos vizinhos e valores cada vez mais diferentes à medida que os pontos se distanciam. (LANDIM, 1998). Além de localização e continuidade, as variáveis regionalizadas apresentam outras características qualitativas que métodos estatísticos convencionais não detectam: o suporte (unidade amostral sobre a qual a variável é medida) e anisotropia (variações graduais numa direção e rápidas ou irregulares em outra) (YAMAMOTO, 2001).

4.3.1 Krigagem Ordinária

Entre as ferramentas que se destacam no estudo das variáveis regionalizadas encontram-se a função variograma e a krigagem.

A função variograma descreve quantitativamente a variação no espaço de um fenômeno regionalizado (HUIJBREGTS, 1975 *apud* YAMAMOTO, 2001). Desta maneira, a função atribui uma relação matemática para o comportamento da variável regionalizada. Tal relação matemática é definida como “a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados por uma distância h ” (YAMAMOTO, 2001), cuja expressão matemática é mostrada na **equação 1**:

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \quad \text{Equação 1}$$

A **equação 1** pode ainda ser definida em termos computacionais, conforme a **equação 2**.

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad \text{Equação 2}$$

onde $2\gamma(h)$ é a função variograma, n é o número de pares separados por uma distância h , $Z(x)$ é o valor da variável regionalizada no local x e $Z(x+h)$ é o valor da variável regionalizada no local $(x+h)$.

A função $\gamma(h)$ é a função semivariograma, que nada mais é do que metade da função variograma. Adota-se neste trabalho o termo “função variograma” para $\gamma(h)$, conforme sugerido por Yamamoto (2001).

A função variograma é representada sob a forma de um gráfico: o variograma (**figura 6**), no qual podem ser observadas as propriedades do mesmo, enunciadas a seguir (YAMAMOTO, 1994):

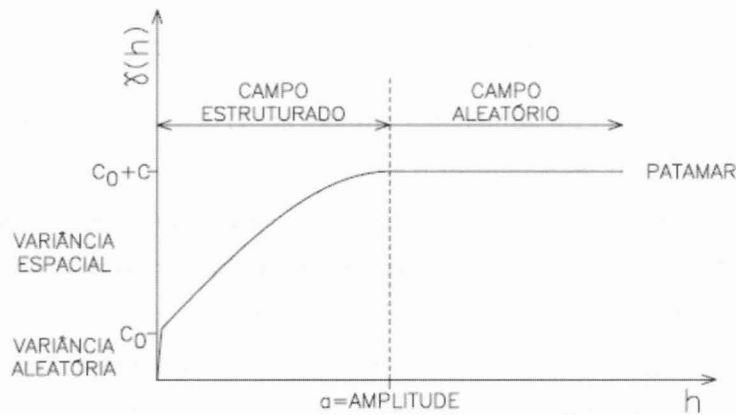


Figura 6 Ilustração mostrando um variograma e suas propriedades (YAMAMOTO, 1994).

- Amplitude (a): distância a partir da qual as amostras passam a ter um comportamento independente; separa o campo estruturado do aleatório;
- Patamar: valor de variância no qual o variograma se estabiliza;
- Efeito pepita (C_0): valor da função no ponto de origem ($h=0$);
- Variância espacial: diferença entre a variância *a priori* e o efeito pepita.

Os variogramas podem ser calculados em diferentes direções espaciais para uma mesma variável, a fim de serem verificadas eventuais variações em alguma direção específica, isto é, verificar a existência de anisotropia.

Existem três tipos de anisotropia, ilustrados na **figura 7**: a anisotropia geométrica (a), zonal (b) e mista (c).

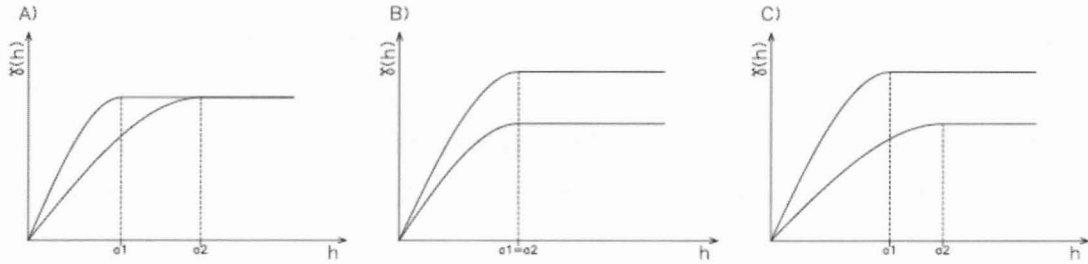


Figura 7 Possíveis tipos de anisotropia: geométrica (A), zonal (B) e mista (C). Fonte: YAMAMOTO, 1994.

Segundo Yamamoto (2001), os valores calculados da função variograma através do variograma são utilizados posteriormente para a organização do sistema de equações da krigagem. É necessário, então, que seja ajustado um variograma teórico ao variograma experimental, dado que os variogramas experimentais mostram certa dispersão de pontos quando a distância aumenta e o número de pares diminui, dificultando a interpolação de valores. Esse ajuste permite a descrição contínua da variabilidade ou correlação espacial presente nos dados. Dentre os modelos teóricos de variograma, os mais usuais são o exponencial (**equação 3**), o gaussiano (**equação 4**) e o esférico (**equação 5**).

$$\text{Exponencial: } \gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)\right) \right] \quad \text{Equação 3}$$

$$\text{Gaussiano: } \gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right] \quad \text{Equação 4}$$

$$\text{Esférico: } \gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2}\left(\frac{h}{a}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3 \right] \text{ para } h < a \quad \text{Equação 5}$$

A krigagem é uma família de processos de estimativa de valores de variáveis regionalizadas a partir da interpolação de valores adjacentes enquanto estes apresentem correlação espacial; é um método que procura minimizar a variância estimada. O método utiliza o semivariograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados aos valores que serão estimados (ponto, área ou volume). Além dos valores estimados, é calculado o erro associado à estimativa (LANDIM, 1998).

Especificamente, o método de krigagem ordinária se diferencia dos outros métodos de estimativa por krigagem (simples e da média) por não ser necessário o conhecimento da média em todo o domínio. Assim, a krigagem ordinária permite a estimativa de um valor desconhecido $Z^*(x_0)$ associado a um ponto conforme a **equação 6** (YAMAMOTO, 2001):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad \text{Equação 6}$$

onde $\sum \lambda$ é a soma dos ponderadores obtidos por sistemas lineares de equações (sistemas de equações de krigagem); cada valor do ponderador representa a probabilidade condicional do ponto de dado.

De acordo com Yamamoto (1994), o sistema de equações lineares da krigagem ordinária pode ser escrito em função do variograma, conforma a **equação 7**.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_j \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_0 - x_i) \quad \text{para } i=1,n \\ \sum_j \lambda_j = 1 \end{array} \right. \quad \text{Equação 7}$$

Embora o método seja amplamente utilizado para avaliação de depósitos minerais, este vem sendo utilizado para a análise geotécnica a partir de parâmetros geotécnicos obtidos em sondagens. Patias (2010) utiliza o método para estabelecer zoneamentos de RQD no maciço rochoso da região da Barragem de Itaipu. Koike & Matsuda (2005) destacam que muitos métodos geoestatísticos, dentre esses a krigagem ordinária, podem ser utilizados para a elaboração de perfis em subsuperfície que ilustram a distribuição de atributos geológicos, tanto de horizontes de diversas litologias como de presença de descontinuidades.

Tais perfis são construídos a partir de informações obtidas por sondagens, as quais incluem parâmetros geotécnicos do subsolo, características físicas da rocha presente, nível d'água, entre outros. As informações geológicas e geotécnicas de sondagens provêm de locais distribuídos irregularmente, tanto na direção vertical como na direção horizontal, sendo então necessário para a modelagem espacial um método de interpolação que leve em consideração a localização de cada amostra e que permita revelar as estruturas presentes em subsuperfície (KOIKE *et al.*, 1996; KOIKE *et al.*, 2001; KOIKE & MATSUDA, 2005). Assim, a krigagem ordinária é um método que permite essa modelagem a partir da construção de superfícies curvas que se aproximam dos pontos de amostragem. (KOIKE *et al.*, 1996).

A elaboração de semivariogramas permite observar eventuais correlações espaciais e anisotropias dos parâmetros geotécnicos de maciços rochosos, e, ainda, obter – no caso de ser possível a avaliação geoestatística por krigagem ordinária – os pesos das variáveis necessários para tal avaliação (KOIKE *et al.*, 2001).

4.3.2 Equações Multiquádricas

Equações multiquádricas são a base de um método de interpolação global, que deriva de funções de base radial e permite a aproximação de superfícies irregulares através da soma uma grande variedade de superfícies de formas quádricas (YAMAMOTO, 2002). Hardy (1971 *apud* YAMAMOTO, 2002) sugeriu o uso de equações multiquádricas para a

representação de terrenos a partir de dados pontuais discretos; assim, permite uma interpolação global a partir de dados locais.

De acordo com Beatson & Newsam (1992 *apud* YAMAMOTO, 2002), funções de base radial com centro em (x_1, x_2, \dots, x_n) são representadas pela **equação 8**:

$$F^*(x_0) = \sum_{i=1}^n c_i \times \phi(x_i - x_0) \quad \text{Equação 8}$$

onde n é o número de pontos da vizinhança, c_i é o coeficiente atribuído ao i -ésimo ponto de dado e ϕ é a função de base radial.

Alguns autores (MICCHELLI, 1986; MADYCH, 1992 *apud* YAMAMOTO, 1992) sugerem a adição de uma constante a_0 (**equação 9**) sob a condição definida pela **equação 10**.

$$F^*(x_0) = \sum_{i=1}^n c_i \times \phi(x_i - x_0) + a_0 \quad \text{Equação 9}$$

$$\sum_{i=1}^{n'} c_i = 0 \quad \text{Equação 10}$$

A adição da constante melhora a precisão da base radial, especialmente quando o número de nós da vizinhança é pequeno. Em comparação com a krigagem ordinária, este termo equivale à média local (YAMAMOTO, 2002).

Conforme descrito por Kansa (1990) e Beatson & Newsam (1992) (*apud* YAMAMOTO, 2002), existem diversas opções de funções radiais, descritas a seguir nas **equações 11 a 15**, onde $|x|$ representa um vetor no espaço vetorial R^n e c é uma constante positiva:

Equação linear: $\phi(x) = |x|$ **Equação 11**

Equação cúbica: $\phi(x) = |x|^3$ **Equação 12**

Equação multiquádrica generalizada:

$$\phi(x) = \left(c + |x^2| \right)^{\frac{(2k+1)}{2}}, \text{ para } k = -1, 0, \dots \quad \text{Equação 13}$$

Splines: $\phi(x) = |x|^2 \log|x|$ **Equação 14**

Gaussiana: $\phi(x) = \exp(-c|x|^2)$ **Equação 15**

Yamamoto (2002) demonstrou matematicamente que a função de base radial, através da função radial básica multiquádrica, é equivalente a krigagem ordinária, a partir do sistema de equações lineares apresentado na **equação 16**

$$\begin{cases} \sum_j w_j \phi(x_j - x_i) + \mu = \phi(x_0 - x_i) & \text{para } i = 1, n \\ \sum_j w_j = 1 \end{cases}$$

Equação 16

Comparando o sistema de equações ilustrado pela **equação 16** com o sistema de equações da krigagem ordinária (**equação 7**) observa-se a semelhança entre ambos. Yamamoto (2002) concluiu que as equações multiquádricas constituem uma ferramenta alternativa adequada para estimativas globais, especialmente em casos onde variogramas experimentais não podem ser ajustados para o uso de krigagem ordinária. Enquanto na krigagem ordinária o variograma descreve a correlação espacial entre amostras, nas equações multiquádricas, a função de base radial cumpre esse papel (Patias, 2010).

5. Materiais e Métodos

O procedimento de definição das superfícies de descontinuidade divide-se em uma etapa de levantamento de dados, outra de organização e formatação dos dados levantados e outra de tratamento geoestatístico por *software* específico dos mesmos.

5.1 Levantamento de dados

Os dados utilizados provêm de sondagens rotativas realizadas durante o estudo de aproveitamento hidrelétrico da usina. Estas sondagens se encontram no acervo da usina, no formato físico. Graças aos trabalhos de Patias (2010) a descrição dos testemunhos foi digitalizada e transcrita para tabelas no formato *Excel* facilitando o acesso às informações. Encontram-se no acervo um total de 398 sondagens rotativas, sendo 257 da região da barragem central, 97 do vertedouro e 44 da barragem de contrafortes.

Cada descrição do furo de sondagem apresenta as informações correspondentes de intervalo de cada litotipo, coordenadas de localização, cota inicial do furo, profundidade total, direção e inclinação do furo e observações pertinentes a respeito dos intervalos. A modo de facilitar o tratamento dos dados, o CEASB atribui a cada litotipo um código, como pode ser observado na **figura 8**, a qual ilustra uma tabela.

Código da Sondagem	Coordenadas X e Y		Cota inicial	Profundidade total do furo	Direção	Ângulo com a vertical
RL1R022042231	743085,79	7187940,08	173,66	125,10	0	90
0,00	11,00	32	Argila			
11,00	15,70	34	Saprolito			
15,70	17,00	4	Derrame E – Vesículo-amigdaloidal			
17,00	52,25	2	Derrame E – Denso – Medianamente fraturado			
52,25	53,20	5	Brecha ED			
53,20	58,00	9	Derrame D – Vesículo-amigdaloidal			
58,00	73,80	7	Derrame D – Denso – Medianamente fraturado			
73,80	76,70	10	Brecha DC			
76,70	83,00	14	Derrame C – Vesículo-amigdaloidal			
83,00	103,40	12	Derrame C – Denso – Medianamente fraturado			
103,40	110,60	15	Brecha CB			
110,60	121,80	19	Derrame B – Vesículo-amigdaloidal			
121,80	125,10	17	Derrame B – Denso – Medianamente fraturado			
Intervalo "de" em metros.	Intervalo "para" em metros.	Código de litotipo atribuído no CEASB.	Litotipo			

Figura 8 Tabela de descrição de sondagem no formato *Excel*.

5.2 Organização e formatação de dados

Antes de se proceder à formatação dos dados para posterior análise geoestatística, elaborou-se um mapa de localização das sondagens baseado nas coordenadas X e Y de cada uma. Assim, obteve-se o mapa ilustrado na **figura 9**.

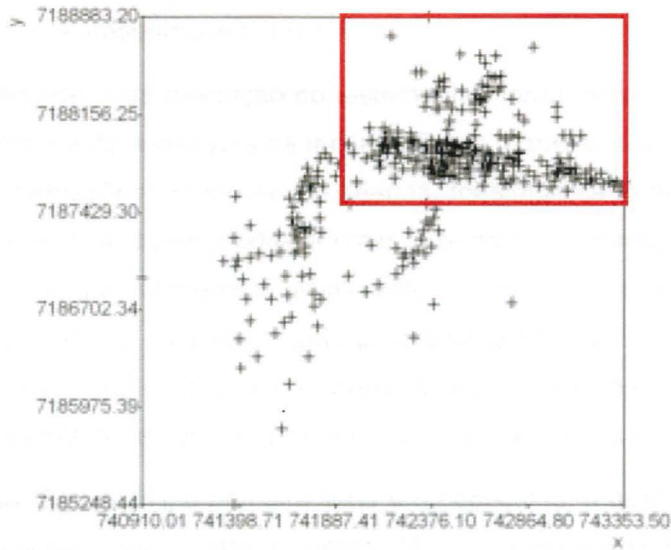


Figura 9 Mapa de pontos gerais da barragem principal, barragem de contrafortes e vertedouro.

Observa-se no mapa que a distribuição das sondagens é bastante irregular e assim não se dispõem numa malha regular e que, ainda, há locais onde a densidade de sondagens é maior que em outros, como o local determinado pelo polígono vermelho, local que corresponde à barragem principal. Assim, para um melhor tratamento de dados, delimitou-se essa área como área de estudo. A área de estudo pode ser observada com melhor detalhe na **figura 10**.

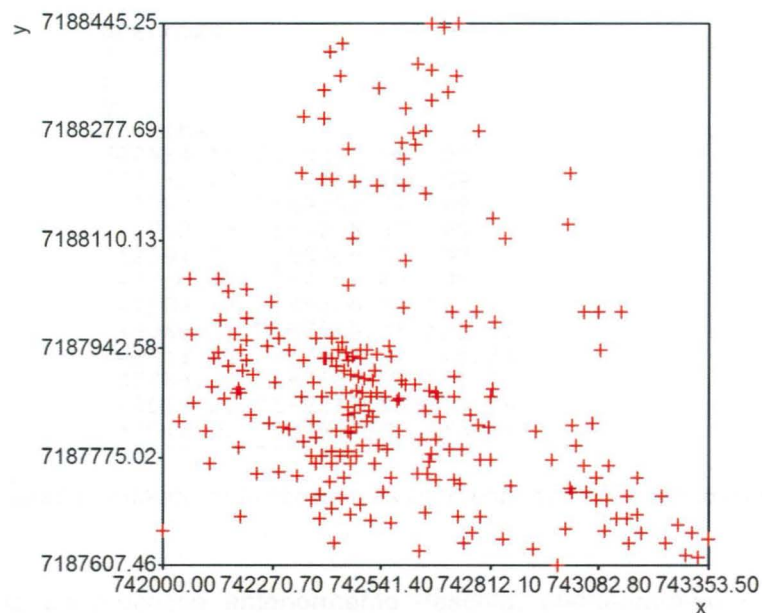


Figura 10 Localização de sondagens na área de estudo.

Delimitada, então, a área de estudo, procedeu-se à formatação dos dados. Tendo em vista que o objetivo principal do trabalho é mapear superfícies de descontinuidade entre

os derrames, os intervalos de interesse no estudo correspondem aos contatos entre os mesmos, sendo estes representados pelas brechas.

Assim, a partir de cada descrição do testemunho, foram retiradas as informações de cota do topo da brecha e de espessura da mesma. Desta maneira, o arquivo inicial *Excel*, no qual constam as informações anteriormente citadas, foi simplificado para uma tabela onde constam as informações de coordenadas e cotas e outra onde constam as coordenadas e espessuras de cada brecha. O arquivo, inicialmente gerado como tabela *Excel* foi exportado para o formato “.txt”, formato este aceito pelo programa Geovisual. Assim, todas as tabelas das sondagens, como a apresentada na **figura 8**, foram desmembradas resultando em quatro tabelas, uma para cada cota de derrame, como a mostrada a seguir, na **figura 11**.

Nesta tabela (**figura 11**), a primeira linha é o cabeçalho, o qual informa a brecha em estudo, a segunda linha, onde consta o número “3”, se refere à quantidade de variáveis a serem consideradas. As linhas subseqüentes descrevem cada variável, sendo a primeira, a coordenada “x”; a segunda, a coordenada “y”; a terceira, a coordenada “zbrecha”, isto é, a cota do topo da brecha. Cada variável é então disposta em uma coluna. É importante destacar que à variável não encontrada atribui-se o valor “-99”.

Assim, a 6º linha da **figura 11** se refere a uma sondagem, cujas coordenadas são 742534,16 (x) e 7188343,98 (y) e que não encontra a brecha ED. Já, a 12º linha se refere a uma sondagem com coordenadas x e y iguais a 742782,17 e 7188276,92 respectivamente e que encontra a brecha ED na cota 117,96 metros.

BrechaED		
3		
x		
y		
zbrecha		
742534.16	7188343.98	-99
742732.28	7188443.10	-99
742417.10	7188202.77	-99
742652.38	7188278.30	-99
742594.15	7188006.52	-99
742380.67	7187763.63	-99
742782.17	7188276.92	117.96
743086.79	7187940.08	121.41
742752.71	7187977.52	124.84
742788.37	7187683.92	131.22
743013.20	7188213.15	113.09
743046.97	7187997.82	116.83

Figura 11 Tabela de entrada de dados onde constam as coordenadas de cada sondagem e a cota da brecha em estudo

Analogamente ao processo anteriormente descrito, elaboraram-se outras quatro tabelas, onde constam as informações de espessura de cada brecha em cada sondagem. As espessuras foram obtidas subtraindo-se da cota do topo da brecha, a cota de base da mesma.

A **figura 12** ilustra a tabela de espessuras. Neste caso, também tem-se três variáveis, que correspondem às coordenadas “x”, “y” e à espessura da brecha. Assim, a 6º linha se refere à sondagem cuja coordenada x é 742534,16 e a coordenada y é 7188343,98 e que não apresenta espessura para esta brecha, ou seja, a brecha inexistente nesta sondagem. Já na 11º linha observa-se a sondagem de coordenadas 742782,17 e 7188276,92 e que apresenta uma espessura de 1,40 metros da brecha ED.

espED	x	y	espED
742534.16	7188343.98	-99	
742320.12	7188477.86	-99	
742732.28	7188443.10	-99	
742652.38	7188278.30	-99	
742380.67	7187763.63	-99	
742782.17	7188276.92	1.4	
743086.79	7187940.08	0.95	
742891.67	7188654.07	2	
742752.71	7187977.52	3.59	
742788.37	7187683.92	2.25	
742784.18	7186759.66	0.25	

Figura 12 Arquivo de entrada de espessuras das brechas em cada sondagem.

5.3 Tratamento Geoestatístico

O tratamento geoestatístico foi realizado no *software* Geovisual 4.0. Este *software* permite realizar análise estatística dos dados, variogramas experimentais, ajuste teórico de variograma, validação cruzada e interpolação por diversos métodos. A **figura 13** mostra a interface do programa com suas respectivas ferramentas.

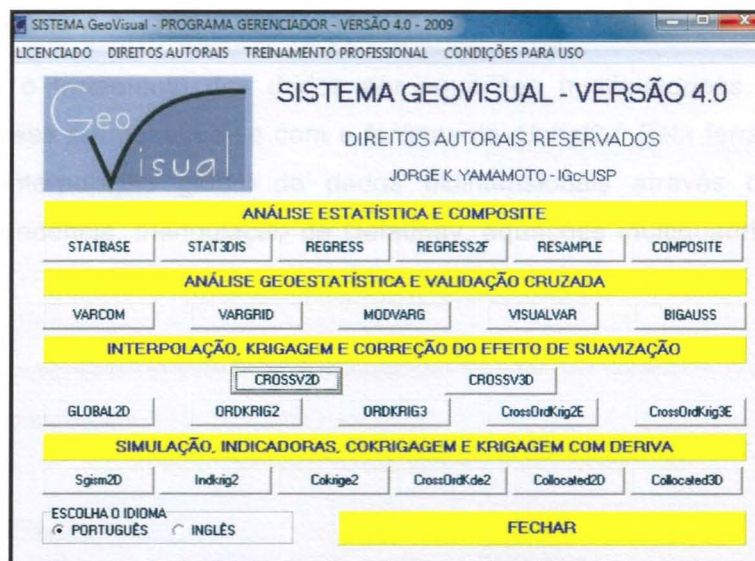


Figura 13 Interface do Geovisual com suas ferramentas.

As etapas seguidas para o tratamento dos dados por krigagem ordinária seguem o procedimento detalhado e enumerado a seguir:

1. Ferramenta *statbase*: esta ferramenta procede à análise estatística dos dados. A partir do arquivo de entrada, calcula valor mínimo, valor máximo, número de dados utilizados, média, mediana, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, entre outros. A realização da análise estatística é de suma importância, pois permite conhecer os dados com os quais se está trabalhando e detectar eventuais erros na base de dados.

2. Ferramenta *varcom*: permite elaborar o variograma experimental a partir dos dados. Para tanto é necessário estabelecer as direções de pesquisa, número e tamanho de passos.

3. Ferramenta *modvarg*: utilizada para ajustar um modelo teórico ao variograma experimental anteriormente obtido. Nesta etapa do processamento de dados é necessário definir os parâmetros do variograma, sendo estes: efeito pepita, direção (azimute), mergulho, plunge, variância espacial, amplitudes mínima, máxima e vertical e o modelo teórico de variograma (esférico, exponencial, gaussiano ou pepita puro) a partir do qual será feito o ajuste.

4. Ferramenta *crossv2d*: esta ferramenta permite realizar a validação cruzada de dados bidimensionais para aferir o ajuste do variograma teórico com o experimental e definir os parâmetros de vizinhança, isto é, número de pontos por setor, máximo e mínimo de pontos por bloco e distância máxima entre pontos. Ainda, permite verificar valores superestimados e subestimados.

5. Ferramenta *ordkrig2*: ferramenta de métodos de interpolação para dados bidimensionais, nos quais se inclui a krigagem ordinária. A krigagem ordinária é realizada a partir do modelo de blocos, da vizinhança, das condições e dos parâmetros estabelecidos nas etapas anteriores e da determinação de uma fronteira convexa.

Já, para o tratamento dos dados por equações multiquádricas, inicia-se com a ferramenta *statbase* e prossegue-se com a ferramenta *global2d*. Esta ferramenta permite a realização de interpolação global de dados bidimensionais através dos métodos de superfícies de tendência, triangulação de Delaunay, equações multiquádricas e inverso da distância.

6. Desenvolvimento do Trabalho

Encontram-se detalhadas neste item as atividades definidas para o desenvolvimento do trabalho.

O desenvolvimento do trabalho seguiu o cronograma estabelecido no Projeto Inicial, apresentado no **Quadro 1**.

Atividade	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.
Revisão Bibliográfica									
Visita Itaipu									
Levantamento de dados									
Análise de dados									
Integração dados									
Elaboração relatório									

Quadro 1 Atividades mensais previstas para o desenvolvimento do trabalho. Os quadrados laranja hachurados correspondem a atividades planejadas, porém não cumpridas no prazo estipulado e os verdes, a datas não previstas até as quais se estenderam as atividades.

- Revisão bibliográfica: esta atividade se realizou ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho, como previsto;
- Visita Itaipu: a primeira visita foi realizada com o intuito de apresentar o projeto ao Centro de Estudos de Segurança em Barragens e verificar a viabilidade de execução do mesmo. A segunda visita, prevista para o mês de maio e realizada em junho teve o objetivo de levantar os dados necessários. O atraso em um mês desta etapa não implicou em alterações expressivas no andamento do projeto.
- Levantamento de dados: programado para o período de abril a junho, foi realizado apenas no mês de junho, durante a segunda visita à Itaipu.
- Análise de dados: esta etapa foi iniciada um mês depois do previsto e se estendeu até meados de outubro. O atraso não implicou em alterações no projeto.
- Integração de dados: realizada nos meses de setembro e outubro, consistiu em relacionar os resultados obtidos de espessuras e cotas das superfícies de descontinuidade entre si, bem como compará-los com eventuais dados da literatura.
- Elaboração de relatório: todos os relatórios foram entregues nas datas previstas, sem atrasos.

7. Resultados Obtidos

Para a interpolação das superfícies, como anteriormente descrito, foi necessário seguir as etapas de análise estatística, elaboração de variograma experimental, ajuste do mesmo a um variograma teórico, validação de dados e finalmente, interpolação dos mesmos.

7.1 Interpolação de cotas topográficas

A **figura 14** apresenta os histogramas obtidos com a ferramenta *statbase* para estudo das estatísticas básicas dos dados de cada superfície. A **tabela 3** apresenta os valores das estatísticas descritivas.

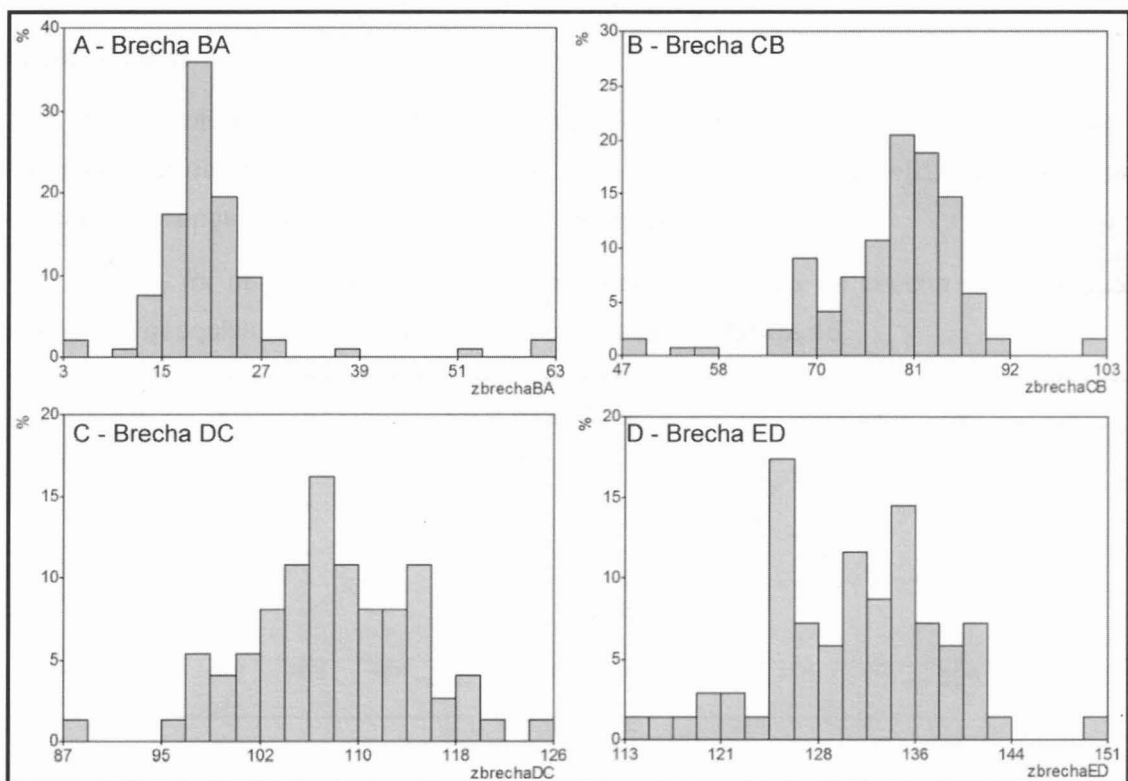


Figura 14 Histogramas de distribuição de freqüência de cotas para as brechas BA (A), CB (B), DC (C) e ED (D).

A **figura 14** permite reconhecer a distribuição de freqüência de valores de cotas das superfícies. Observa-se, então, que nas brechas BA e CB a distribuição dos dados é assimétrica, sendo que a superfície BA apresenta uma freqüência notadamente maior de valores entre a cota 15 m e 24 m (aproximadamente, 60% dos dados) semelhantemente a superfície CB, que apresenta maior freqüência de valores entre a cota 78 m e a cota 88 m (aproximadamente, 75% dos dados). As superfícies DC e ED apresentam distribuições que tendem a ser mais simétricas.

Tabela 3 Estatísticas descritivas dos dados.

Brecha	Nº dados	Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desv. Padrão	Coef. Variação
BA	92	3,110	62,850	20,849	68,720	8,290	0,398
CB	122	47,220	103,170	78,461	65,580	8,098	0,103
DC	74	86,690	126,090	108,197	43,609	6,604	0,061
ED	69	113,090	151,140	131,147	47,802	6,914	0,053

A análise da **tabela 3** permite verificar que as brechas BA e CB apresentam valores de variância próximos entre si e consideravelmente maiores que as brechas DC e ED. Ainda, essas brechas apresentam uma diferença marcante entre os valores de mínimo e máximo. Estes dados são importantes porque indicam uma grande dispersão de valores em relação à média.

No tocante a confecção de variogramas, inicialmente, foi proposta a elaboração de variogramas a partir de quatro direções de pesquisa horizontais: 0°, 45°, 90° e 135° para verificar a presença de anisotropia em pares de direções ortogonais.

Assim, foi obtido um variograma para cada superfície de brecha com as quatro direções de pesquisa, os quais podem ser observados na **figura 15**.

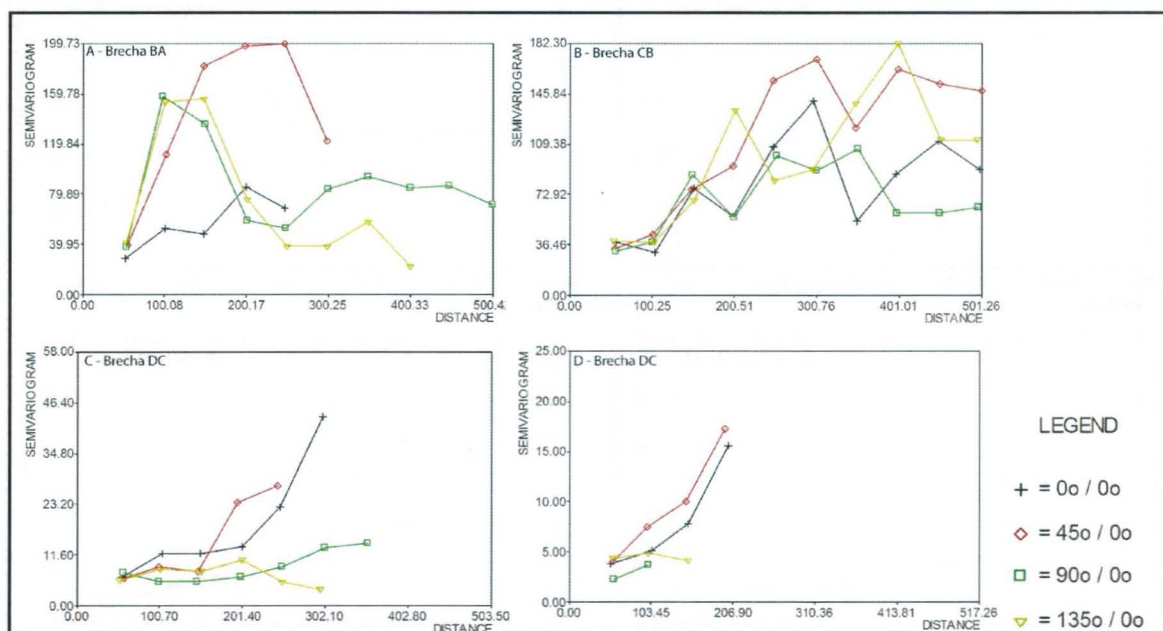


Figura 15 Variogramas experimentais para cada superfície topográfica de brecha. A - Brecha BA, B - Brecha CB, D - Brecha DC, E - Brecha ED.

Os variogramas experimentais referentes às brechas ED e DC (**figuras 15C e 15D**) não permitiram a identificação de anisotropia em nenhum par de direções ortogonais. Já, os variogramas das brechas CB e BA (**figuras 145A e 15B**) apresentaram no par de direções 45° e 135° um comportamento distinto quando comparadas entre si. Assim, estes

variogramas foram recalculados para essas direções, resultando nos variogramas da **figura 16**.

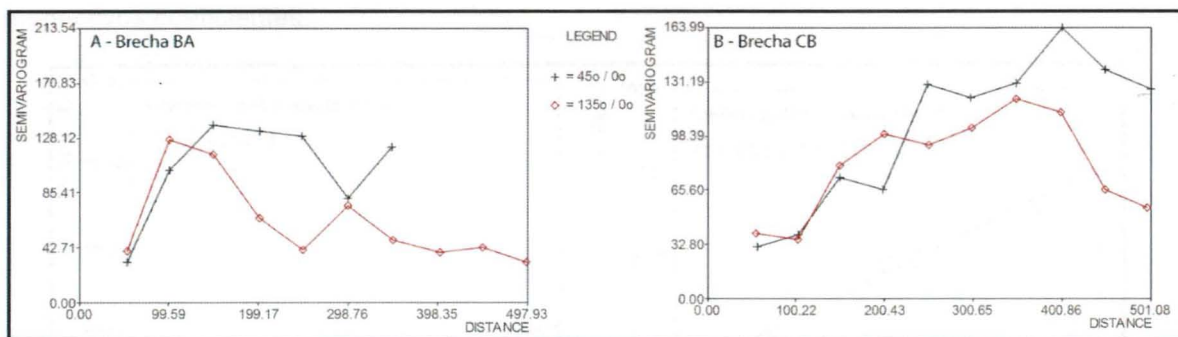


Figura 16 Variogramas experimentais calculados para duas direções das brechas BA (A) e CB (B).

No entanto, estes variogramas recalculados não apresentaram dados consistentes quanto à eventual anisotropia presente em tais direções. Assim, tendo em vista um melhor tratamento dos dados, procedeu-se à elaboração de variogramas omnidirecionais, considerando que ao não ter sido observada anisotropia, a superfície passa a ser levada em conta como um meio isotrópico, isto é, a variável – no caso, a cota – apresenta o mesmo comportamento em todas as direções. Os variogramas omnidirecionais, com seus respectivos ajustes podem ser observados na **figura 17**.

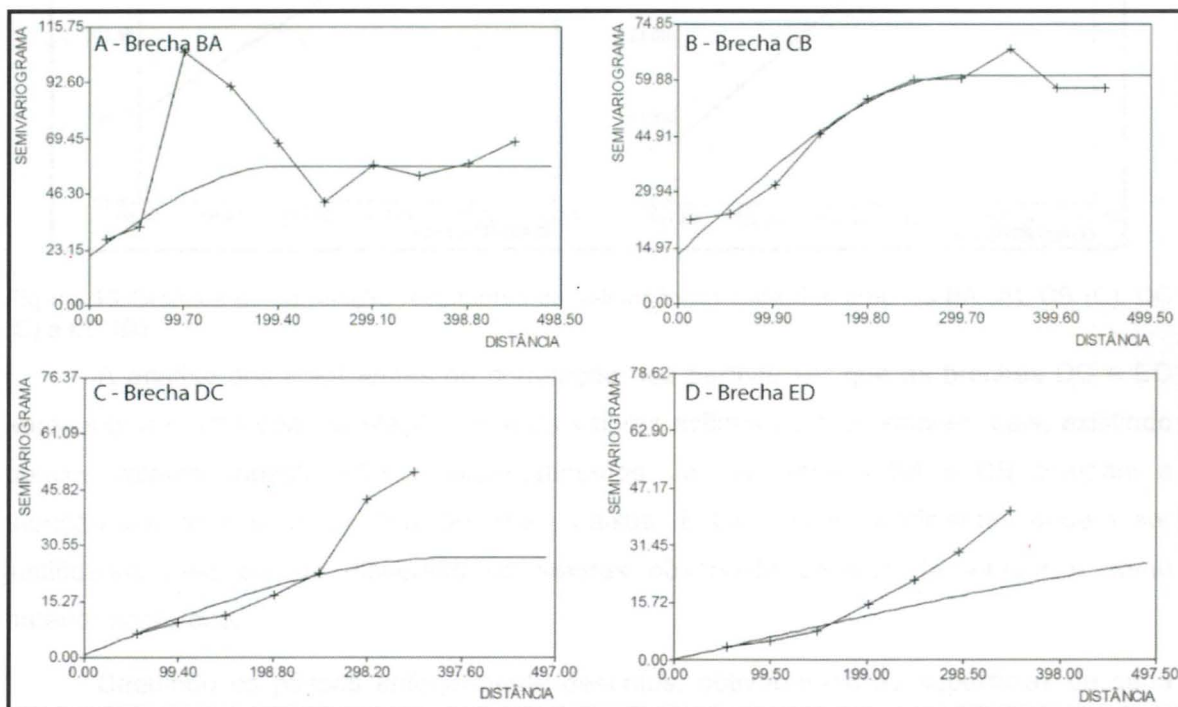


Figura 17 Variogramas omnidirecionais ajustados para as superfícies das brechas BA (A), CB (B), DC (C) e ED (D).

Após o ajuste dos variogramas, procedeu-se à validação cruzada. A validação pode ser observada na **figura 18** onde constam os gráficos de correlação dos dados, com seus respectivos coeficientes.

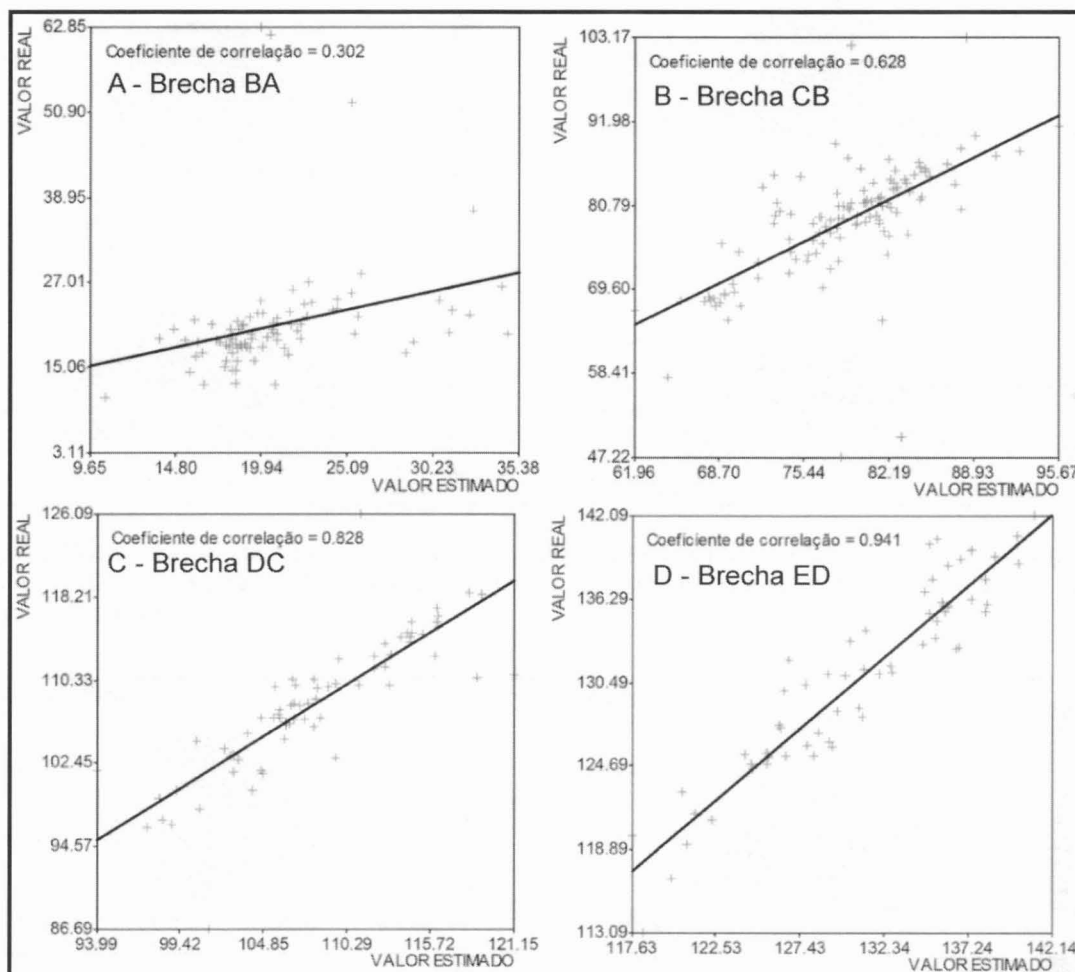


Figura 18 Gráficos de correlação resultantes da validação cruzada das brechas BA (A), CB (C), DC (C) e ED (D).

A análise dos coeficientes de correlação nos permite ver que as brechas DC e ED apresentaram uma boa correlação entre os valores estimados e os valores reais, existindo poucos valores subestimados e superestimados. Já, as brechas BA e CB chamam a atenção por apresentar coeficientes mais baixos. Estes baixos coeficientes podem ser justificados pela própria dispersão de valores observada através da variância, como anteriormente dito.

Seguindo os passos anteriormente descritos, obtiveram-se as superfícies de cada cota, ilustradas na **figura 19**, interpoladas pelo método da Krigagem Ordinária. Optou-se para todas as interpolações um tamanho de célula quadrada de 25 metros de lado.

A modo de comparação, utilizou-se o método de Equações Multiquádricas para definir as mesmas superfícies. Como anteriormente citado este método dispensa o uso de

variogramas. Assim, procedeu-se diretamente ao uso da ferramenta *global2D*. As superfícies obtidas podem ser observadas na **figura 20**.

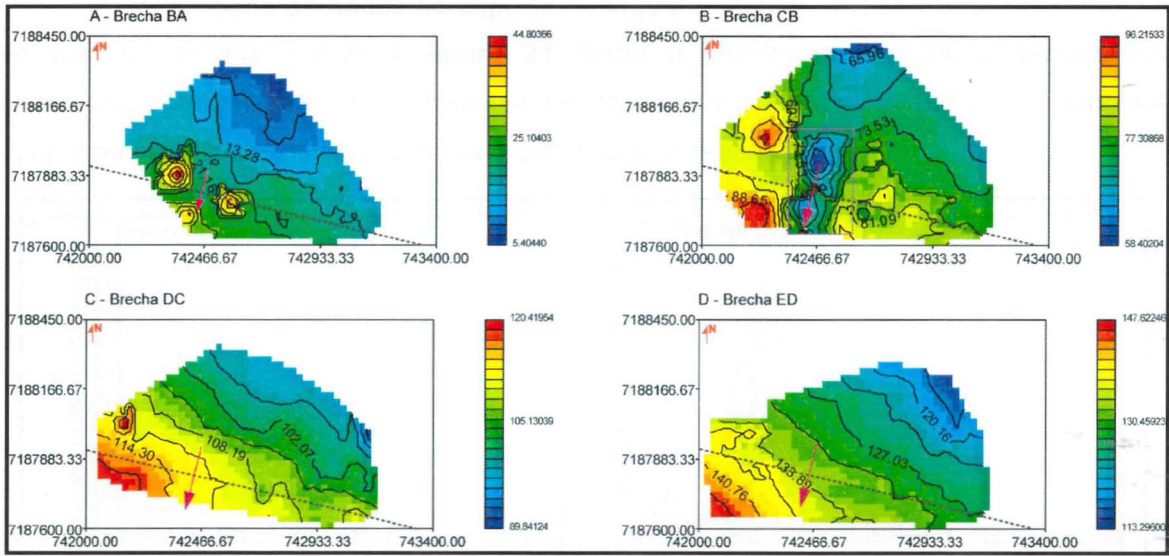


Figura 19 Superfícies de cota obtidas por Krigagem Ordinária para as brechas BA (A), CB (B), DC (C) e ED (D). A linha tracejada indica a localização aproximada do eixo da barragem e a seta rosa, o fluxo do Rio Paraná.

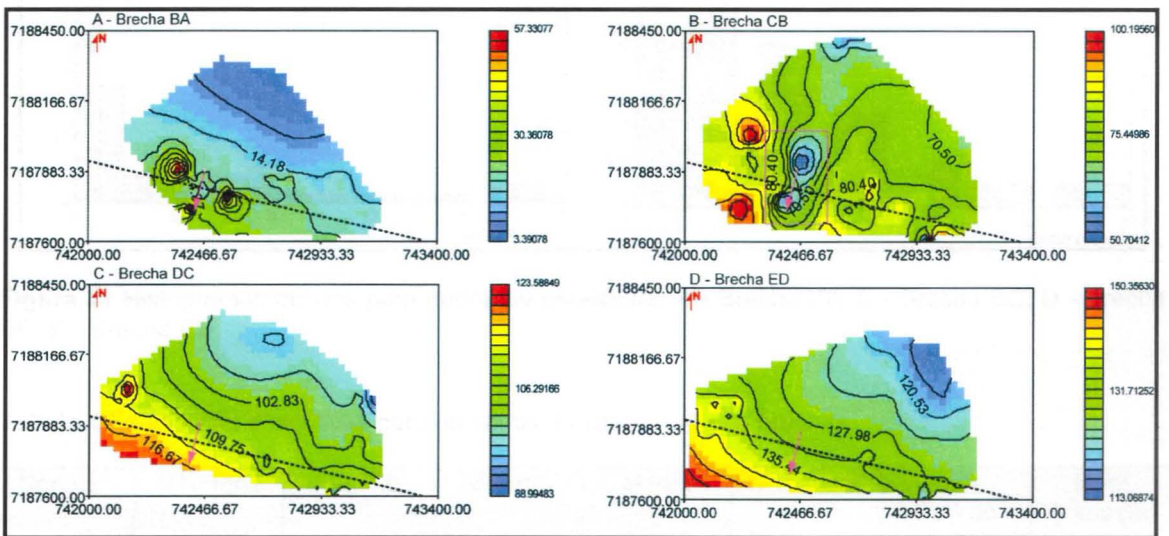


Figura 20 Superfícies de cota obtidas por Equações Multiquádras para as brechas BA (A), CB (B), DC (C) e ED (D). A linha tracejada indica a localização aproximada do eixo da barragem e a seta rosa, o fluxo do Rio Paraná.

7.2 Interpolação de espessuras

A interpolação de dados de espessura seguiu a mesma seqüência que a de dados de cota topográfica. Assim, a **figura 21** ilustra a distribuição de dados através dos histogramas obtidos para cada espessura de brecha com a ferramenta *statbase*. A **tabela 4** mostra as estatísticas obtidas para cada espessura de brecha.

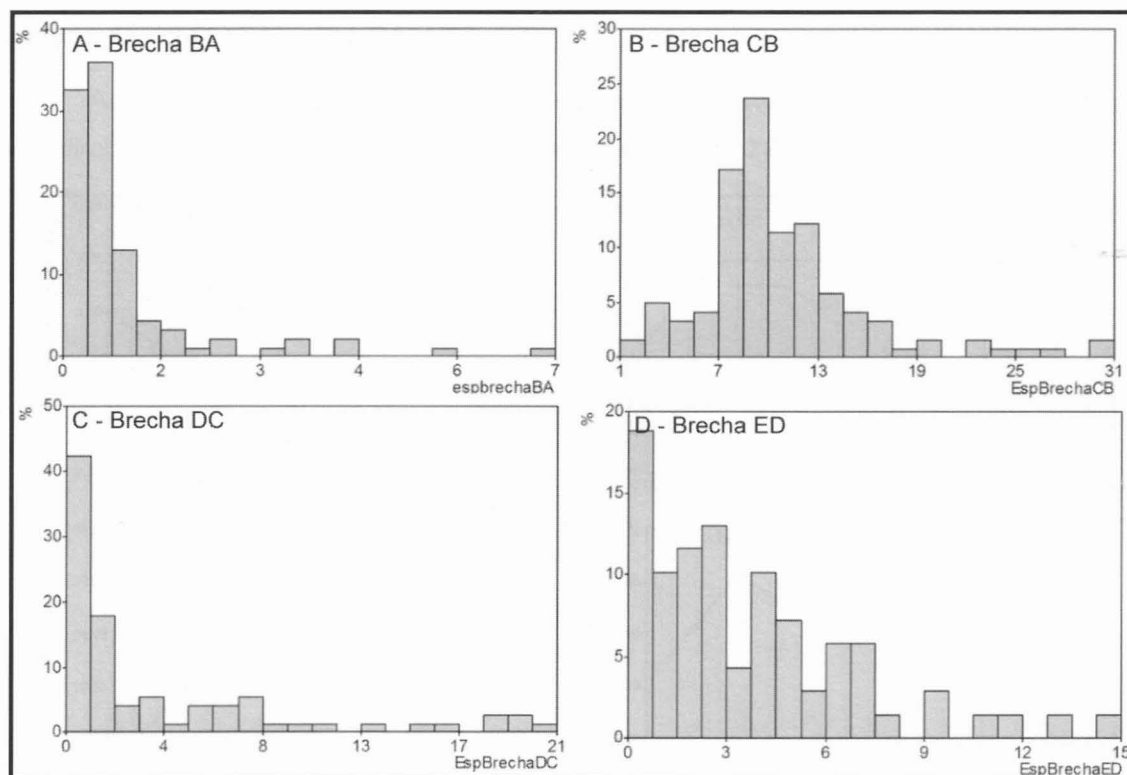


Figura 21 Histogramas obtidos para dados de espessura. A - Brecha BA, B - Brecha BC, D - Brecha DC, E - Brecha ED.

Tabela 4 Estatísticas descritivas para os dados de espessura das brechas.

Brecha	Nº dados	Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desv. Padrão	Coef. Variação
BA	92	0,090	7,300	0,963	1,395	1,181	1,227
CB	122	0,500	30,900	10,416	27,628	5,256	0,505
DC	73	0,100	20,800	4,152	30,300	5,505	1,326
ED	69	0,300	15,000	3,994	10,046	3,170	0,794

A partir da análise da **figura 21** e da **tabela 4**, identifica-se uma distribuição assimétrica de espessuras em todas as brechas. No caso da brecha BA, predominam espessuras inferiores a 2 metros (75% dos dados), com uma média de 0,963 metros de espessura. No caso da brecha CB, predominam valores entre 7 e 13 metros, sendo a média de 10,416 metros. A brecha DC apresenta maior freqüência de espessura na faixa de até 2 metros, com valores médios de 4,152 metros. Finalmente, a brecha ED apresenta

aproximadamente 50% dos valores até 3 metros de espessura, com espessura média de 3,994 metros.

A **tabela 4** nos permite observar que todas as brechas apresentam uma grande amplitude entres os valores mínimos e máximos, principalmente as brechas CB e DC, cujos valores variam de centenas de centímetros a dezenas de metros. Estas brechas, ainda apresentam valores de variância e desvio padrão consideravelmente maiores quando comparadas com as brechas BA e ED.

Após a análise estatística, procedeu-se a elaboração e ajuste de variogramas omnidirecionais, os quais podem ser observados na **figura 22**.

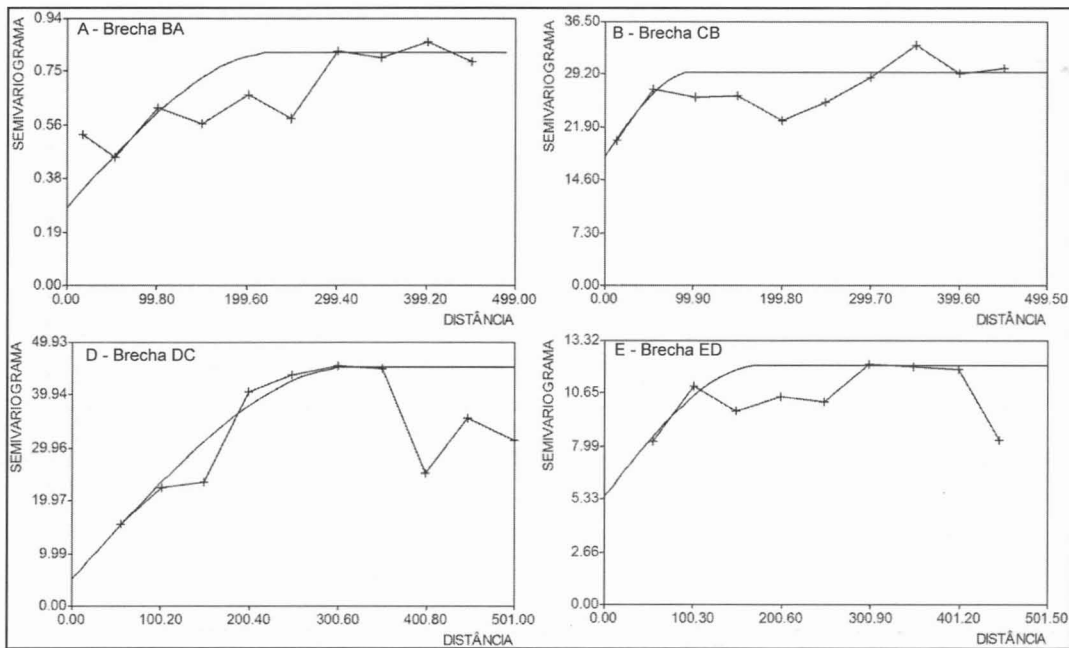


Figura 22 Variogramas omnidirecionais calculados e ajustados para cada espessura das brechas BA (A), CB (B), DC (C) e ED (D).

Dando continuidade ao procedimento, utilizando a ferramenta *crossv2d*, realizou-se a validação cruzada dos dados estimados. A **figura 23** apresenta os gráficos de validação cruzada para cada espessura de brecha.

Os gráficos de validação cruzada obtidos para a espessura de cada brecha mostram baixíssimos coeficientes de correlação para os dados das brechas BA, CB e ED; para esta última, inclusive, o coeficiente de correlação resultante é negativo. No caso da brecha DC, o coeficiente é um pouco mais alto que para as outras brechas. Esses resultados obtidos indicam que os dados apresentam pouca ou nenhuma correlação espacial. Assim, julgou-se necessário o uso de outra ferramenta de interpolação: as equações multiquádricas. A escolha baseou-se no fato de que estas dispensam o uso do variograma, ajustando uma única superfície global aos dados.

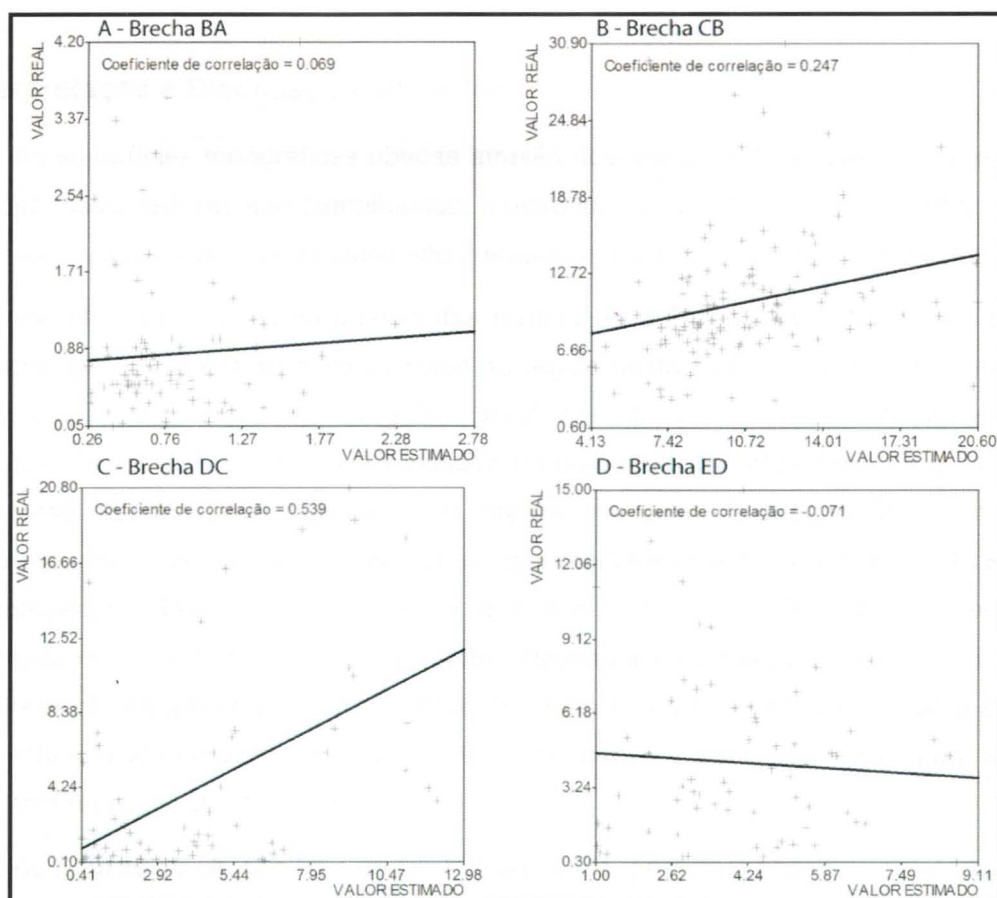


Figura 23 Validação cruzada dos dados estimados para cada espessura das brechas BA (A), CB (B), DC (C) e ED (E).

Dessa maneira, procedeu-se ao uso da ferramenta *global2d*; as superfícies obtidas podem ser visualizadas na **figura 24**.

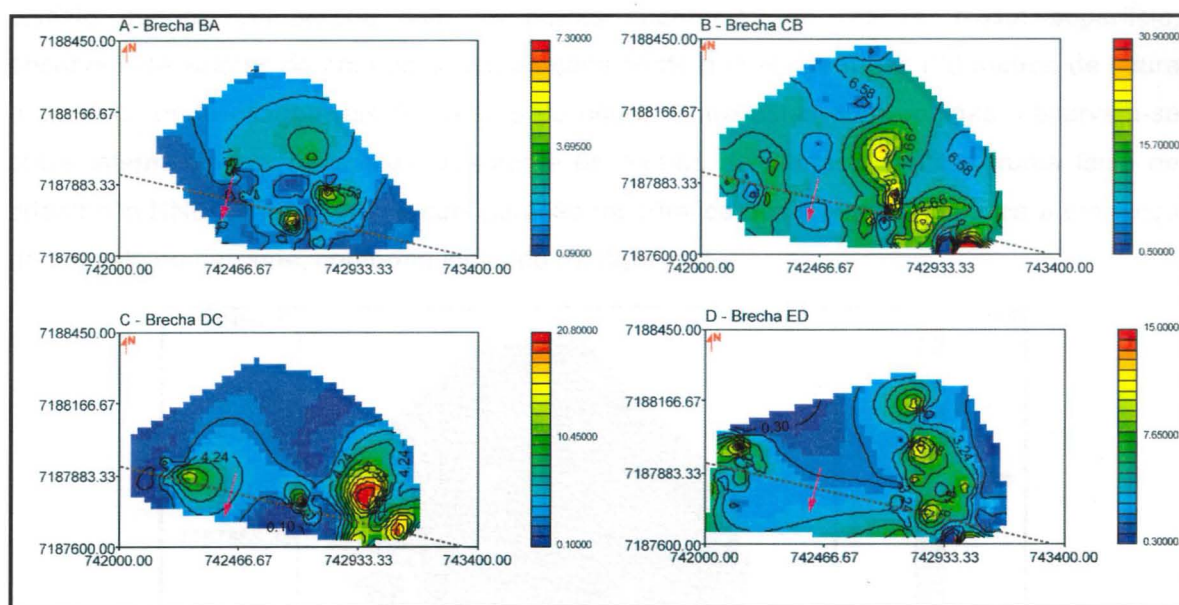


Figura 24 Espessura de brechas obtidas por Equações Multiquádricas para as brechas BA (A), CB (B), DC (C) e ED (D). A linha tracejada indica a localização aproximada do eixo da barragem e a seta rosa, o fluxo do Rio Paraná.

8. Interpretação e Discussão dos Dados

As superfícies topográficas obtidas através dos métodos de krigagem ordinária e de equações multiquádricas são semelhantes, mostrando, conforme Yamamoto (2002) já tinha demonstrado, que ambos os métodos são adequados para este tipo de interpolação.

Identifica-se, através da análise das **figuras 19 e 20** uma tendência geral entre as superfícies BA, DC e ED de maiores cotas na região oeste-sudoeste e menores, na região leste-nordeste, sugerindo um mergulho geral dos derrames para norte-nordeste. Os resultados obtidos para a brecha BA indicam o predomínio de cotas entre 15 e 24 metros, tendo como média, aproximadamente 21 metros. No caso da brecha CB, observam-se valores predominantes entre 78 e 88 metros, cuja média é 78 metros. A brecha DC, por sua vez, apresenta valores médios ao redor dos 108 metros e a ED, valores médios de, aproximadamente, 131 metros. Os resultados obtidos para as quatro brechas se aproximam dos valores observados na literatura (**tabela 2**), onde é possível verificar que para a brecha BA foi estabelecida uma cota média de 20 metros, para a CB, de 80 metros, para a DC de 112 metros e para a ED, de 135 metros.

As **figuras 19 (A, C e D) e 20 (A, C e D)**, ainda, permitem observar que as variações de cotas nos derrames BA, DC e ED são homogêneas e graduais, isto é, não se verificam quedas ou elevações abruptas do terreno que poderiam refletir bolsões ou morros em subsuperfície.

A superfície CB (**figuras 19B e 20B**) apresenta um comportamento notadamente distinto quando comparada com as outras superfícies de brecha. Nesta superfície, observam-se valores de cota altos nas porções oeste que atingem até 100 metros de altura e sudeste, onde atingem até 80 metros de altura. Entre estas duas regiões, observam-se cotas intermediárias, de aproximadamente 65 metros de altura, dispostas numa faixa de orientação NNE-SSW. Assim, a configuração topográfica desta superfície indica a presença de um vale no derrame, conforme indicado na **figura 25**.

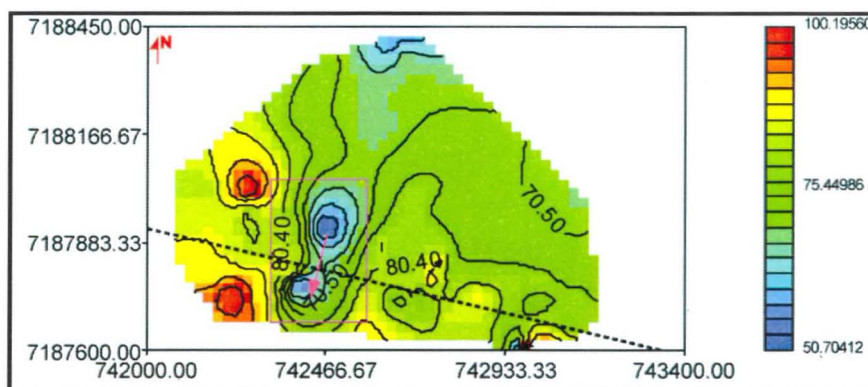


Figura 24 Brecha CB com detalhe na região reconhecida com um vale (polígono vermelho). A linha tracejada indica a localização aproximada do eixo da barragem e a seta rosa, o fluxo do Rio Paraná.

A margem a oeste deste vale apresenta cotas maiores, de até 100 metros, que a margem direita, na qual as cotas atingem até 80 metros de altura. A feição observada neste derrame parece refletir o comportamento da chamada “falha em bigode” (Paes de Barros & Guidicini *apud* CURTI, 2011), ilustrada na **figura 5**, gerada a partir do alívio de tensões durante a erosão do leito do rio, com geração de arqueamentos e falhas de empurrão. Como anteriormente citado, a falha em bigode é constituída por um conjunto de falhas conjugadas com sinais de deslocamento inversos. Assim, a margem à esquerda do vale, que equivale à margem esquerda da barragem, de maiores cotas, corresponde ao bloco que cavalga por cima do plano de falha da zona de cisalhamento 2, ilustrada na **figura 5**.

No tocante ao mergulho geral dos derrames, informações presentes na literatura indicam comportamento sub-horizontal das camadas, com mergulho suave em direção ao centro da bacia. Considerando a localização da área de estudo no contexto da Bacia do Paraná (**figura 2**), o mergulho seria então definido com direção preferencial para nordeste. Os resultados obtidos neste trabalho se aproximam aos dados da literatura.

A respeito do comportamento da água em subsuperfície, considerando que as camadas de brecha mergulham para norte-nordeste, a tendência seria inferir um fluxo na mesma direção. Porém deve ser considerado que o Rio Paraná, maior receptor de águas da região, corre para sul. Assim, uma aproximação baseada apenas nos mergulhos das camadas não parece ser suficiente para estabelecer o fluxo preferencial d'água em subsuperfície na área em estudo.

No tocante às espessuras obtidas para cada brecha, as **figuras 26, 27, 28 e 29** apresentam a comparação entre espessura e superfície topográfica. No caso da brecha BA (**figura 26**), observa-se que, de modo geral, espessuras menores correspondem a cotas mais elevadas e espessuras maiores, a cotas menos elevadas. Predominam espessuras de até, aproximadamente, 3,7 metros de espessuras; porém, em locais pontuais, as espessuras podem atingir 7 metros.

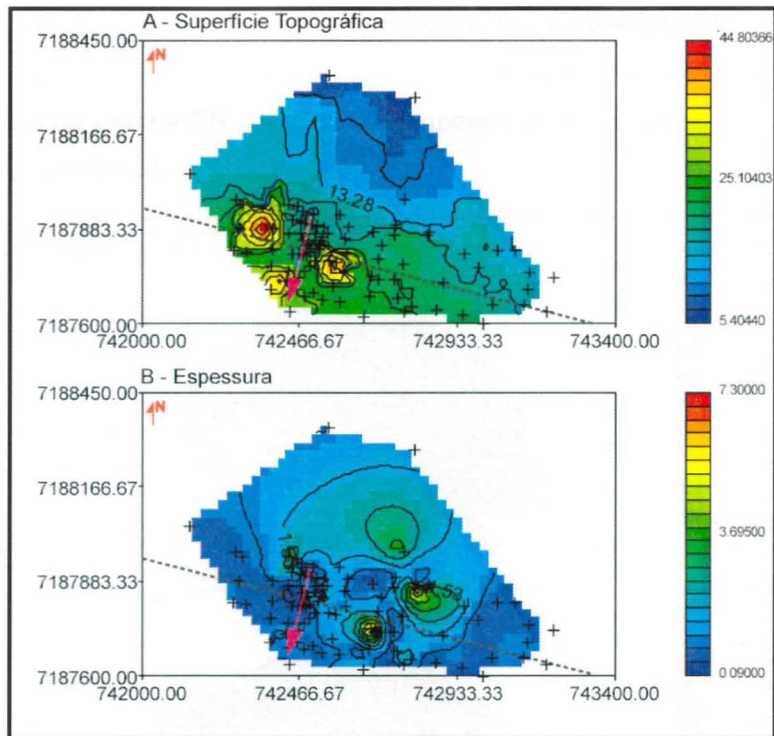


Figura 26 Comparação entre superfície topográfica e espessura para a brecha BA. A linha tracejada indica a localização aproximada do eixo da barragem, a seta rosa, o fluxo do Rio Paraná e as cruzeiras, os pontos de amostragem da brecha BA.

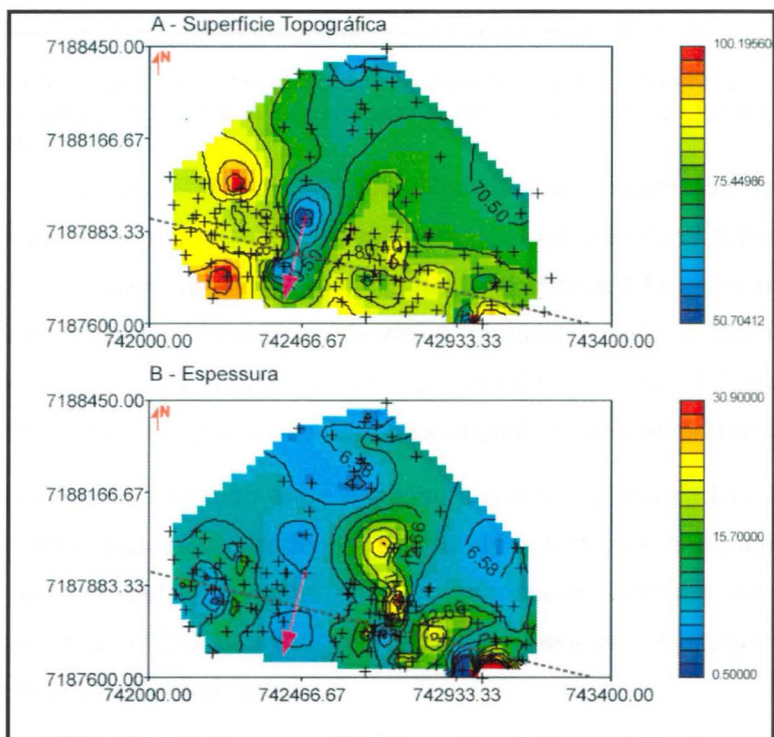


Figura 27 Comparação entre superfície topográfica e espessura para a brecha CB. A linha tracejada indica a localização aproximada do eixo da barragem, a seta rosa, o fluxo do Rio Paraná e as cruzeiras, os pontos amostrados da brecha CB.

A **figura 27** ilustra a comparação entre espessura e superfície da brecha CB. Neste caso observa-se que predominam espessuras intermediárias de até 15 metros em toda a área de ocorrência da brecha CB. Verifica-se também que as menores espessuras ocorrem na região do vale identificado.

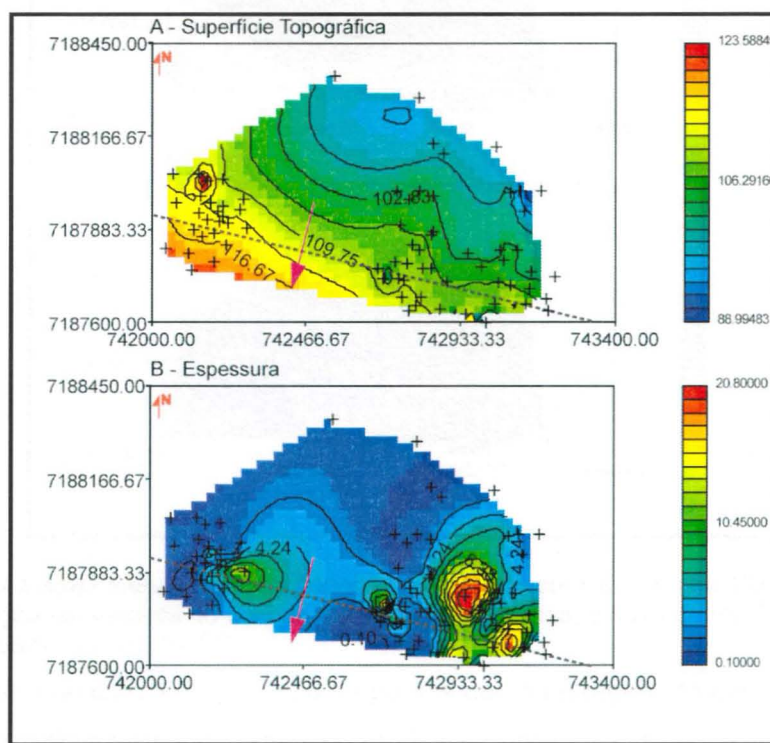


Figura 28 Comparação entre superfície topográfica e espessura para a brecha DC. A linha tracejada indica a localização aproximada do eixo da barragem, a seta rosa, o fluxo do Rio Paraná e as cruzes, os pontos amostrados da brecha DC.

No caso da brecha DC (**figura 28**), identifica-se que a mesma apresenta espessura predominante de até 2 metros. Observa-se também que ocorrem duas áreas, uma a leste e outra a oeste onde a espessura aumenta, atingindo 20 metros e 10 metros respectivamente. Identifica-se também que a espessura tende a aumentar com a diminuição da cota topográfica. Porém na região central da área de estudo, a brecha DC exibe novamente espessuras menores. Este local coincide com o local onde não foi amostrada a brecha DC.

A **figura 29** ilustra a relação entre espessura e cota da brecha ED. Observa-se que esta brecha apresenta espessura predominante de até 3 metros e que ainda existem duas áreas, uma a leste e outra a oeste onde a espessura aumenta até os 8 metros. Semelhantemente à brecha DC, os locais de menores espessuras registradas (até 3 metros) correspondem a locais não amostrados.

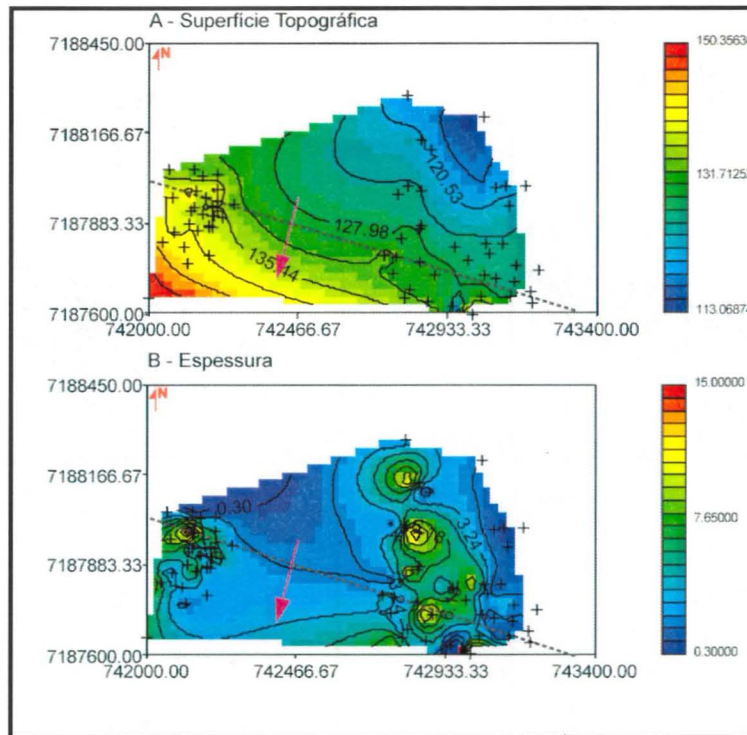


Figura 29 Comparação entre superfície topográfica e espessura da brecha ED. A linha tracejada indica a localização aproximada do eixo da barragem, a seta rosa, o fluxo do Rio Paraná e as cruzes, os pontos amostrados da brecha ED.

Ainda com relação à distribuição de pontos de amostragem de cada brecha, a **figura 30** apresenta a malha de sondagens executadas na área de estudos e as sondagens que amostraram cada brecha. A partir desta figura é possível reconhecer que nos locais onde as brechas DC e ED (**figura 30C** e **figura 30D**) não foram amostradas, ocorrem as brechas BA e CB (**figura 30A** e **figura 30B**). As descrições de testemunhos indicam, ainda, que nesses locais os primeiros litotipos encontrados são as camadas do basalto do derrame B, seguidos da brecha BA e do derrame A. Ainda, na região central da brecha CB observa-se também uma faixa na qual a mesma não foi amostrada; a mesma faixa de sondagens amostrou a brecha BA. Observando-se as quatro figuras, da base ao topo, isto é da brecha BA em direção à brecha ED, percebe-se o aumento gradual da faixa de brechas não amostradas.

Esta faixa de pontos não amostrados corresponde ao local onde o curso do Rio Paraná está localizado. De acordo com a **figura 4**, o leito do Rio Paraná se localiza na base do derrame B; sendo, portanto, esperado que o único litotipo presente nesta região, abaixo da cota do leito do rio, seja a brecha BA. As sondagens executadas mostram claramente isto, como anteriormente elucidado, com uma densidade relativamente grande de pontos de amostragem da brecha BA e uma diminuição gradual de pontos de amostragem das outras brechas com o concomitante aumento da largura da faixa de sondagens que não amostraram nenhuma das brechas subseqüentes.

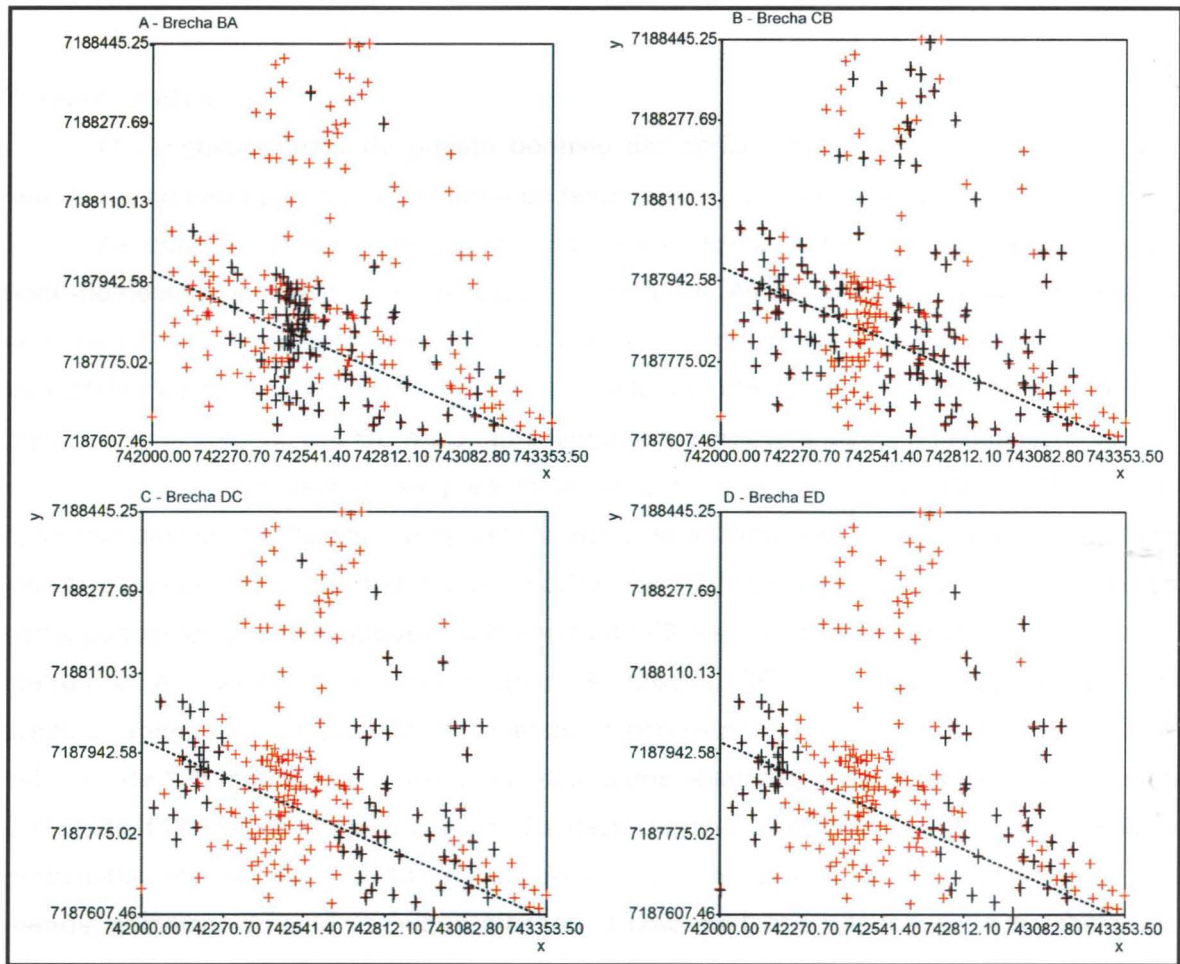


Figura 30 Amostragem de cada brecha em função da malha de sondagens totais da área de estudo. A linha tracejada indica a localização aproximada do eixo da barragem. As cruces vermelhas correspondem a todas às sondagens executadas na área de estudo e as pretas, as sondagens que amostraram as brechas BA (A), CB (B), DC (C) e ED (D).

9. Conclusões

O desenvolvimento do projeto permitiu dar continuidade a linha de pesquisa em segurança da barragem de Itaipu utilizando ferramentas da geoestatística.

As quatro superfícies mapeadas entre os derrames apresentaram mergulho para norte-nordeste, condizendo com os dados da literatura. Ainda, a brecha mapeada entre os derrames B e C mostrou claramente a influência na topografia da zona de cisalhamento localizada na base do derrame B, conferindo a este a morfologia de um vale. Ao contrário da brecha CB, as brechas BA, DC e ED, apresentaram um relevo suave e homogêneo.

A brecha BA estende-se predominantemente na cota aproximada de 20 metros, conforme descrito na literatura e apresenta sua cota mínima nos 3 metros e a máxima, em locais pontuais, nos 62 metros. A brecha CB definida apresentou valores médios correspondentes aos encontrados na literatura de 80 metros, tendo sua cota mínima aos 47 metros e a máxima, aos 103 metros. A brecha DC, por sua vez, se estende predominantemente na cota de 108 metros, e ocorre nas cotas mínima de 86 metros e máxima, de 126 metros, se aproximando dos dados observados na literatura, que apontam a cota de 112 metros como a cota média desta brecha. A brecha ED, por último, ocorre predominantemente na cota 131 m, sendo a cota mínima 113 metros e a máxima, 151 metros; semelhantemente às outras brechas, a cota média calculada para a brecha ED é próxima da definida na literatura.

Com relação às espessuras, as brechas BA, DC e ED apresentam espessuras médias próximas, de 3,7 m, 2,0 m e 3,0 m respectivamente. A maior espessura é observada na brecha CB, onde predominam espessuras médias de 10 m. As brechas BA e DC apresentam espessuras inversamente proporcionais às cotas topográficas; assim, para valores mais altos de cota correspondem espessuras menores e vice-versa. A brecha CB, por sua vez, reflete novamente na sua espessura, o comportamento da “falha em bigode” localizada na base do derrame B; assim, observam-se espessuras maiores nas encostas do vale, e menores no próprio vale. A brecha ED, por sua vez, apresenta comportamentos distintos entre superfície topográfica e espessura; é possível identificar espessuras maiores nas regiões leste e oeste.

Através da obtenção das espessuras das brechas DC e ED e da malha de sondagens foi possível identificar o local onde está instalado o curso do Rio Paraná. Este local corresponde à uma região de ausência de informações de sondagens, onde as espessuras das superfícies definidas passam apresentar um decréscimo repentino.

Desta maneira, considera-se que o trabalho atendeu aos objetivos inicialmente propostos, permitindo uma primeira aproximação à modelagem de superfícies de descontinuidade na região. Os resultados obtidos indicam que o uso de krigagem ordinária e

equações multiquádricas é adequado para este tipo de estudos, fornecendo uma nova metodologia para eventuais estudos posteriores.

Finalmente, com relação ao estudo do comportamento hidrogeológico, pode-se concluir que a partir dos dados obtidos não é possível chegar a alguma conclusão pertinente, pois não parece ser correto determinar um fluxo local com mergulho de acordo com os derrames (norte-nordeste) considerando o fluxo do Rio Paraná (sul-sudoeste). Para tanto seria necessário um estudo mais detalhado, focado na determinação do fluxo subterrâneo, a partir da combinação de dados de nível d'água, pesquisa no comportamento dos cursos hídricos da região e da bacia hidrográfica na qual se insere e ferramentas para estabelecer tal fluxo, dentre as quais poderiam ser utilizadas ferramentas geoestatísticas.

10. Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Brasília, DF, 2002, p. 153.

BARBI, A. L. Comportamento do maciço rochoso em função da escavação do canal de desvio do rio Paraná – Usina Itaipu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 3., 1981, Itapema, Santa Catarina. *Anais...* São Paulo: ABGE, 1981. v. 2, p. 463-485.

CURTI, D. K., *Tipologia e origem das fraturas sub-horizontais em basaltos da Formação Serra Geral, Brasil*. 2011. 119 p. Tese (Dissertação de Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GOMES, M. E. B. *Mecanismos de resfriamento, estruturação e processos pós-magmáticos em basaltos da Bacia do Paraná – região de Frederico Westphalen (RS), Brasil*. 1996. 219 f. Dissertação (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IECO); ENERCONSULT ENGENHARIA LTDA. *Aproveitamento Hidrelétrico de Itaipu: estudo da distribuição da descontinuidade “A” na área das obras*. 1977a. 36 p. nº SAT: 2082.50.1501. P RCB

_____. *Aproveitamento Hidrelétrico de Itaipu: estudo da distribuição da descontinuidade “B” na área das obras*. 1977b. 68 p. nº SAT: 2082.50.1503. P ROA.

_____. *Aproveitamento Hidrelétrico de Itaipu: estudo de contato entre os derrames “D” e “C” na área das obras*. 1977c. 50 p. nº SAT: 2082.50.1509 – P ROB.

_____. *Aproveitamento Hidrelétrico de Itaipu: estudo da distribuição da descontinuidade “D” na área das obras*. 1977d. 57 p. nº SAT: 2082.50.1511. P ROB.

_____. *Aproveitamento Hidrelétrico de Itaipu: estudo do fraturamento subvertical do basalto denso do derrame “E”*. 1978. nº SAT: 2082.50.1516 – P ROA.

ITAIPU BINACIONAL. *Itaipu: usina hidrelétrica – projeto: aspectos de engenharia*. Foz do Iguaçu, Paraná, 2009, 748 p., Cap. 4, p. 4.1-4.18.

KOIKE, K.; MINTA, T.; ISHIZAKA, S.; OHMI, M. Hydrogeological and ground-water resource analysis using a geotechnical database. *Nonrenewable Resources Research*, v.5, n. 1, p. 23-32, 1996.

KOIKE, K; SAKAMOTO, H.; OHMI, M. Detection and hydrogeologic modeling of aquifers in unconsolidated alluvial plains through combination of borehole data sets: a case study of the Arao area, Southwest Japan. *Engineering Geology*, v. 62, p. 301-307, 2001.

KOIKE, K.; MATSUDA, S. Spatial modeling of discontinuous geologic attributes with geotechnical applications. *Engineering Geology*, v. 78, p. 143-161, 2005.

LANDIM, P.M.B. *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1998. 226p.

MARQUES, L.S.; ERNESTO, M. O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; NEVES, B. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004. 647 p.

MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; NEVES, B. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004. 647 p.

PATIAS, J. *Zoneamento Geotécnico com base em krigagem ordinária e equações multiquádricas: Barragem de Itaipu*. 2010. 319 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PICCIRILLO, E.M.; MELFI, A.J.; NARDY, A.J.R. Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin – an introduction. In: *The mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin – petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 1988. 600 p.

YAMAMOTO, J.K. *Curso de Geoestatística Aplicada*. Extensão universitária. São Paulo, apostila, 1994. 82 p.

_____. *Avaliação e classificação de Reservas Minerais*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001. 226p.

_____. Ore reserve estimation using radial functions. *Revista do Instituto de Geociências*, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 25-38, 2002.



