

Revista Brasileira de Cartografia (2016), Nº 68/3: 567-580
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ANÁLISE MULTIVARIADA APLICADA NO ESTUDO DOS EFEITOS DA IONOSFERA, TROPOSFERA E MULTICAMINHO NOS SINAIS GNSS

Multivariate Analysis Applied in the Study of the Effects of Ionosphere, Troposphere and Multipath on the GNSS Signals

**Vinícius Amadeu Stuani Pereira¹, Paulo de Oliveira Camargo^{1,2}
& Vilma Mayumi Tachibana^{1,3}**

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP

Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT / Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Rua Roberto Simonsen, 305, CEP 19060-900, Presidente Prudente/SP – Brasil
vi_stuani@hotmail.com

²Universidade Estadual Paulista – UNESP

Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT / Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsen, 305, CEP 19060-900, Presidente Prudente/SP – Brasil
paulo@fct.unesp.br

³Universidade Estadual Paulista – UNESP

Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT / Departamento de Estatística
Rua Roberto Simonsen, 305, CEP 19060-900, Presidente Prudente/SP – Brasil
vilma@fct.unesp.br

Recebido em 07 de Maio, 2014/ Aceito em 21 de Novembro, 2014
Received on May 07, 2014/ Accepted on November 21, 2014

RESUMO

Os sinais GNSS (*Global Navigation Satellite System*) estão sujeitos a erros sistemáticos causados por diversas fontes, sendo as principais a camada ionosférica, a camada troposférica e o multicaminho. A compreensão de como esses efeitos se comportam e relacionam é de grande interesse para a Geodésia Espacial. No Brasil, estudos voltados a esse assunto são possíveis graças às estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), que proporcionam a obtenção de um grande conjunto de dados geodésicos: latitude e longitude geodésicas, altitudes geométrica e ortométrica, Atraso Zenital Troposférico (*Zenith Tropospheric Delay – ZTD*), índice de irregularidades da ionosfera (F_p), níveis de multicaminho (*Multipath – MP*), dentre outros. Algumas estações são equipadas com barômetros e termômetros, fornecendo também dados meteorológicos. Assim, o trabalho aborda uma análise das relações e comportamentos de dados geodésicos e meteorológicos de 25 estações da RBMC distribuídas pelo território brasileiro, para o dia 2 de agosto de 2013, utilizando as análises multivariadas de componentes principais, fatorial principal e de agrupamentos, visando determinar a contribuição desses dados com as principais fontes de erros sistemáticos, bem como, mostrar o potencial do uso da análise multivariada nos estudos dos erros sistemáticos. Por meio das análises de componentes principais e fatorial, as 12 variáveis analisadas podem ser representadas por apenas quatro variáveis hipotéticas, garantindo 95,9% da variabilidade amostral, sendo três dessas variáveis caracterizadas por cada um dos tipos de erros sistemáticos: variável ionosférica (latitudes geodésica e geomagnética e F_p), troposférica (altitudes geométrica e ortométrica, pressão atmosférica, temperatura e ZTD) e multicaminho (MP1 e MP2). Verifica-se que a pressão atmosférica pode exercer um maior peso que a temperatura na modelagem da camada troposférica. Uma pos-

sível influência da ionosfera no ZTD foi identificada, possibilitando futuras discussões. A não associação das variáveis MP1 e MP2 com as demais foi identificada, devido o multicaminho ser uma fonte de erro local. O agrupamento de estações por dendrograma possibilita uma nova forma de visualização do comportamento da ionosfera, bem como, a identificação de estações cujos sinais são mais refletidos.

Palavras chaves: GNSS, Análise Multivariada, Ionosfera, Troposfera, Multicaminho.

ABSTRACT

GNSS (Global Navigation Satellite System) signals are subject to systematic errors caused by various sources, the main ionospheric layer, tropospheric layer and multipath. Understanding how these effects relate and behave is of great interest to the Space Geodesy. In Brazil, studies related to this subject are possible thanks to the RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS Signals) stations, which provide the obtaining of a large number of geodetic data: latitude and longitude geodetic, geometric and orthometric height, Zenith Tropospheric Delay (ZTD), index of ionospheric irregularities (F_p), multipath levels (MP), among others. Some stations are equipped with barometers and thermometers, also providing meteorological data (atmospheric pressure and temperature). Thus, the paper discusses an analysis of the relationships and behaviors of geodetic and meteorological data from 25 RBMC stations distributed in Brazilian territory for August 2nd, 2013, using multivariate analysis of principal components, principal factor and clusters, in order to determine the contribution of these data with the main sources of systematic errors, as well as to show the potential of the use of multivariate analysis in the studies of systematic errors. Through principal components analysis and factor analysis, 12 analyzed variables can be represented by only four hypothetical variables, providing 95.9% of the sample variability, of which three of these variables characterized by each of the types of systematic errors: ionospheric variable (geodetic and geomagnetic latitudes and F_p), tropospheric (geometric and orthometric heights, atmospheric pressure, temperature and ZTD) and multipath (MP1 and MP2). It is noted that atmospheric pressure can have a greater weight than the temperature in modeling the tropospheric layer. A possible influence of the ionosphere in ZTD was identified, enabling future discussions. The non-association of MP1 and MP2 variables with other was identified, because the multipath to be a source of local error. The clustering of stations by dendrogram enables a new form of display the behavior of the ionosphere, as well as the identification of stations whose signals are more reflected.

Keywords: GNSS, Multivariate Analysis, Ionosphere, Troposphere, Multipath.

1. INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*) traduz o que há de mais atual e moderno a respeito de posicionamento e estudos relacionados à Atmosfera Terrestre. Composto pelo sistema norte-americano GPS (*Global Positioning System*), o russo GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), o chinês BDS (*BeiDou Navigation Satellite System*) e o europeu Galileo, além dos sistemas aumentados SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*) e GBAS (*Ground-Based Augmentation System*), o GNSS proporciona a obtenção de uma grande quantidade de dados geodésicos, que incluem desde as coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude geométrica) até o Atraso Zenital Troposférico (*Zenith Tropospheric Delay – ZTD*), Conteúdo Total de Elétrons (*Total Electron Contents – TEC*), índices de irregularidades ionosféricas, dentre outros.

Os principais erros nos sinais GNSS advêm dos efeitos causados pela camada ionosférica e troposférica e devido ao multicaminho (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 1997). Portan-

to, compreender como esses efeitos se comportam e se relacionam é de grande interesse para a Geodésia Espacial.

No Brasil, estudos voltados à ionosfera, troposfera e multicaminho são possíveis graças aos dados das estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), de responsabilidade do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

Assim, visando uma análise de como a ionosfera, a troposfera e o multicaminho dos sinais GNSS se comportam e se relacionam, o presente trabalho aborda uma análise de dados geodésicos envolvendo latitude e longitude geodésica e geomagnética, altitudes geométrica e ortométrica, ZTD, multicaminho e índice de irregularidades da ionosfera de um conjunto de estações da RBMC, incluindo dados de temperatura e pressão atmosférica, para o dia 2 de agosto de 2013. Para isso, são realizadas as seguintes análises multivariadas: análise de componentes principais, análise fatorial e análise de agrupamentos.

2. BREVE REVISÃO SOBRE OS ERROS SISTEMÁTICOS

2.1 Ionosfera e Indicadores de Irregularidades

A ionosfera é a parte ionizada da atmosfera terrestre e está situada numa faixa a partir de, aproximadamente, 50 km de altura e se estende até 1.000 km da superfície da Terra, sendo formada por partículas livres carregadas, ou seja, íons e elétrons (LIN, 1997). Devido às propriedades de propagação dispersiva da ionosfera para os sinais de rádio, a magnitude deste efeito depende da frequência do sinal (HEISE *et al.*, 2003). Portanto, no momento em que as ondas de rádio na banda L de sistemas de navegação se deslocam através da ionosfera, as mesmas estão sujeitas a um atraso no tempo de propagação e cintilações de fase e de amplitude.

O principal parâmetro que descreve o efeito da ionosfera nos sinais GNSS é o TEC, que representa o número de elétrons contidos em uma coluna que se estende desde o receptor até o satélite (MATSUOKA & CAMARGO, 2004) e as principais variáveis que influenciam o estado da ionosfera são as variações temporais, variações da radiação solar, influências da localização geográfica, campo magnético, dentre outras (MATSUOKA, 2007; LEICK, 1995).

A taxa de variação do TEC (*Rate of Change of TEC – ROT*) é a diferença entre os TECs (ΔTEC) obtidos consecutivamente entre duas épocas, dividido pelo intervalo de tempo (Δt) entre suas determinações:

$$\text{ROT} = \frac{\text{TEC}_{t_2} - \text{TEC}_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\text{TEC}}{\Delta t} \quad (1)$$

Os valores dos ROTs são utilizados no cálculo de diferentes índices de irregularidades da ionosfera, que possuem a função principal de classificar o comportamento da ionosfera de acordo com um padrão estabelecido. Há diversos índices classificatórios, dentre os quais se destacam o f_p e F_p .

O índice f_p (*phase fluctuation*) é o valor da mediana dos ROTs para um período de 15 minutos, sendo os ROTs estimados a cada minuto. O índice f_p é calculado para cada satélite de uma determinada estação. Assim, para diversos

satélites/estações ele representa a resolução espacial das irregularidades (MENDILLO *et al.*, 2000), sendo dado por:

$$f_p(n, \text{hr}, i) = \text{Mediana}|\text{ROT}| \quad (2)$$

onde n é o número do satélite, hr é a hora (00-24 TU (Tempo Universal)) e i o número da seção com duração de 15 minutos dentro de uma hora ($i = 1, 2, 3$ ou 4).

O índice F_p é calculado para cada estação, para cada hora. Representa o valor médio de f_p de todos os satélites observados em uma estação no período de uma hora. F_p destina-se a retratar o nível geral de irregularidades presentes na vizinhança de uma determinada estação (MENDILLO *et al.*, 2000):

$$F_p(\text{hr}) = \frac{\sum_n^{\text{nsat}} \left[\sum_i^k f_p(n, \text{hr}, i) / k \right]}{\text{nsat}(\text{hr})} \cdot 1000 \quad (3)$$

onde nsat é o número total de satélites observados no período de uma hora e k é o número de valores f_p disponíveis a cada hora ($k = 1, 2, 3$ ou 4). Um valor $F_p \leq 50$ representa baixos níveis de irregularidades; $50 < F_p \leq 200$ significa a presença de irregularidades moderadas, e quando $F_p > 200$ representa a ocorrência de fortes níveis de irregularidades (MENDILLO *et al.*, 2000).

Estudos anteriores relacionados com o comportamento da ionosfera e suas irregularidades, com ênfase no Brasil, já foram realizados e pode-se citar: Pereira e Camargo (2016), Pereira e Camargo (2013), Muella *et al.* (2009), Matsuoka e Camargo (2004) e Camargo *et al.* (2000).

2.2 Troposfera

A troposfera corresponde à camada atmosférica de até 50 km de altura, aproximadamente, cujos principais efeitos nos sinais são: atenuação atmosférica, cintilação troposférica e ZTD (SAPUCCI, 2001).

O ZTD, também denominado de simplesmente atraso troposférico, é gerado pela influência da atmosfera hidrostática (seca) e úmida (MONICO, 2008). A componente hidrostática corresponde cerca de 2,3 m no zênite, varia com a temperatura e a pressão atmosférica local e é predito com razoável precisão, pois sua variação é pequena, da ordem de 1% durante várias horas. Já

a componente úmida é resultado da influência do vapor d'água atmosférico, cujo atraso, em geral, é menor, variando de 1 a 35 cm no zênite (SEEBER, 2003), o que corresponde aproximadamente a 1/10 do atraso atmosférico total; porém sua variação é maior, atingindo cerca de 20% em poucas horas, tornando impossível sua predição com boa precisão (MONICO, 2008).

Os modelos que estimam o atraso troposférico entre a antena de um receptor r e um satélite s , de uma forma geral, têm a seguinte forma (SPILKER, 1996):

$$ZTD_r^s = (10^{-6}) \int N_T ds \quad (4)$$

onde N_T é a refratividade da troposfera. A integral ao longo do caminho percorrido pelo sinal é solucionada quando se conhece o valor de N_T . O atraso troposférico ZTD_r^s pode ser aproximado como a soma dos efeitos das componentes hidrostática e úmida. Em geral, cada uma das componentes é expressa como o produto do atraso zenital com uma função de mapeamento, a qual relaciona o atraso zenital com o atraso para outros ângulos de elevação E (SPILKER, 1996). O atraso troposférico pode ser escrito como:

$$ZTD_r^s = [T_{ZH} \cdot mh(E) + T_{ZW} \cdot mw(E)] \quad (5)$$

onde T_{ZH} representa o atraso zenital da componente hidrostática; T_{ZW} representa o atraso zenital da componente úmida; e $mh(E)$ e $mw(E)$ são, respectivamente, as funções de mapeamento da componente hidrostática e úmida.

Há diversos modelos matemáticos que tratam do atraso zenital troposférico, tais como: Hopfield, Saastamoinen e Previsão Numérica do Tempo (PNT) (MONICO, 2008).

Inúmeros artigos a respeito dos efeitos troposféricos no Brasil podem ser consultados, dos quais podem ser destacados: Gouveia *et al.* (2014), Sapucci *et al.* (2007) e Sapucci *et al.* (2006).

2.3 Multicaminho dos Sinais GNSS

O efeito do multicaminho afeta a qualidade do sinal durante sua propagação entre o satélite e a antena do receptor. Os sinais recebidos pela antena podem ser divididos em dois grupos: os sinais recebidos diretamente dos satélites e os aqueles que atingiram um corpo qualquer e, sofrendo uma reflexão, atingiram a antena do receptor. Esses sinais refletidos são chamados de multicaminho. A Figura 1 apresenta as formas possíveis de multicaminho.

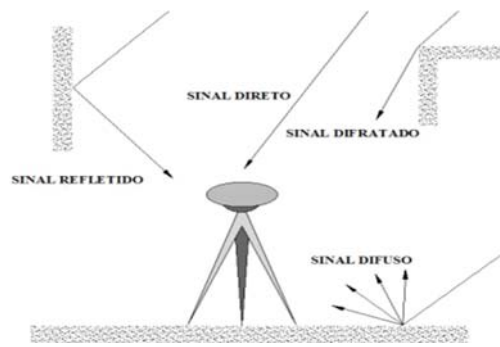


Fig. 1 – Possíveis formas de multicaminho nos sinais GNSS. Fonte: Souza *et al.* (2005).

A análise do nível de multicaminho em uma estação pode ser realizada utilizando os valores de MP1 e MP2, os quais se referem ao multicaminho nas pseudodistâncias em L1 e L2, obtidos pelo *software* TEQC (*Translation, Editing, and Quality Check*).

As combinações lineares para MP1 e MP2 são dadas por (ESTEY & MEERTENS, 1999):

$$MP1 = PD_{L1} - \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right) \varphi_{L1} + \left(\frac{2}{\alpha - 1}\right) \varphi_{L2} \quad (6)$$

$$MP2 = PD_{L2} - \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1}\right) \varphi_{L1} + \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1}\right) \varphi_{L2} \quad (7)$$

sendo PD_{L1} e PD_{L2} as medidas simultâneas da pseudodistância, em cada portadora L1 e L2; $\alpha = (f_{L1}^2 / f_{L2}^2)$, onde f_{L1} a frequência na L1 e f_{L2} a frequência na L2; φ_{L1} e φ_{L2} as medidas da fase para cada portadora.

Para mais informações do multicaminho dos sinais GNSS pode-se consultar Leandro (2009), Souza *et al.* (2005) e Souza e Monico (2003).

3. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

Para os experimentos foram utilizados dados geodésicos, temperatura e pressão atmosférica de 25 estações da RBMC distribuídas pelo território brasileiro (Figura 6), do dia 2 de agosto de 2013 (dia 214 do ano).

As coordenadas geodésicas (latitude – φ , longitude – λ e altitude geométrica – h) das estações, referenciadas ao SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, realização do ano 2000), época de referência 2000,4, bem como a altitude ortométrica (H), foram obtidas a partir dos descritivos fornecidos pelo IBGE. Os dados

meteorológicos (temperatura – T e pressão – P) das estações foram disponibilizados pelo CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos). Com o intuito de se obter valores representativos das condições meteorológicas e minimizar os efeitos de *outliers* no cálculo da média, foram determinadas as medianas dos dados de temperatura e pressão atmosférica.

As coordenadas geomagnéticas (latitude – ϕ_{mag} e longitude – λ_{mag}) das estações foram obtidas a partir da ferramenta *web* “Transformation of Coordinate”, disponibilizada pela Universidade de Kyoto, Japão (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/gggm/>), a qual se baseia no campo geomagnético IGRF-12 (12th Generation International Geomagnetic Reference Field).

Para a estimativa do índice de irregularidades da ionosfera F_p foi utilizado o *software* Ion_Index (PEREIRA & CAMARGO, 2016; PEREIRA & CAMARGO, 2013). Como o índice é estimado para cada hora e para cada estação, foi utilizada a mediana dos 24 valores do dia, com o intuito de obter um único valor representativo das condições ionosféricas de cada estação.

Os valores de ZTD foram obtidos a partir do modelo de PNT disponível no *website* do CPTEC (<http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/zenital.htm>), e utilizando o *software* TEQC foram obtidos os valores de MP1 e MP2 (ESTEY & MEERTENS, 1999).

A Tabela 1 apresenta os dados geodésicos e meteorológicos utilizados na análise exploratória, ou seja, as 12 variáveis analisadas.

3.1 Análise Exploratória dos Dados

Em relação aos dados geodésicos, há variáveis relacionadas com a posição da estação (latitude e longitude geodésica e geomagnética, altitude geométrica e ortométrica), variáveis a respeito da estratificação da camada atmosférica (ionosfera – índice F_p – e troposfera – ZTD), e variáveis que tratam dos desvios que os sinais dos satélites sofrem até serem registrados pelos receptores (multicaminho em L1 – MP1 – e L2 – MP2). Relacionado à meteorologia, duas variáveis são abordadas: temperatura e pressão atmosférica.

Utilizando o *software* Minitab foi determinada a matriz de correlação amostral R (Equação 8).

Tabela 1: Dados geodésicos e meteorológicos das estações RBMC utilizados na análise exploratória

Est.	ϕ [°]	ϕ_{mag} [°]	λ [°]	λ_{mag} [°]	h [m]	H [m]	T [°C]	P [hPa]	ZTD [m]	MP1 [m]	MP2 [m]	F_p
BELE	-1,409	7,560	-48,463	24,210	9,080	33,840	26,600	1010,200	2,612	0,330	0,381	114,805
BOAV	2,845	12,430	-60,701	12,030	69,480	84,490	25,850	1002,900	2,648	0,311	0,320	100,907
BRAZ	-15,948	-6,890	-47,878	23,770	1106,020	1118,000	19,350	899,750	2,119	0,293	0,327	76,681
BRFT	-3,877	4,290	-38,426	34,050	21,680	30,420	26,500	1009,350	2,537	0,209	0,225	106,285
CEEU	-3,878	4,280	-38,426	34,050	21,750	30,490	27,400	1012,300	2,537	0,287	0,305	112,922
CEFE	-20,311	-11,810	-40,319	30,670	14,310	21,530	22,800	1017,000	2,445	0,369	0,386	70,482
CUIB	-15,555	-6,030	-56,070	15,870	237,440	235,000	27,900	991,400	2,432	0,286	0,308	95,977
IMBT	-28,235	-19,040	-48,656	22,130	31,410	30,180	21,700	1007,300	2,434	0,334	0,396	50,576
MGBH	-19,942	-11,140	-43,925	27,260	974,860	981,070	19,650	922,200	2,152	0,292	0,301	61,065
MSCG	-20,441	-10,960	-54,541	17,090	676,510	674,730	23,200	954,750	2,284	0,318	0,349	76,485
NAUS	-3,023	6,580	-60,055	12,470	93,890	105,480	26,900	1003,750	2,603	0,299	0,308	103,776
ONRJ	-22,896	-14,130	-43,224	27,670	35,640	41,520	22,100	1012,700	2,411	0,341	0,359	73,063
OURI	-22,950	-13,710	-49,895	21,350	444,870	449,850	18,300	966,500	2,298	0,313	0,310	54,446
POAL	-30,074	-20,720	-51,120	19,710	76,750	72,000	17,800	1011,600	2,462	0,260	0,259	48,838
POLI	-23,556	-14,520	-46,730	24,300	730,620	733,630	19,850	929,550	2,202	0,293	0,333	65,867
POVE	-8,709	1,050	-63,896	8,4700	119,590	107,700	25,400	1001,600	2,522	0,280	0,304	106,744
PRMA	-23,410	-14,040	-51,938	19,390	543,370	545,310	22,700	954,150	2,295	0,399	0,581	98,976
RECF	-8,051	-0,180	-34,952	37,080	20,180	25,000	24,300	1015,050	2,548	0,308	0,332	116,063
RIOD	-22,818	-14,040	-43,306	27,600	8,630	14,450	20,250	1016,100	2,420	0,290	0,411	73,144
RJCG	-21,765	-13,160	-41,326	29,580	9,960	16,860	23,000	1015,800	2,441	0,322	0,384	44,723
RNNA	-5,836	2,030	-35,208	37,060	45,970	50,840	25,900	1009,500	2,513	0,344	0,433	119,052
SALU	-2,594	6,070	-44,213	28,390	18,980	43,730	27,650	1006,400	2,610	0,340	0,401	120,687
SMAR	-29,719	-20,220	-53,717	17,330	113,110	103,700	18,100	999,350	2,453	0,270	0,292	55,181
TOPL	-10,171	-1,130	-48,331	23,740	256,550	273,990	28,300	980,600	2,416	0,321	0,399	110,242
UFPR	-25,448	-16,230	-49,231	21,800	925,810	922,140	16,400	914,400	2,158	0,272	0,288	72,609

$$\begin{aligned}
 \hat{\lambda}_5 = 0,2119 \quad \hat{\lambda}_6 = 0,1679 \quad \hat{\lambda}_7 = 0,0808 \quad \hat{\lambda}_8 = 0,0177 \\
 \hat{e}_5 = \begin{bmatrix} 0,351 \\ 0,351 \\ 0,028 \\ 0,034 \\ 0,038 \\ 0,058 \\ -0,420 \\ -0,007 \\ 0,198 \\ 0,495 \\ -0,295 \\ -0,446 \end{bmatrix} \quad \hat{e}_6 = \begin{bmatrix} 0,046 \\ 0,044 \\ -0,033 \\ -0,020 \\ -0,044 \\ -0,050 \\ -0,775 \\ -0,039 \\ 0,213 \\ -0,202 \\ 0,278 \\ 0,474 \end{bmatrix} \quad \hat{e}_7 = \begin{bmatrix} -0,245 \\ -0,251 \\ -0,005 \\ -0,004 \\ 0,020 \\ -0,003 \\ -0,032 \\ 0,053 \\ -0,012 \\ 0,476 \\ -0,585 \\ 0,550 \end{bmatrix} \quad \hat{e}_8 = \begin{bmatrix} -0,202 \\ -0,190 \\ 0,047 \\ 0,088 \\ 0,168 \\ 0,193 \\ 0,162 \\ -0,351 \\ 0,831 \\ -0,024 \\ 0,020 \\ -0,078 \end{bmatrix} \quad (9) \\
 \hat{\lambda}_9 = 0,0085 \quad \hat{\lambda}_{10} = 0,0001 \quad \hat{\lambda}_{11} = 0,0001 \quad \hat{\lambda}_{12} = 0,0000 \\
 \hat{e}_9 = \begin{bmatrix} -0,009 \\ -0,027 \\ -0,008 \\ 0,005 \\ 0,454 \\ 0,417 \\ -0,011 \\ 0,771 \\ 0,129 \\ -0,054 \\ 0,068 \\ 0,015 \end{bmatrix} \quad \hat{e}_{10} = \begin{bmatrix} 0,231 \\ -0,227 \\ -0,281 \\ 0,276 \\ 0,597 \\ -0,618 \\ 0,001 \\ -0,027 \\ 0,000 \\ 0,004 \\ 0,005 \\ -0,021 \end{bmatrix} \quad \hat{e}_{11} = \begin{bmatrix} -0,170 \\ 0,139 \\ -0,645 \\ 0,648 \\ -0,246 \\ 0,230 \\ -0,010 \\ 0,019 \\ -0,036 \\ 0,004 \\ -0,000 \\ -0,009 \end{bmatrix} \quad \hat{e}_{12} = \begin{bmatrix} -0,646 \\ 0,655 \\ 0,074 \\ -0,038 \\ 0,272 \\ -0,270 \\ -0,001 \\ 0,002 \\ 0,001 \\ 0,001 \\ 0,000 \\ -0,000 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

i-ésimo CP $\hat{y}_i = \hat{e}_i'Z$ e $\text{Var}(\hat{y}_i) = \hat{e}_i$, onde Z são as variáveis padronizadas e (\hat{e}_i, \hat{e}_i) os pares de autovalores e autovetores de R (JOHNSON & WICHERN, 2007). Utilizando o *software* Minitab foram obtidos os seguintes autovalores e respectivos autovetores:

A proporção da variância total amostral explicitada por cada CP é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Porcentagem da variância total

CP	\hat{y}_1	\hat{y}_2	\hat{y}_3	\hat{y}_4	\hat{y}_5	\hat{y}_6
%var	45,6	19,2	16,7	14,4	1,8	1,4
CP	\hat{y}_7	\hat{y}_8	\hat{y}_9	\hat{y}_{10}	\hat{y}_{11}	\hat{y}_{12}
%var	0,7	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0

amostral (%var) explicitada por cada CP

Pelo Critério de Kaiser devem-se manter os 4 primeiros CPs, que juntos explicam 95,9% da variabilidade amostral total.

A interpretação dos componentes principais é feita com base nas correlações entre as

variáveis padronizadas e os componentes, e nos coeficientes dados pelas combinações lineares que resultam nos CPs. A Tabela 3 apresenta os coeficientes de correlação $r_{\hat{y}_i, z_k} = \hat{e}_{ik} \sqrt{\hat{e}_i} / \sqrt{r_k}$, para $i = 1, 2, 3$ e 4 , e $k = 1, 2, \dots, 12$.

Tabela 3: Coeficientes de correlação entre as variáveis padronizadas e os CPs

$r_{\hat{y}_i, z_k}$	Z_ϕ	$Z_{\phi_{mag}}$	Z_ϵ	$Z_{\epsilon_{mag}}$	Z_h	Z_H
\hat{y}_1	0,786	0,777	0,147	0,215	-0,828	-0,821
\hat{y}_2	-0,486	-0,521	0,653	0,603	-0,386	-0,390
\hat{y}_3	-0,290	-0,271	-0,411	-0,435	-0,388	-0,402
\hat{y}_4	0,167	0,134	0,619	0,633	0,096	0,098
$r_{\hat{y}_i, z_k}$	Z_T	Z_P	Z_{ZTD}	Z_{MP1}	Z_{MP2}	Z_{F_p}
\hat{y}_1	0,852	0,810	0,938	0,101	0,089	0,735
\hat{y}_2	-0,258	0,409	0,018	0,392	0,415	-0,384
\hat{y}_3	-0,246	0,404	0,283	-0,555	-0,601	-0,453
\hat{y}_4	-0,079	-0,079	-0,092	-0,671	-0,633	0,051

A partir das correlações entre as variáveis padronizadas e o 1º CP e dos coeficientes do 1º CP, tem-se que o primeiro componente principal pode ser interpretado como uma “média” entre as variáveis: latitude geodésica, latitude geomagnética, altitude geométrica, altitude ortométrica, temperatura, pressão atmosférica, ZTD e índice F_p , desprezando o sinal dos coeficientes, excluindo assim as variáveis longitude geodésica, longitude geomagnética, MP1 e MP2, o que corrobora com o fato dessas variáveis apresentarem os menores coeficientes de correlação com as demais variáveis (conforme pode ser verificado na matriz R), bem como as que menos contribuem na composição do 1º CP (Tabela 3). Em contrapartida, destacam-se as altas contribuições das variáveis ϕ , ϕ_{mag} , h , H , T , P , ZTD e F_p na composição do 1º CP. Nota-se também que os sinais dos coeficientes das componentes altimétricas foram opostos aos sinais das demais variáveis, o que indica que a altitude geométrica e a altitude ortométrica podem ser agrupadas num grupo específico, diferenciando das demais variáveis.

O 2º CP pode ser identificado como o

componente ionosférico, pois os coeficientes das variáveis latitudes geodésica e geomagnética, altitude geométrica, altitude ortométrica, temperatura (menor contribuição) e índice F_p se diferenciam (sinais contrários) dos coeficientes das demais variáveis.

De modo análogo, o 3º CP consiste no componente troposférico, onde pressão atmosférica e atraso zenital troposférico apresentam coeficientes opostos às demais variáveis padronizadas. Apesar do ZTD ser influenciado também pela temperatura e altimetria, a análise de CP dos dados mostraram que apenas a pressão atmosférica influencia de forma significativa a troposfera.

Já o 4º CP pode ser interpretado também como uma “média” das variáveis: longitude geodésica, longitude geomagnética, MP1 e MP2 (desprezando o sinal), ou seja, as variáveis que menos se associam com as demais. Ao mesmo tempo, esse componente pode também ser identificado pelo agrupamento das variáveis relativas à longitude (longitude geodésica e geomagnética) e pelo agrupamento das variáveis relacionadas com o multicaminho dos sinais GNSS (MP1 e MP2).

Portanto, a partir da análise de componentes principais, das 12 variáveis analisadas pode-se trabalhar com apenas 4 CPs, facilitando o tratamento, a manipulação matemática e a interpretação. Com apenas 4 CPs garante-se 95,9% da variabilidade amostral total, o que explica uma parcela substancial das informações do conjunto original.

3.3 Análise Fatorial Principal

A análise fatorial principal da matriz de correlação amostral R é especificada em termos de seus pares de autovalor e autovetor $(\tilde{\epsilon}_1, \tilde{\epsilon}_1)$, $(\tilde{\epsilon}_2, \tilde{\epsilon}_2)$, ..., $(\tilde{\epsilon}_p, \tilde{\epsilon}_p)$ (JOHNSON & WICHERN, 2007). Análogo à seção 3.2, foram mantidos os 4 primeiros fatores comuns (F_1, F_2, F_3 e F_4), que juntos explicam 95,9% da variabilidade amostral total.

A comunalidade \tilde{h}_i^2 (parte da variância da i -ésima variável que está relacionada com os 4 fatores comuns) de cada variável padronizada é obtida por (JOHNSON & WICHERN, 2007):

$$\tilde{h}_i^2 = \sum_{j=1}^4 \tilde{h}_{ij}^2, p/ i=1, 2, \dots, 12 \quad (10)$$

As variâncias específicas $\tilde{\delta}_i$ (contribuição dos fatores específicos) são determinadas por (JOHNSON & WICHERN, 2007):

$$\tilde{\Psi}_i = 1 - \tilde{h}_i^2, p/ i=1, 2, \dots, 12 \quad (11)$$

A matriz de cargas fatoriais \tilde{L} é apresentada a seguir. Já a Tabela 4 resume todos os resultados obtidos pela análise fatorial principal, com rotação ortogonal Varimax. Na sequência é mostrada, também, a matriz residual do modelo.

Analisando os elementos da matriz residual (Equação 13) observa-se que os elementos da diagonal principal são praticamente nulos e os demais elementos são muito pequenos, o que traduz que o modelo com 4 fatores comuns é apropriado analiticamente para representar os dados originais.

Igualmente à análise de componentes principais, a análise de fatorial principal com 4 fatores explica 95,9% da variância amostral total, o que significa uma parcela substancial das informações do conjunto original.

Observando as comunalidades (Tabela 4), as mesmas indicam que 4 fatores explicam quase que a totalidade da variância amostral de cada variável, corroborado pelos baixos valores das variâncias específicas.

Por meio das cargas fatoriais pode-se concluir que o primeiro fator F_1 pode ser denominado de fator troposférico, devido aos elevados valores das cargas para as variáveis: altitude geométrica (-0,979), altitude ortométrica (-0,982), pressão atmosférica (0,980) e atraso zenital troposférico (0,844), variáveis essas diretamente relacionadas com a camada troposférica. Sabe-se também que a temperatura influencia no comportamento da troposfera, mas a partir dos resultados observou-se que a mesma contribui menos (0,379) que as demais variáveis, o que indica que a pressão atmosférica pode exercer um maior peso que a temperatura na modelagem da camada troposférica. Nota-se que a altimetria é inversamente proporcional à temperatura, pressão e ZTD, ou seja, à medida que a altitude aumenta a temperatura, pressão e o atraso diminuem. Pode-se concluir também que, independente do tipo de variável altimétrica (altitude geométrica ou ortométrica) considerado, a magnitude da contribuição é a mesma.

$$\tilde{L} = \begin{bmatrix} \tilde{l}_{1,1} & \tilde{l}_{1,2} & \tilde{l}_{1,3} & \tilde{l}_{1,4} \\ \tilde{l}_{2,1} & \tilde{l}_{2,2} & \tilde{l}_{2,3} & \tilde{l}_{2,4} \\ \tilde{l}_{3,1} & \tilde{l}_{3,2} & \tilde{l}_{3,3} & \tilde{l}_{3,4} \\ \tilde{l}_{4,1} & \tilde{l}_{4,2} & \tilde{l}_{4,3} & \tilde{l}_{4,4} \\ \tilde{l}_{5,1} & \tilde{l}_{5,2} & \tilde{l}_{5,3} & \tilde{l}_{5,4} \\ \tilde{l}_{6,1} & \tilde{l}_{6,2} & \tilde{l}_{6,3} & \tilde{l}_{6,4} \\ \tilde{l}_{7,1} & \tilde{l}_{7,2} & \tilde{l}_{7,3} & \tilde{l}_{7,4} \\ \tilde{l}_{8,1} & \tilde{l}_{8,2} & \tilde{l}_{8,3} & \tilde{l}_{8,4} \\ \tilde{l}_{9,1} & \tilde{l}_{9,2} & \tilde{l}_{9,3} & \tilde{l}_{9,4} \\ \tilde{l}_{10,1} & \tilde{l}_{10,2} & \tilde{l}_{10,3} & \tilde{l}_{10,4} \\ \tilde{l}_{11,1} & \tilde{l}_{11,2} & \tilde{l}_{11,3} & \tilde{l}_{11,4} \\ \tilde{l}_{12,1} & \tilde{l}_{12,2} & \tilde{l}_{12,3} & \tilde{l}_{12,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\tilde{e}_1} \tilde{e}_{1,1} & \sqrt{\tilde{e}_2} \tilde{e}_{1,2} & \sqrt{\tilde{e}_3} \tilde{e}_{1,3} & \sqrt{\tilde{e}_4} \tilde{e}_{1,4} \\ \sqrt{\tilde{e}_1} \tilde{e}_{2,1} & \sqrt{\tilde{e}_2} \tilde{e}_{2,2} & \sqrt{\tilde{e}_3} \tilde{e}_{2,3} & \sqrt{\tilde{e}_4} \tilde{e}_{2,4} \\ \sqrt{\tilde{e}_1} \tilde{e}_{3,1} & \sqrt{\tilde{e}_2} \tilde{e}_{3,2} & \sqrt{\tilde{e}_3} \tilde{e}_{3,3} & \sqrt{\tilde{e}_4} \tilde{e}_{3,4} \\ \sqrt{\tilde{e}_1} \tilde{e}_{4,1} & \sqrt{\tilde{e}_2} \tilde{e}_{4,2} & \sqrt{\tilde{e}_3} \tilde{e}_{4,3} & \sqrt{\tilde{e}_4} \tilde{e}_{4,4} \\ \sqrt{\tilde{e}_1} \tilde{e}_{5,1} & \sqrt{\tilde{e}_2} \tilde{e}_{5,2} & \sqrt{\tilde{e}_3} \tilde{e}_{5,3} & \sqrt{\tilde{e}_4} \tilde{e}_{5,4} \\ \sqrt{\tilde{e}_1} \tilde{e}_{6,1} & \sqrt{\tilde{e}_2} \tilde{e}_{6,2} & \sqrt{\tilde{e}_3} \tilde{e}_{6,3} & \sqrt{\tilde{e}_4} \tilde{e}_{6,4} \\ \sqrt{\tilde{e}_1} \tilde{e}_{7,1} & \sqrt{\tilde{e}_2} \tilde{e}_{7,2} & \sqrt{\tilde{e}_3} \tilde{e}_{7,3} & \sqrt{\tilde{e}_4} \tilde{e}_{7,4} \\ \sqrt{\tilde{e}_1} \tilde{e}_{8,1} & \sqrt{\tilde{e}_2} \tilde{e}_{8,2} & \sqrt{\tilde{e}_3} \tilde{e}_{8,3} & \sqrt{\tilde{e}_4} \tilde{e}_{8,4} \\ \sqrt{\tilde{e}_1} \tilde{e}_{9,1} & \sqrt{\tilde{e}_2} \tilde{e}_{9,2} & \sqrt{\tilde{e}_3} \tilde{e}_{9,3} & \sqrt{\tilde{e}_4} \tilde{e}_{9,4} \\ \sqrt{\tilde{e}_1} \tilde{e}_{10,1} & \sqrt{\tilde{e}_2} \tilde{e}_{10,2} & \sqrt{\tilde{e}_3} \tilde{e}_{10,3} & \sqrt{\tilde{e}_4} \tilde{e}_{10,4} \\ \sqrt{\tilde{e}_1} \tilde{e}_{11,1} & \sqrt{\tilde{e}_2} \tilde{e}_{11,2} & \sqrt{\tilde{e}_3} \tilde{e}_{11,3} & \sqrt{\tilde{e}_4} \tilde{e}_{11,4} \\ \sqrt{\tilde{e}_1} \tilde{e}_{12,1} & \sqrt{\tilde{e}_2} \tilde{e}_{12,2} & \sqrt{\tilde{e}_3} \tilde{e}_{12,3} & \sqrt{\tilde{e}_4} \tilde{e}_{12,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,787 & -0,486 & -0,290 & 0,167 \\ 0,778 & -0,521 & -0,271 & 0,134 \\ 0,147 & 0,653 & -0,410 & 0,619 \\ 0,216 & 0,603 & -0,434 & 0,633 \\ -0,829 & -0,386 & -0,388 & 0,096 \\ -0,820 & -0,390 & -0,402 & 0,099 \\ 0,853 & -0,259 & -0,246 & -0,078 \\ 0,810 & 0,409 & 0,404 & -0,079 \\ 0,940 & 0,019 & 0,283 & -0,091 \\ 0,100 & 0,392 & -0,556 & -0,671 \\ 0,089 & 0,415 & -0,601 & -0,632 \\ 0,734 & -0,384 & -0,454 & 0,052 \end{bmatrix} \tag{12}$$

Tabela 4: Resultados obtidos pela análise fatorial principal com rotação Varimax

Variável	Cargas Fatoriais				Comunalidade \tilde{h}_i^2	Variância Específica $\tilde{\theta}_i$
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄		
ϕ	0,175	0,963	-0,032	0,090	0,968	0,032
ϕ_{mag}	0,169	0,965	0,020	0,092	0,968	0,032
λ	0,072	-0,019	-0,995	-0,060	1,000	0,000
λ_{mag}	0,084	0,068	-0,993	-0,049	1,000	0,000
h	-0,979	-0,172	0,087	0,040	0,997	0,003
H	-0,982	-0,157	0,080	0,035	0,997	0,003
T	0,379	0,834	0,011	-0,151	0,861	0,137
P	0,980	0,141	-0,103	-0,027	0,992	0,008
ZTD	0,844	0,502	0,071	0,037	0,972	0,028
MP1	0,041	0,016	-0,024	-0,959	0,923	0,077
MP2	0,012	0,020	-0,081	-0,966	0,941	0,059
F _p	0,111	0,928	-0,078	-0,124	0,896	0,104
Variância	3,8255	3,7477	2,0203	1,9195	11,5130	-

$$R - (\tilde{L}^* \tilde{L}^* + \tilde{\theta}) = \begin{bmatrix} 0,001 & & & & & & & & & & & & & \\ 0,032 & -0,001 & & & & & & & & & & & & \text{Simét.} \\ 0,001 & 0,002 & 0,001 & & & & & & & & & & & \\ 0,002 & 0,003 & 0,000 & -0,000 & & & & & & & & & & \\ 0,001 & 0,001 & 0,001 & 0,001 & -0,000 & & & & & & & & & \\ 0,003 & 0,003 & 0,001 & 0,001 & 0,003 & 0,000 & & & & & & & & \\ -0,037 & -0,038 & 0,002 & 0,000 & 0,003 & 0,002 & 0,001 & & & & & & & \\ -0,001 & -0,001 & -0,001 & -0,000 & 0,002 & 0,001 & 0,004 & 0,000 & & & & & & \\ 0,015 & 0,014 & -0,000 & 0,002 & 0,003 & 0,004 & -0,043 & -0,006 & 0,001 & & & & & \\ 0,026 & 0,026 & 0,003 & 0,003 & 0,006 & 0,008 & -0,019 & 0,002 & 0,012 & 0,001 & & & & \\ -0,009 & -0,008 & -0,003 & -0,003 & -0,006 & -0,006 & -0,009 & -0,003 & -0,002 & -0,062 & 0,001 & & & \\ -0,039 & -0,041 & -0,006 & -0,005 & -0,006 & -0,010 & -0,024 & -0,000 & -0,003 & -0,042 & 0,023 & 0,001 & & \end{bmatrix} \tag{13}$$

O fator F₂ pode ser nomeado de fator ionosférico. Observando as cargas fatoriais de F₂ nota-se que somente as variáveis relacionadas com a ionosfera apresentaram altos valores: latitude geodésica (0,963), latitude geomagnética (0,965) e índice F_p (0,928), com exceção das variáveis ZTD (0,502) e temperatura (0,834). A elevada carga fatorial da temperatura se deve, possivelmente, a uma similaridade entre a temperatura medida na superfície terrestre e a radiação solar no Extremo Ultravioleta (EUV) e raios-X, responsável pela

produção de elétrons livres, pois a intensidade da faixa do espectro da radiação solar que afeta a temperatura na superfície também pode ter uma variação similar à faixa da radiação solar do EUV e raios-X. Já em relação à carga fatorial do ZTD, pode-se levantar a hipótese de que a variabilidade da densidade de elétrons pode possuir uma possível parcela de contribuição na determinação do ZTD; entretanto, estudos e pesquisas mais detalhadas a cerca do tema são necessárias para obter conclusões mais plausíveis.

Já o fator F_3 pode ser considerado o fator de longitude, pois somente as cargas das longitudes geodésica (-0,995) e geomagnética (-0,993) se sobressaíam em relação às demais variáveis. Conforme podem ser verificadas pelas correlações da matriz R, as longitudes são as variáveis que menos se associam com as outras, o que traduz num fator exclusivo para elas.

Por fim, o quarto fator (F_4) pode ser denominado de fator multicaminho, devido aos elevados valores das cargas para as variáveis MP1 (-0,959) e MP2 (-0,966), em detrimento às demais. Observa-se também que o multicaminho possivelmente sofre sensíveis efeitos da temperatura (-0,151) e da camada ionosférica (-0,124), fato este interessante a ser estudado em trabalhos futuros.

Observando a porcentagem da variância amostral total explicada por cada fator comum, verifica-se a semelhança com as maiores fontes de erros sistemáticos na propagação dos sinais GNSS: troposfera (31,9%), ionosfera (31,2%) e multicaminho (16,0%).

Portanto, a partir da análise fatorial, das 12 variáveis analisadas pode-se trabalhar com apenas 4 fatores comuns, facilitando assim o tratamento e manipulação matemática.

3.4 Análise de Agrupamentos

Foram realizadas análises de agrupamentos para as 12 variáveis padronizadas (φ , φ_{mag} , λ , λ_{mag} , h , H , T , P , ZTD , $MP1$, $MP2$ e F_p), bem como para as 25 estações selecionadas. Em ambas as análises foram utilizadas o método hierárquico aglomerativo de Ward, considerando a distância euclidiana.

A Figura 2 apresenta o agrupamento (dendrograma) das 12 variáveis padronizadas em 5 clusters.

Na Figura 2 fica evidente o agrupamento das variáveis relacionadas à camada ionosférica (latitude geodésica e geomagnética e índice F_p), onde a distância de ligação foi inferior a 0,25.

As variáveis troposféricas, ZTD e pressão atmosférica, também foram agrupadas a uma baixa distância, indicando a forte correlação entre ambas. Pode-se observar também que a temperatura, variável que influencia a troposfera, apresentou distância de ligação um pouco maior que a pressão, indicando que a pressão pode possuir um maior fator de influência na troposfera

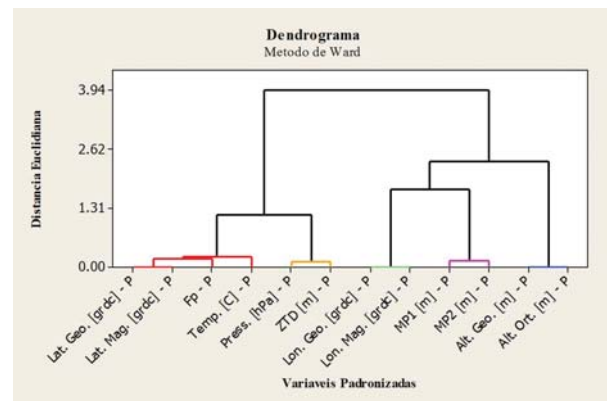


Fig. 2 - Agrupamento das 12 variáveis padronizadas em 5 clusters.

do que a temperatura. As variáveis altimétricas (altitudes geométrica e ortométrica), que também são variáveis de modelos de PNT, foram as últimas a serem inseridas no grupo, o que indica que as mesmas atuam no sentido contrário do comportamento da troposfera, isto é, a medida que a altitude aumenta, a temperatura, pressão e o valor do ZTD diminuem.

Um grupo para as variáveis de longitude (λ e λ_{mag}) e outro para as variáveis relacionadas ao multicaminho dos sinais GNSS (MP1 e MP2) foram formados. Observa-se que as distâncias de ligação desses dois grupos com os demais são altas, o que indica a exclusividade deles; essas variáveis são as que apresentam os menores valores de coeficientes de correlação com o restante das variáveis.

Com a intenção de visualizar o comportamento geográfico das variáveis relacionadas às fontes de erros nos sinais GNSS, foram realizadas três análises de agrupamentos das estações da RBMC: uma análise considerando apenas as variáveis que influenciam a ionosfera (latitude geodésica e geomagnética, F_p e, para fins investigativos, a temperatura), outra considerando as variáveis que influenciam a troposfera (altitudes geométrica e ortométrica, temperatura, pressão atmosférica e ZTD), e por fim apenas as variáveis “multicaminho” (MP1 e MP2). Os dendrogramas obtidos são apresentados nas Figuras 3, 4 e 5, sendo determinados 6 clusters para as variáveis “ionosféricas”, 3 para as “troposféricas” e 4 para “multicaminho”.

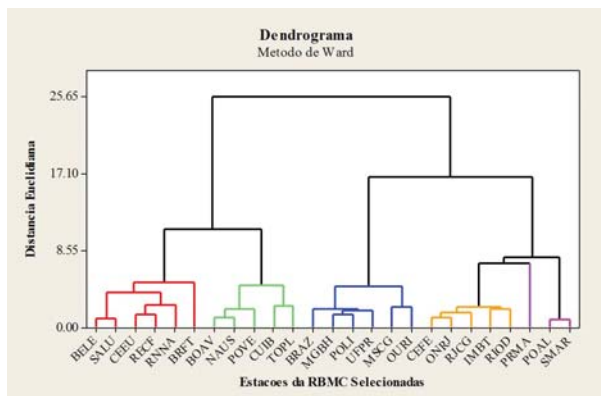


Fig. 3 - Agrupamento das estações em 6 clusters em relação à ionosfera.

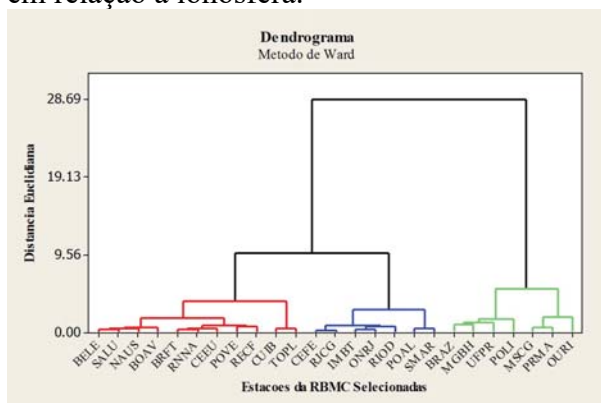


Fig. 4 – Agrupamento das estações em 3 clusters em relação à troposfera.

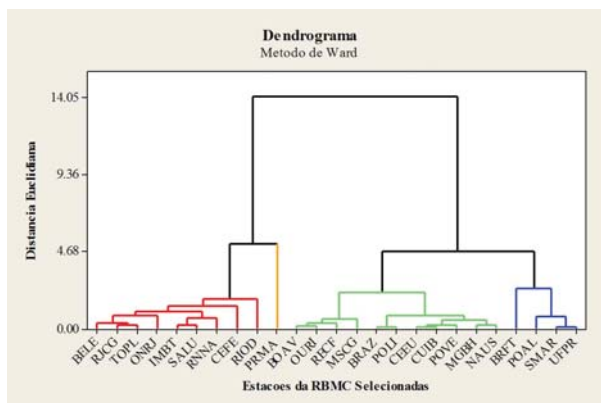


Fig. 5 – Agrupamento das estações em 4 clusters em relação ao multicaminho.

A partir do agrupamento das estações em relação à ionosfera (Figura 3), pode-se verificar que o mesmo é fidedigno com o comportamento geográfico dos elétrons na região brasileira para o dia em questão. Comparando o dendrograma (Figura 3) com o mapa de TEC (Figura 6), fornecido pelo EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial) por meio do *website* do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), observa-se a correspondência espacial das estações com

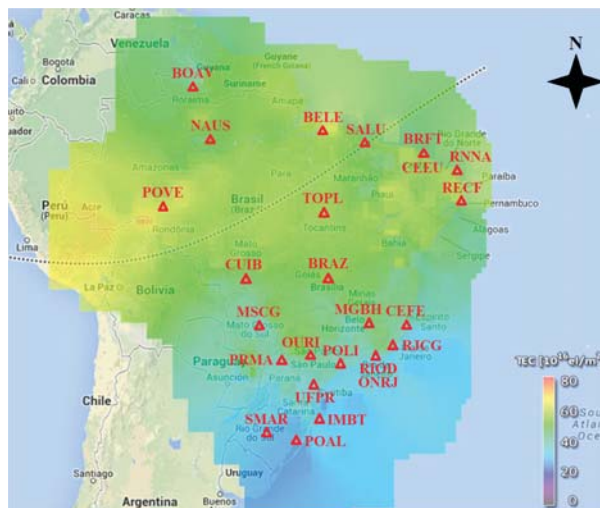


Fig. 6 – Localizações das estações RBMC selecionadas e valores de TEC para o dia 2 de agosto de 2013. Fonte: Adaptado do EMBRACE.

os níveis de TEC.

Exemplificando: as estações POAL e SMAR, localizadas na região de latitudes médias, estão livres dos efeitos da ionosfera, sendo assim agrupadas isoladamente; já o grupo de estações BRAZ, MGBH, POLI, UFPR, MSCG e OURI e o grupo CEFE, ONRJ, RJCG, IMBT e RIOD, por estarem localizadas próximas a crista sul da Anomalia de Ionização Equatorial (AIE), entre -10° e -20° de latitude geomagnética, são alocadas em agrupamentos específicos.

A única exceção do agrupamento está relacionada com a estação PRMA, que deveria ter sido incluída no grupo que contém BRAZ, MGBH, POLI, UFPR, MSCG e OURI. Essa não inclusão pode ser por algum erro no receptor da estação (provavelmente multicaminho dos sinais GNSS, cujo MP1 é 0,399 m e MP2 0,581 m).

Em relação ao “agrupamento da troposfera”, não foi possível obter conclusões plausíveis em relação ao comportamento espacial do ZTD.

O dendrograma que considera apenas as variáveis de multicaminho (Figura 5) permitiu identificar quais estações sofreram um maior efeito dos sinais refletidos. Constata-se que a estação PRMA formou um único grupo, o que vai ao encontro dos valores contidos na Tabela 1, na qual é apresentada que a referida estação obteve os maiores índices. Como o multicaminho não se trata de um erro que sofre efeitos da localização regional, mas sim local, como árvores e construções ao redor da estação, bem

como dos tipos de antenas dos receptores e das técnicas de processamento do sinal, um estudo relacionado ao campo de visão e ao modelo de receptores das estações torna-se necessário.

4. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

O uso de técnicas multivariadas (análise de componentes principais, análise fatorial e análise de agrupamentos) para a análise de um grande conjunto de variáveis, de natureza geodésica e meteorológica, foi útil, tanto do ponto de vista matemático quanto representativo.

Utilizando-se tanto a análise de componentes principais quanto análise fatorial, as 12 variáveis originais podem ser representadas por apenas 4 variáveis hipotéticas, que garantem 95,9% da variabilidade amostral total.

As análises de componentes principais, fatorial e de agrupamentos evidenciaram as relações existentes entre as variáveis estudadas: as latitudes geodésica e geomagnética e F_p apresentaram uma grande associação, caracterizando as variáveis relacionadas à ionosfera (ressalta-se a temperatura, que apresentou certa associação às variáveis supracitadas); altitude geométrica, altitude ortométrica, pressão atmosférica, temperatura e ZTD também se mostraram bem relacionadas, caracterizando a camada troposférica; MP1 e MP2 (multicaminho dos sinais GNSS) não apresentaram nenhuma relação com as demais variáveis; e, igualmente, as longitudes geodésica e geomagnética não apresentaram relações com as outras variáveis.

A análise fatorial forneceu mais informações que a análise de componentes principais; na análise fatorial cada um dos fatores comuns pode ser caracterizado, exclusivamente, como um dos tipos de erros sistemáticos: o F_1 como fator troposférico, F_2 como fator ionosférico e F_4 como fator multicaminho. O fator F_3 (longitude) consiste nas variáveis que menos se associaram com as demais. Já na análise de componentes principais, alguns CPs não incorporam as devidas variáveis para cada tipo de erro: em relação à ionosfera, a altimetria teve um peso considerável, ao passo que para troposfera não foram considerados a temperatura e a altitude geométrica e altitude ortométrica.

Em relação à troposfera, verifica-se que a pressão atmosférica pode exercer um maior peso que a temperatura na modelagem da camada, e

que não importa o tipo de variável altimétrica a ser adotado, o resultado obtido será o mesmo.

Na análise fatorial, pode-se identificar uma possível contribuição da ionosfera no atraso zenital troposférico (ZTD), algo que precisa ser investigado com mais afinco.

Devido o multicaminho ser uma fonte de erro local, dependendo principalmente do ambiente circundante a estação, pode-se comprovar a não associação das variáveis MP1 e MP2 com as demais variáveis.

As análises de agrupamentos se apresentaram como técnicas representativas interessantes para o estudo da ionosfera e multicaminho. O dendrograma obtido permitiu uma nova forma de visualização do comportamento do TEC, principalmente da anomalia equatorial, devido à alta correspondência espacial dos agrupamentos com as regiões da ionosfera. Em relação ao multicaminho, o dendrograma serviu para identificar quais estações sofreram um maior efeito dos sinais refletidos.

Apesar dos dados serem referentes à apenas um único dia (2 de agosto de 2013), os mesmos foram suficientes para obter resultados plausíveis de serem analisados. Entretanto, a consideração de um período de observações contemplando várias condições da ionosfera e troposfera pode ser mais representativa.

AGRADECIMENTOS

Às agências de fomento CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – processo 2013/19147-1) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – processos 479965/2013-7 e 309924/2013-8) pelos apoios financeiros e bolsa PQ, e ao IBGE e CPTEC pelo fornecimento dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMARGO, P. O., MONICO, J. F. G. & FERREIRA, L. D. D. Application of ionospheric corrections in the equatorial region for L1 GPS users. *Earth Planets Space*, v.52, n.11, p.1083-1089, 2000.

ESTEY L. H. & MEERTENS C. M. TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solutions*, v.3, n.1, p.42-49, 1999.

- GOUVEIA, T. A. F., SAPUCCI, L. F., MONICO, J. F. G. & ALVES, D. B. M. Robust evaluation of neutrospheric modeling over brasilian territory based on numerical weather prediction models of South American. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.20, n.3, p.481-503, 2014.
- HEISE, S., JAKOWSKI, N., WEHRENFENNIG, A., REIGBER, C. & LÜHR, H. Initial results on ionosphere/plasmasphere sounding based on GPS data obtained on board CHAMP. In: **First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies**. Springer Berlin Heidelberg, p.408-414, 2003.
- HOFMANN - WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H. & COLLINS, J. **GPS Theory and Practice**. Wien: Springer-Verlage, 4 ed., 1997. 326p.
- JOHNSON, R. A. & WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice-Hall, 6 ed., 2007.
- LEANDRO, D. Investigação do posicionamento GPS em ambientes internos com o auxílio do efeito de multicaminho. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.15, n.4, p.686-687, 2009.
- LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p.
- LIN, L. S. A novel approach to improving the accuracy of real-time ionospheric delay estimation using GPS. In: **Proceedings of The 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation - ION GPS**. p.16-19.1997.
- MATSUOKA, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira**. 2007. 263f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.
- MATSUOKA, M. T. & CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para produção de mapa da ionosfera para região brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.56, n.1, p.14-27, 2004.
- MENDILLO, M., LIN, B. & AARONS, J. The application of GPS observations to equatorial aeronomy. **Radio Science**, v.35, n.3, p.885-904, 2000.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476p.
- MUELLA, M. T. A. H., DE PAULA, E. R., KANTOR, I. J., REZENDE, L. F. C. & SMORIGO, P. F. Occurrence and zonal drifts of small-scale ionospheric irregularities over an equatorial station during solar maximum – magnetic quiet and disturbed conditions. **Advances in Space Research**, v.43, n.12, p.1957-1973, 2009.
- PEREIRA, V. A. S. & CAMARGO, P. O. Estimativa e análise de índices de irregularidades da ionosfera utilizando dados GPS de redes ativas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.19, n.3, p.374-390, 2013.
- PEREIRA, V. A. S. & CAMARGO, P. O. Programa científico para o monitoramento em tempo real ou pós-processado das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 2016. (no prelo)
- SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. 2001. 167f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- SAPUCCI, L. F., MACHADO, L. A. T. & MONICO, J. F. G. Previsões do atraso zenital troposférico para a América do Sul: variabilidade sazonal e avaliação da qualidade. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.58, n.3, 2006.
- SAPUCCI, L. F., MONICO, J. F. G., MACHADO, L. A. T., HERDIES, D. L. & SOUZA, R. A. F. D. Assimilação do IWW-GPS no Brasil: Otimização das estimativas do atraso zenital troposférico em tempo real. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.25, n.3, p.267-279, 2007.
- SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations**,

methods, and applications. 2nd. ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SOUZA, E. M. & MONICO, J. G. Efeito do Multicaminho nas Medidas de Fase e Pseudodistância GPS: Detecção e atenuação utilizando Wavelets. In: **III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas.** 2003.

SOUZA, E. M., POLEZEL, W. G. C. & MONICO, J. F. G. Avaliação do nível de multicaminho no

posicionamento relativo GPS e sua atenuação através da análise de multiresolução. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.11, n.2, p.221-234, 2005.

SPILKER, J. J. Tropospheric effects on GPS. In: Parkinson B. W.; SPILKER, J. J. **Global Positioning System: Theory and Applications**, v.1, Cambridge, American Institute of Aeronautics and Astronautics, p.517-46, 1996.