HOMOGENEIZAÇÃO DE REFERENCIAIS ALTIMÉTRICOS. UMA ABORDAGEM POR MEIO DE AJUSTAMENTO COM INJUNÇÕES

Iris Pereira Escobar

Virgílio Noronha Ribeiro da Cruz

Newton Pereira dos Santos

Workshop "EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA NA DETERMINAÇÃO DE ALTITUDES"

IBGE (08 de novembro de 2007)

SUMÁRIO

- INTRODUÇÃO
- REQUISITOS BÁSICOS PARA ALTITUDE
- MODELO MATEMÁTICO PARA AJUSTAMENTO DE REDE ALTIMÉTRICA DE PRECISÃO
- APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO
- AJUSTAMENTO DA REDE
- CONCLUSÕES

INTRODUÇÃO

Referencial altimétrico preciso e homogêneo.

A. PARA QUÊ?

1. Utilização plena da informação altimétrica;
2. Desenvolvimento de estudos regionais e globais;
3. Facilitar, ou mesmo possibilitar, a tomada de decisão sobres os valores de altitudes;
4. Vencer a barreira dos limites de jurisdição política;

Referencial altimétrico preciso e homogêneo.

B. COMO?

1. Entendimento entre entidades nacionais e internacionais;
2. Definição e implantação de sistemas de altitudes regionais homogêneos;
3. Projeto SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas);

Referencial altimétrico preciso e homogêneo.

C. O QUE CONSIDERAR?

1. Instabilidades tectônicas (marégrafos costeiros);
2. Definição de altitude (ortométrica, normal, dinâmica etc.);
3. Diferença de datum (topografia da superfície oceânica);

Referencial altimétrico preciso e homogêneo.

D. PROPOSTA?

Adoção de um modelo matemático para ajustamento de rede altimétrica que:

- envolve simultaneamente as grandezas observáveis (altitudes dos marégrafos, desníveis e gravidade) e as altitudes dos pontos da rede altimétrica;
- pode ser aplicado a qualquer tipo de altitude formulada a partir do número geopotencial;
- permite que vários marégrafos sejam utilizados simultaneamente como referências, sem fixação dos valores das altitudes dos marégrafos;

Referencial altimétrico preciso e homogêneo.

E. OBJETIVO?

1. Compensar o efeito da topografia da superfície oceânica em cada marégrafo utilizando a coerência interna da rede altimétrica, tendo como resultado um conjunto de altitudes referidas à superfície oceânica média, que melhor se ajusta ao conjunto dos marégrafos utilizados;
2. Possibilitar futuros aprimoramentos do sistema de altitudes, em função das influências geodinâmicas, através do monitoramento contínuo dos registros dos marégrafos;
3. Atender a qualquer o conceito de altitude formulada a partir do número geopotencial.

Referencial altimétrico preciso e homogêneo.

F. TESTE?

1. Ajustamento de uma rede de 1248 referências de nível, interconectadas por 1259 desníveis observados com nivelamento geométrico de precisão. Como datum vertical são utilizadas as altitudes transportadas a partir das determinações em 7 marégrafos, cujos valores são introduzidos no problema através de um modelo secundário;
2. O problema é resolvido pelo método dos mínimos quadrados, fornecendo, como resultado, as altitudes nas RRNN da rede com desvios-padrão estimados entre 3 e 6 cm;

REQUISITOS BÁSICOS PARA ALTITUDE

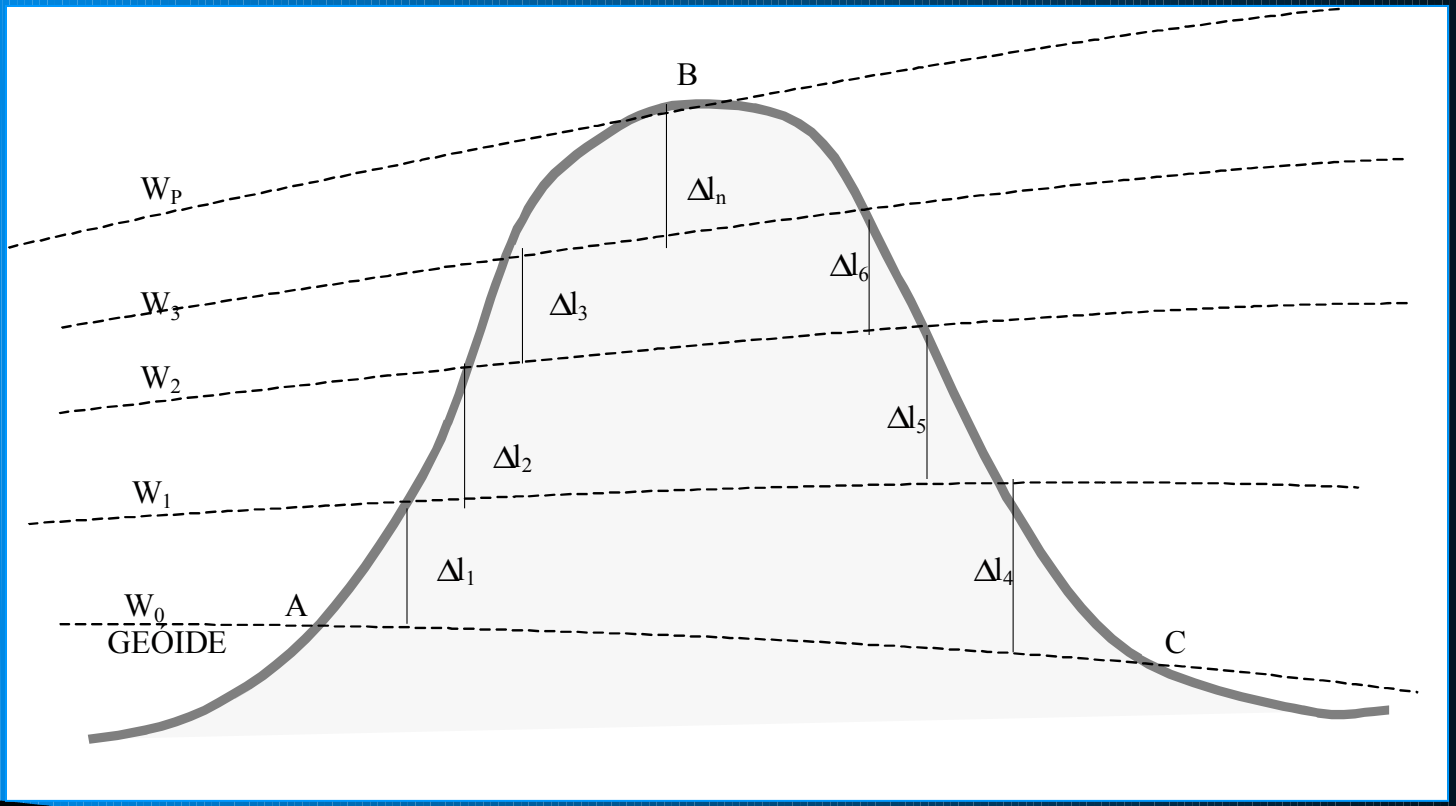
- Definem o posicionamento vertical sobre a superfície terrestre.
- ***Datum*** vertical: geóide - nível médio dos mares.
- Deve ter a dimensão de um comprimento, estar ligada a um referencial terrestre bem definido e fisicamente acessível e deve ser univocamente definida.

REALIZAÇÃO:

Um sistema geodésico de altitudes compreende três atividades operacionais:

- **Definição do *datum* vertical.**
- **Nivelamento geométrico.**
- **Gravimetria**.

SUPERFÍCIES GEOPOTENCIAIS



As superfícies geopotencias não são paralelas

Workshop "EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA NA DETERMINAÇÃO DE

A diferença de potencial (**δW**) é definida de forma unívoca - independe do percurso:

$$\delta W = -g\,\delta l$$

A altitude definida univocamente deve estar referida ao campo da gravidade terrestre, descrita pelo geopotencial (W) no ponto, com *datum* na superfície oceânica média.

- **Número geopotencial:** Diferença entre o geopotencial no geóide em um ponto.

$$C_P = W_0 - W_P$$

$$C_P = \sum_{O}^{P} g_{ij}\delta l_{ij} \qquad g_{ij} = \frac{g_i + g_j}{2}$$

$$H_P^D = \frac{C_p}{\gamma_r}$$

- **Altitude dinâmica**:

- **Altitude ortométrica**: $H_P = \dfrac{C_p}{\bar{g}}$

distância do geóide ao ponto, medida na vertical.

Altitude de Helmert: $H_P = \dfrac{C_p}{g_P + 0{,}0424H}$

- **Altitude normal**: $H_P^N = \dfrac{C_p}{\bar{\gamma}}$

$$\bar{\gamma} = \gamma_0 \left[1 - \left(1 + \alpha + m - 2\alpha \operatorname{sen}^2 \varphi\right) \frac{H^N}{a} + \left(\frac{H^N}{a} \right)^2 \right]$$

Referida ao quase-geóide.

MODELO MATEMÁTICO PARA AJUSTAMENTO DE REDE ALTIMÉTRICA DE PRECISÃO

$$g_i^m H_i - g_j^m H_j - \delta W_{ij} = 0$$

$$\delta W_{ij} = \sum_{k=1}^{s} - \frac{g_k^m + g_{k+1}^m}{2} \delta l_{k,k+1}$$

Para $g_i^m = \bar{g}_i$ tem-se altitude ortométrica

Para $g_i^m = \bar{\gamma}_i$ tem-se altitude normal

$$\bar{g}_i = g_i - \frac{\partial g}{\partial H}\frac{H}{2}$$

$$\bar{\gamma}_i = \gamma_i^0\left[1 - \left(1 + \alpha + m - 2\alpha \operatorname{sen}^2 \varphi_i\right)\frac{H_i^N}{a} + \left(\frac{H_i^N}{a}\right)^2\right]$$

$$\gamma^0 = \frac{a\gamma_e \cos^2 \varphi + b\gamma_p \operatorname{sen}^2 \varphi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \operatorname{sen}^2 \varphi}}$$

Incógnitas: Altitudes
Observáveis: Desníveis

Variâncias das observações

- Altitudes: $\sigma^2_{H_i} = \left(\sigma_{H_i}\right)^2$
- Desníveis: $\sigma^2_{\Delta l_{ij}} = \sigma^2_{l} S_{ij}$
- Dif. pot. gravidade: $\sigma^2_{\Delta W_{ij}} = g_m^2 \sigma^2_{\Delta l_{ij}} + \Delta l_{ij}^2 \sigma^2_{g_m}$

$$\sigma^2_{\Delta W_T} = \sigma^2_{\Delta W_{12}} + \sigma^2_{\Delta W_{23}} + \cdots$$

AJUSTAMENTO DE UMA REDE ALTIMÉTRICA

Dados utilizados

- 1258 Seções
- 1247 RRNN
- 7estações maregráficas

Workshop "EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA NA DETERMINAÇÃO DE

RRNN com altitudes maregráficas

ESTAÇÃO	SITUADA EM
4X	Imbituba
6O	Florianópolis
12X	Torres
13I	Porto Belo
13U	Itajaí
15D	São Francisco do Sul
25A	Paranaguá

Processamento - Resultados obtidos

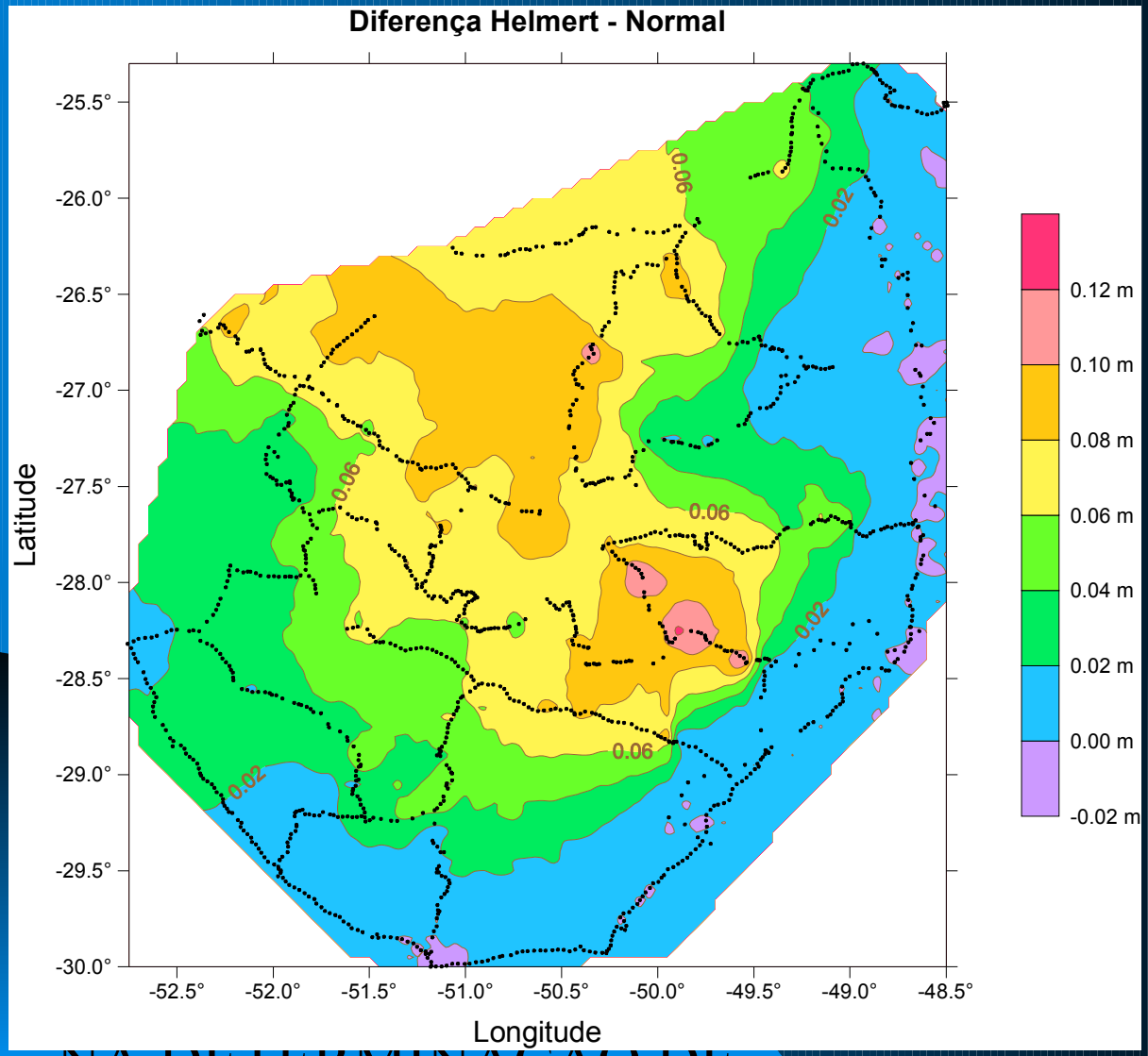
EST	CÓD	ALTIT PRELIM	DESV PADR ESTIMADO	CORREÇÃO	ALTITUDE AJUSTADA	DESV PADR ALT AJUST
4X	C	8,6362	0,05	-0,0025	8,6337	0,0345
6O	C	8,5181	0,15	-0,1230	8,3951	0,0364
12X	C	18,0145	0,05	0,0078	18,0223	0,0402
13I	C	2,5522	0,20	0,2025	2,7547	0,0360
13U	C	1,4999	0,10	0,1016	1,6015	0,0357
15D	C	2,9766	0,05	-0,0120	2,9646	0,0339
25A	C	3,6333	0,05	-0,0177	3,6156	0,0390

Estudos comparativos

Planilha comparativa entre as altitudes de Helmert e as normais

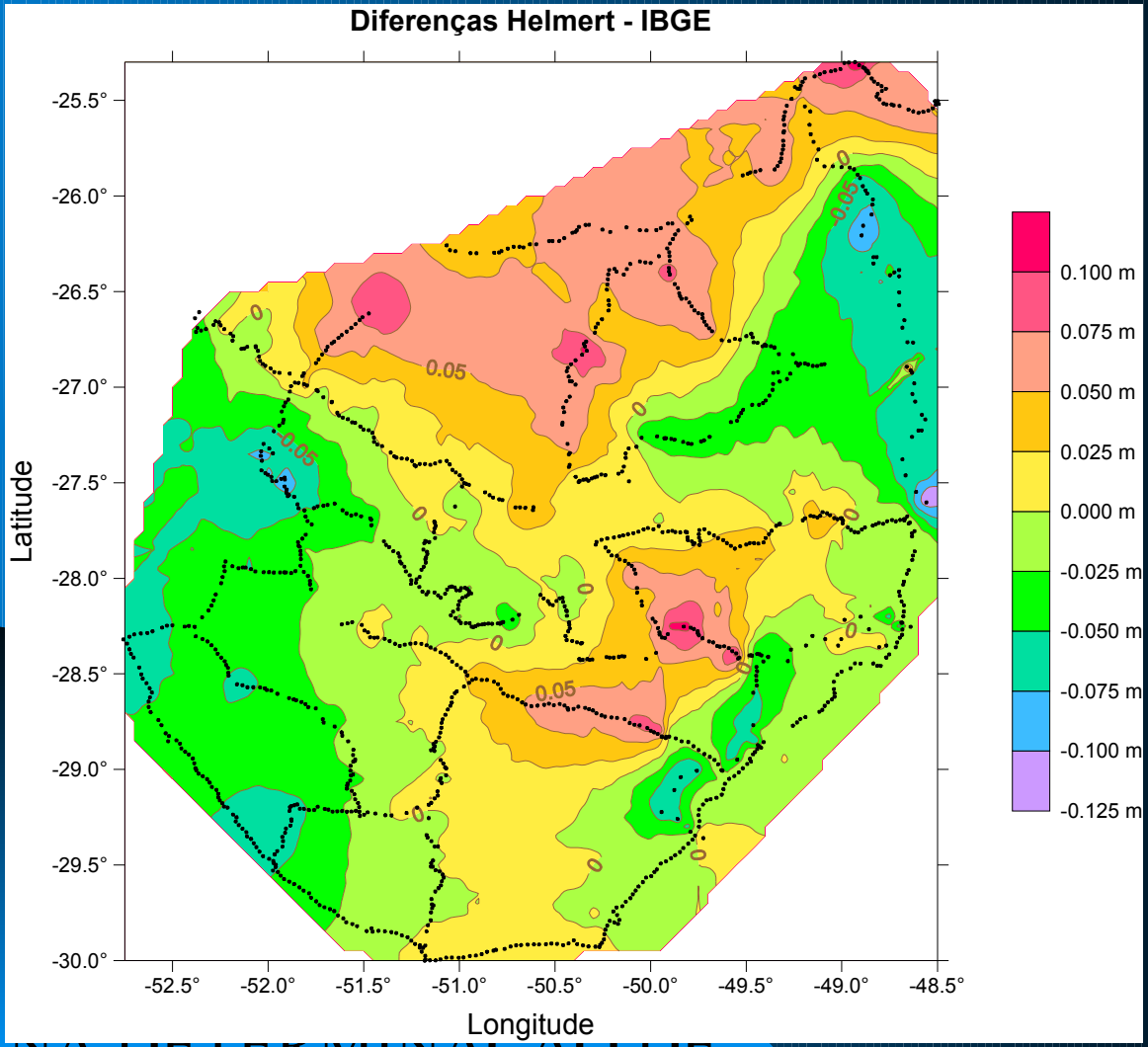
N ORD	ESTAÇÃO	COD	ALTITUDE DE HELMERT		ALTITUDE NORMAL		DIF
			ALTITUDE	DESV PAD	ALTUTUDE	DESV PAD	
1	1K	N	13,2294	0,0406	13,2290	0,0406	0,0004
2	1M		94,2434	0,0401	94,2379	0,0401	0,0055
3	1O		58,7114	0,0403	58,7082	0,0403	0,0032
4	1Q	N	120,6311	0,0411	120,6234	0,0411	0,0077
5	1S		140,0224	0,0403	140,0135	0,0403	0,0089
6	1U		199,7203	0,0402	199,7074	0,0401	0,0129
7	2	N	61,9039	0,0406	61,9002	0,0406	0,0037
8	3C		29,2450	0,0391	29,2435	0,0391	0,0015
9	3F		21,4092	0,0397	21,4084	0,0397	0,0008
10	3J	N	4,8828	0,0421	4,8830	0,0421	-0,0002
11	3L		10,8317	0,0412	10,8315	0,0412	0,0002
12	4A		15,2545	0,0395	15,2539	0,0395	0,0006
13	4D	N	31,4696	0,0397	31,4681	0,0397	0,0015

Cartograma das diferenças entre altitudes de Helmert e normais



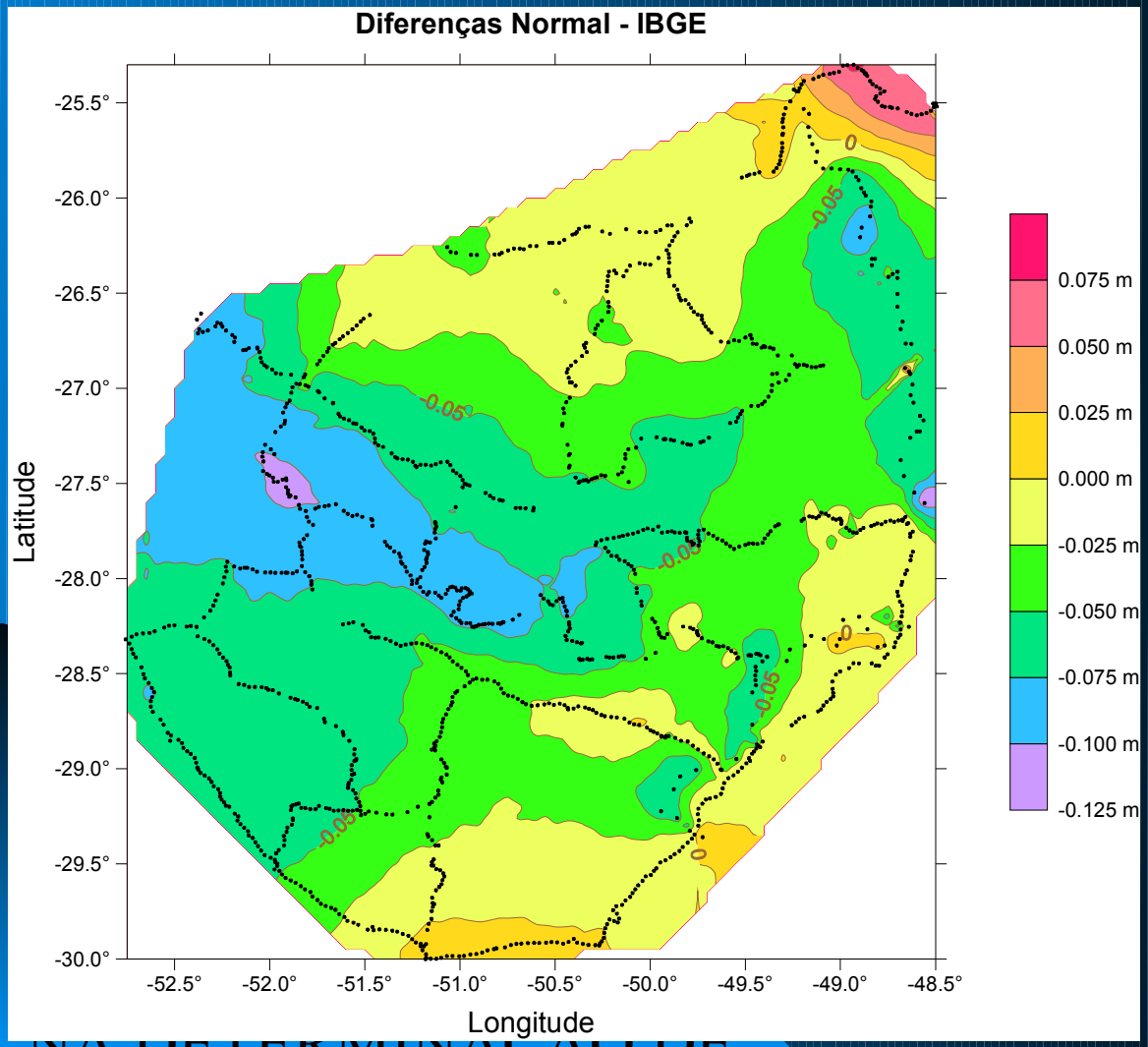
NA DETERMINAÇÃO DE

Cartograma das diferenças entre altitudes de Helmert e do IBGE



NA DETERMINAÇÃO DE

Cartograma das diferenças entre altitudes normais e do IBGE



NA DETERMINAÇÃO DE

CONCLUSÕES

- Chegou-se a σ_0^2 próximo de 1

  Ausência de tendências. Modelo adequado

  σ_0^2=0,99096 para σ_l=3,6mm/√km

- A introdução das altitudes dos marégrafos como injunções relativas revela o grau de coerência entre elas, e possibilita a adoção de um geóide intermediário como superfície de referência.
- Além de se evitar a subordinação a uma único marégrafos, que pode eventualmente estar sujeito a problemas de natureza operacional ou física (topografia da superfície do mar), o ajustamento é enriquecido com informações adicionais provenientes de outros marégrafos.

Conclusões (Cont.)

- O efeito da topografia da superfície oceânica, em cada marégrafo, é compensado pela coerência interna da rede altimétrica, tendo como resultado, um conjunto de altitudes referidas à superfície oceânica média que melhor se ajusta ao conjunto dos marégrafos utilizados.
- O monitoramento contínuo dos registros dos marégrafos pode prover futuros aprimoramentos do sistema de altitudes em função das influências geodinâmicas.
- O modelo matemático proposto permite a obtenção direta das altitudes em um único processo, ou seja, não necessita o cálculo prévio dos números geopotenciais ou a aplicação da correção ortométrica aos desníveis observados.

Conclusões (Cont.)

- É necessário que continue sendo apoiada a iniciativa de se incorporar a gravimetria à rotina do nivelamento geométrico de precisão, incluindo-se os marégrafos. Afinal, sem a gravimetria, o nivelamento de precisão perde boa parte de seu sentido.
- É imperioso que se continue apoiando a implantação de marégrafos ao longo da costa brasileira e a padronização dos sistemas operacionais, de modo a se obter informações homogêneas e de alta qualidade, compatíveis com a qualidade do nivelamento e da gravimetria que estão sendo executados.

AGRADECIMENTOS

Ao IBGE pelo fornecimento dos dados da rede altimétrica.

À UERJ e ao Observatório Nacional pelo apoio institucional.