

Sistemas geodésicos de referência adotados no Brasil e a conversão dos dados geográficos para o sistema oficial SIRGAS2000: transformações e avaliação de erros

André Ferreira Borges
IGC/UFMG mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Prof. Dr. Marcos Antonio Timbó
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Marcelo Antonio Nero
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Plínio da Costa Temba
Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo

A evolução tecnológica e científica propiciou o melhoramento dos Sistemas Geodésicos de Referência (SGR) ao longo do tempo, tanto no aspecto de definição, como no de realização do sistema. Dessa maneira, o presente trabalho aborda a utilização de diferentes SGR usados no Brasil. O assunto carece de discussões consistentes com relação à produção e uso de dados cartográficos no Brasil, tendo em vista que é tema pouco conhecido ou relegado a segundo plano por muitos profissionais que lidam com análises de dados geográficos. O desconhecimento ou subestimação do SGR pode causar erros nos produtos cartográficos e nas análises decorrentes, se os dados espaciais forem transformados de maneira inadequada. Assim, os produtos cartográficos nacionais existentes estão referenciados com base em diferentes sistemas, a saber: Córrego Alegre (realizações 1961 e 1970/1972), Astro Datum Chuá, SAD69 (realização inicial, realização 1996, realização técnica Doppler ou GPS), e por último, o SIRGAS2000 (materialização 2000,4) que é o sistema oficial atualmente em vigor. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo fazer uma discussão analítica dos diversos Sistemas Geodésicos de Referência historicamente usados no Brasil e apresentar uma abordagem comparativa das discrepâncias de coordenadas entre eles com base em estudo de caso no município de Nova Lima - MG. O estudo conclui que a existência de metadados, o entendimento apropriado dos Sistemas Geodésicos de Referência e uma análise local criteriosa são indispensáveis para obter bons resultados nas análises espaciais que requerem conversão de SGR.

Palavras-chave: Geodésia, Sistema Geodésico de Referência, SIRGAS2000.

Abstract:

The evolution of science and technology permitted the improvement of Geodetic Reference Systems (SGR) over the time, in terms of definition and the system realization. In fact, this paper addresses issue related to the use of different SGR used in Brazil. The subject deserves a more consistent discussion regarding production and use of cartographic data in Brazil. This important topic is unknown or relegated to the background by many professionals who deal with spatial data and spatial analysis. The missing or underestimation of SGR can cause distortions in cartographic products and problems in resulting analyses if the data is processed improperly or misinterpreted. Thus the national cartographic products are referenced with support of different systems, namely: Córrego Alegre (realization 1961 and 1970/1972), Astro Datum Chuá, SAD69 (initial realization, 1996 realization Doppler or GPS realization), and lastly, SIRGAS2000 (materialization 2000.4) the current official system. In this context, this paper aims to describe the various existing Geodetic Reference Systems in Brazil and to make a comparative approach to coordinate discrepancies between them in Nova Lima - MG. The study concludes that the existence of metadata, the proper understanding of Geodetic Reference Systems and careful local analysis are essential for good results in spatial analyzes that require SGR conversion.

Key-Words: Geodesy, Geodetic Reference System, SIRGAS2000

andreborges2005@yahoo.com.br
mtimbo@ufmg.br
marcelo.nero@gmail.com
temba30@yahoo.com.br

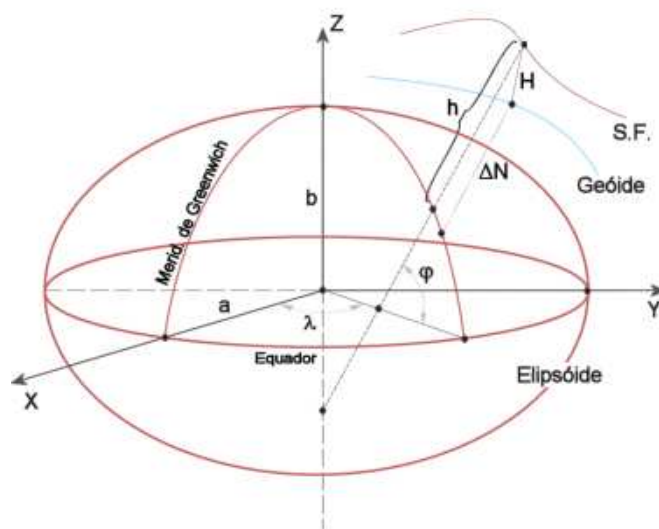
Introdução

A Geodésia é a ciência que trata da determinação do tamanho, da forma e dos parâmetros definidores do campo da gravidade da Terra (SEEBER, 1993). A forma irregular da superfície terrestre (superfície física ou topográfica) incorpora dificuldades na realização de cálculos matemáticos, resultando em problemas para sua representação cartográfica. Assim, é necessário a simplificação da forma da Terra por meio de um modelo para permitir sua representação cartográfica de forma adequada.

O geóide é a superfície de nível do campo gravitacional terrestre gerada pela perpendicular à vertical em cada ponto da superfície terrestre na altitude média do nível dos mares. Pode, ainda, ser entendido como uma superfície equipotencial coincidente com o nível médio, não perturbado dos mares, prolongado através dos continentes (SILVA e SEGANTINE, 2015). No entanto, a adoção do geóide como superfície de referência esbarra no conhecimento limitado do campo da gravidade, além de seu equacionamento matemático complexo, por conta da sua forma bastante irregular. Portanto, o geóide não é conveniente para servir como superfície de referência para as redes geodésicas horizontais e nem como modelo de representação cartográfica da Terra. Assim, considerando esses inconvenientes, o elipsóide de revolução é a figura geométrica que possibilita tratamento adequado para representação da forma da Terra, tendo em vista ser um modelo com definição matemática precisa que mais se aproxima do geóide (GEMAEL, 1999, SILVA e SEGANTINE, 2015). A Figura 1 esboça a relação entre a superfície física (SF), o geóide e o elipsóide de revolução.

Figura 1

Superfície física (SF), geóide e elipsóide



Fonte: adaptado de IBGE 2001.

Os elipsóides de revolução são definidos por parâmetros geométricos e por parâmetros físicos, como o semi-eixo maior (a), o semi-eixo menor (b), a constante gravitacional geocêntrica (GM), a velocidade angular (ω), o fator dinâmico de forma (J_2) e o achatamento do elipsóide (f). Outros elementos mostrados na Figura 1 são: a latitude geodésica (φ), a longitude geodésica (λ), a altura entre o geoide e o elipsoide (ΔN), a altitude elipsoidal (H), a altitude referida ao nível do mar (h) e os três eixos coordenados do sistema cartesiano geocêntrico (X, Y, Z).

De acordo com Monico (2008), um Sistema Geodésico de Referência (SGR) é definido com base em um conjunto de parâmetros e convenções, associados à figura de um elipsóide adequado às dimensões da Terra, constituindo um referencial apropriado para atribuição das posições de pontos sobre a superfície terrestre. A materialização do sistema é definida através da determinação de um conjunto de coordenadas de estações, obtidas por diferentes técnicas de posicionamento, criando a estrutura ou rede de referência. Constitui-se em um Sistema Terrestre Convencional (CTS - Conventional Terrestrial System) associado às constantes geométricas e físicas do campo gravitacional. Trata-se de um sistema cartesiano geodésico com origem no centro de massa da Terra definido por modelos, parâmetros e constantes derivados a partir de observações do campo da gravidade terrestre e de observações de satélites (TORGE, 2001).

A evolução tecnológica propiciou o melhoramento dos SGR's ao longo do tempo, tanto no aspecto de definição do sistema, como no de sua realização (conjunto de pontos com coordenadas conhecidas implantados sobre a superfície física da Terra para dar materialidade ao sistema). Assim, os produtos cartográficos nacionais, gerados em diferentes épocas, estão referenciados com base em diferentes sistemas, a saber: Córrego Alegre (realizações 1961 e 1970/1972), Astro Datum Chuá, SAD69 (realização inicial, realização 1996, realização técnica Doppler ou GPS), e por último, o SIRGAS2000 que é o sistema oficial em vigor atualmente.

O conhecimento das características intrínsecas desses sistemas, a quantificação das diferenças entre eles e as formas adequadas de conversões dos dados são aspectos muito importantes para a qualidade dos estudos e análises cartográficas. Assim, o objetivo deste trabalho é proporcionar uma visão adequada dos fatores que envolvem o problema, destacando sua importância prática e indicando métodos e ferramentas apropriadas para lidar com essa importante questão. Os dados e análises são focados em um estudo de caso no município de Nova Lima, MG.

Sistema Córrego Alegre

O Datum Córrego Alegre foi oficialmente adotado no Brasil na década de 1950 e utilizado até a década de 1970. Na definição deste sistema adotou-se como superfície de referência o Elipsóide Internacional de Hayford de 1924, caracterizado por um semi-eixo maior (a) de 6.378.388 m e um achatamento (f) de 1/297. Como ponto origem foi escolhido o vértice Córrego Alegre da rede de triangulação geodésica nacional, situado em Minas Gerais, no qual o posicionamento e a orientação do elipsóide de referência foram feitos astronomicamente. Neste vértice adotaram-se valores nulos para as componentes do desvio da vertical e para a ondulação geoidal. Existem duas materializações do sistema Córrego Alegre, a materialização de 1961 e a materialização de 1970/1972 (IBGE, 1996).

No Brasil ainda existe uma grande quantidade de documentos cartográficos e dados de coordenadas referenciados ao Sistema Córrego Alegre. Essas informações cartográficas vêm sendo gradativamente atualizadas e novos produtos têm sido gerados com base neste sistema. Dalazoana (2001) reporta que a realização do Sistema Córrego Alegre, de precisão compatível com as técnicas e equipamentos da época, associada à baixa precisão da densificação do apoio terrestre, faz com que os produtos gerados com base neste sistema, principalmente os de escalas maiores que 1/10.000, apresentem qualidade posicional inferior, quando comparados aos produtos gerados com base em sistemas de referência e tecnologias mais atuais. Problemas de qualidade posicional dessa natureza foram estudados e relatados por Borges et al. (2015) em estudos relacionados a incertezas na divisas territoriais entre os municípios de Nova Lima e Belo Horizonte. Esses processos de conversão de SGR afetam, na prática, muitos órgãos públicos e usuários gerais de dados espaciais. Podem ser citados os casos exemplares da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) que faz a migração do sistema Córrego Alegre para o SIRGAS2000 e da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte com a migração do sistema SAD69 para o SIRGAS2000.

Sistema SAD69

O South American Datum 1969 (SAD69) foi adotado como sistema de referência oficial no Brasil no final da década de 1970, tomando como modelo geométrico da Terra, o Elipsóide de Referência Internacional de 1967 ($a=6.378.160\text{m}$ e $f=1/298,25$) e como ponto de origem, o vértice geodésico Chuá em Minas Gerais. O SAD69 foi estabelecido antes do surgimento das técnicas espaciais de posicionamento, baseadas em satélites (IBGE, 1989). Assim, corresponde a um sistema de referência clássico, cuja materialização foi realizada através de metodologias de posicionamento terrestre. Além disso, possui caráter regional ou local, não existindo coincidência entre o centro do elipsóide e o centro de massa da Terra (IBGE, 1989).

O primeiro ajuste realizado em ambiente computacional, para o estabelecimento do SAD69, foi realizado pelo Defense Mapping Agency (DMA), órgão gestor dos serviços geodésicos dos Estados Unidos (IBGE, 1996). Ainda na década de 1970, iniciou-se no Brasil o uso do sistema TRANSIT, que foi o primeiro sistema de posicionamento e navegação por satélite a ser usado operacionalmente. Em 1991, o IBGE adotou o uso do Global Positioning System (GPS) em seus trabalhos geodésicos, e a partir de 1994 começaram a ser implantadas redes estaduais GPS de alta precisão (COSTA, 1999b).

Em 1996 foi concluído pelo IBGE, o reajustamento da rede geodésica brasileira, amparando-se nas novas técnicas de posicionamento por observação de satélites GPS. Foram utilizadas todas as observações de natureza angular e linear da rede clássica e as observações GPS ponderadas de acordo com suas precisões. A ligação entre as duas redes foi feita por meio de 49 estações da rede clássica, as quais foram observadas por tecnologia GPS. Este reajustamento resultou em uma nova realização (novas coordenadas) para as estações da Rede Planimétrica Brasileira. Com os resultados do ajustamento desenvolvido foi obtido, pela primeira vez, um retrato consistente da qualidade da rede, a qual foi consideravelmente melhorada em função do tratamento global (IBGE, 1996).

A partir de 1997, o IBGE começou a divulgar somente as coordenadas na nova realização do SAD69 acompanhadas de seus desvios-padrão, o que proporcionou ao usuário o conhecimento acerca da qualidade das coordenadas das estações. De acordo com IBGE (1996), o deslocamento horizontal das coordenadas aumenta proporcionalmente com a distância do ponto origem, chegando a atingir cerca de 15 m.

Sistema SIRGAS2000

O projeto SIRGAS teve início em 1993, com a finalidade de estabelecer um sistema de referência geocêntrico para a América do Sul. Foi decidido adotar o elipsóide GRS80 ($a=6.378.137$ m e $f=1/298,257222101$), além de estabelecer e manter uma rede de referência. Diferentemente do SAD69 e Córrego Alegre, denominados topocêntricos, sua origem é no centro de massas da Terra. Entre os meses de maio e junho de 1995 realizou-se a primeira parte do projeto, formando uma rede GPS de precisão com 58 estações para toda a América do Sul, onde suas coordenadas estão referidas ao ITRF94, época 1995,4.

A Resolução do IBGE N°1/2005 de 25/02/2005 estabeleceu o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), em sua realização do ano de 2000 (SIRGAS2000), como novo SGR para o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e para o Sistema Cartográfico Nacional (SCN). Foi concedido um período de transição não superior a dez anos (já expirado em 2015), onde o SIRGAS2000 pode ser utilizado em concomitância com o SAD69 para o SCN. Com essa adoção garante-se a qualidade dos levantamentos GPS, devido à necessidade de um sistema de referência geocêntrico compatível com a precisão dos métodos e técnicas de posicionamento atuais e com os demais sistemas adotados em outros países (ZANETTI, 2006).

Para a implantação do sistema foram utilizadas 21 estações de referência da rede continental SIRGAS2000, estabelecidas no Brasil e a estação SMAR, pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC). O referencial altimétrico do SIRGAS2000 coincide com a superfície equipotencial do campo da gravidade da Terra que contém o nível médio do mar, definido pelas observações maregráficas de Imbituba, litoral de Santa Catarina.

O World Geodetic System 84 (WGS 84) é o sistema de referência empregado pelo sistema GPS (MONICO, 2000), sendo compatível, em todos os aspectos práticos, com o SIRGAS2000, tendo em vista que as diferenças entre as coordenadas desses dois sistemas é inferior a 0,01 m (IBGE, 2005). Realizaram-se três atualizações para melhorar a sua precisão, sendo que a primeira recebeu a denominação WGS 84 (G730), onde a letra “G” indica o uso da técnica GPS e “730” faz referência à semana GPS da solução. A segunda versão chama-se WGS 84 (G873). A terceira e atual versão é denominada WGS 84 (G1150), podendo ser considerado coincidente com o ITRF2000 com nível de precisão de um centímetro. Portanto, o WGS 84 (G1150) possui características muito próximas do SIRGAS2000, podendo ambos, para efeitos práticos da cartografia, serem considerados como equivalentes.

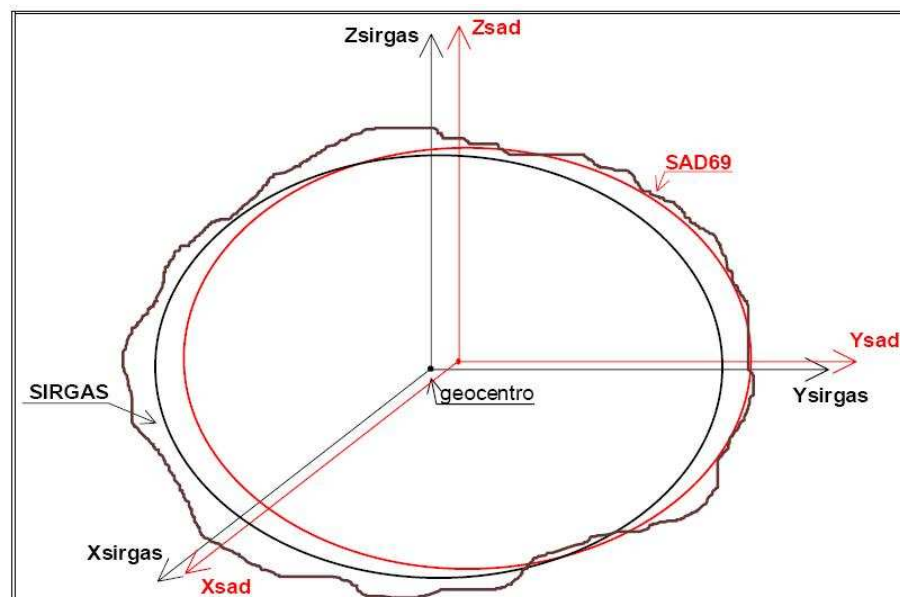
Transformação de sistemas

A transformação entre diferentes sistemas de referência se dá por meio de parâmetros de transformação. No Brasil, os parâmetros são recomendados e divulgados sob a responsabilidade oficial do IBGE. A resolução PR nº 22, de 21 de julho de 1983, definiu os parâmetros de transformação entre os sistemas Córrego Alegre e SAD69. A resolução traz especificações e normas gerais e estabelece tolerâncias e critérios para a execução de Levantamentos Geodésicos no território brasileiro, define como modelo matemático, para a transformação de coordenadas, as equações diferenciais simplificadas de Molodensky (IBGE, 2005).

A Resolução nº 23, de 21 de fevereiro de 1989, que altera o Apêndice II da Resolução PR 22/83, definiu os parâmetros oficiais para a transformação de WGS84 (World Geodetic System 1984) para SAD69. É importante ser ressaltado que estes parâmetros foram estimados com base na realização inicial de ambos os sistemas.

A Figura 2 ilustra a diferença conceitual na definição dos referenciais SAD69/96 e SIRGAS2000, identificando certas incoerências entre o sistema de referência adotado no GPS, o WGS84 (compatível com SIRGAS2000), e os respectivos referenciais existentes, associados a uma figura geométrica da Terra não geocêntrica, como é o caso do SAD69.

Figura 2 Diferença conceitual entre os referenciais SAD69/96 e WGS84.



Fonte: IBGE 2001.

A transformação de coordenadas em sistemas geodésicos diferentes pode ser feita pelas equações simplificadas de Molodensky, pela transformação de coordenadas geodésicas em coordenadas cartesianas tridimensionais ou ainda usando a transformação de Bursa-Wolf (FERNANDES e RÖSCH, 2008; FERNANDES, 2009; OLIVEIRA, 2015). É importante destacar que estas transformações, por quaisquer dos modelos, não corrigem as incoerências de precisão inerentes às realizações dos sistemas, nem das distorções das redes (ZANETTI, 2006).

Os parâmetros de transformação entre o SAD69 e o SIRGAS2000 foram divulgados na resolução 01/2005 do IBGE. O Quadro 1 apresenta os parâmetros de transformação, usados no Brasil, entre os sistemas geodésicos Córrego Alegre, SAD69 e SIRGAS2000 para coordenadas cartesianas tridimensionais.

Quadro 1 Parâmetros de transformação entre os SGR usados no Brasil.

EIXO	Córrego Alegre 70/72 e SAD69 Clássica	SAD69 Clássica e SIRGAS2000	SAD69/96 e SIRGAS2000	Córrego Alegre 70/72 e SIRGAS2000
ΔX	- 138,70 m	-66,87 m	-67,36 m	-206,048 m
ΔY	164,40 m	+4,37 m	3,97 m	+168,279 m
ΔZ	+ 34,40 m	-38,52 m	38,31 m	3,823 m

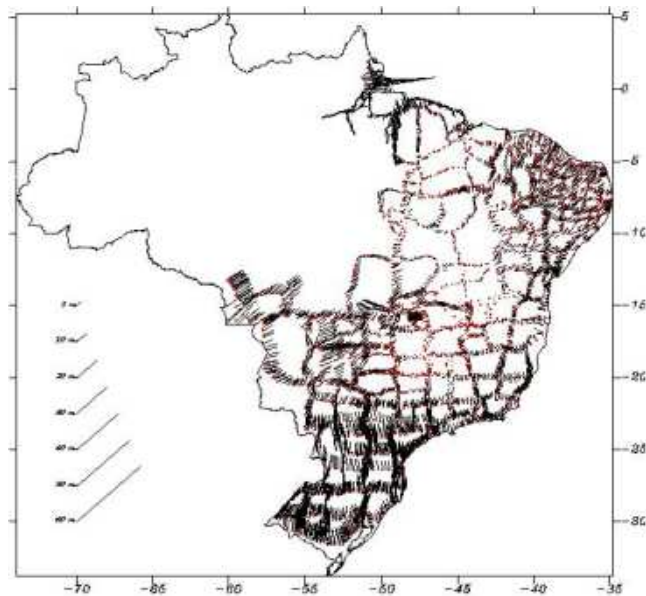
O IBGE disponibiliza o aplicativo ProGrid (IBGE, 2009) para transformação de coordenadas entre diferentes sistemas geodésicos de referência. Trata-se de um aplicativo desktop que permite a transformação de coordenadas entre os sistemas de referência oficiais em uso no Brasil: Córrego Alegre, SAD69 e SIRGAS2000. É uma ferramenta simples e objetiva, para auxiliar a comunidade de usuários de dados geoespaciais na transição para o SIRGAS2000. Com o ProGrid é possível adaptar os parâmetros oficiais adotados pelo IBGE nos softwares de GIS (Geographic Information System), bastando inserir no software a grade do ProGrid que contem valores de latitude e longitude que estão em formato NTV2 utilizado diversos países. Muitos dos programas computacionais de SIG e GPS suportam esse tipo de formato que permite a transformação direta. Entretanto, é da maior relevância o registro correto dos metadados referentes a quaisquer documentos cartográficos e dados geográficos, de forma que não haja dúvidas quanto aos SGR utilizados na elaboração desses documentos, permitindo a realização correta da transformação.

Deslocamento da rede

Segundo IBGE (2001), o sistema Córrego Alegre possui 2 realizações (1961 e 1970/72), o sistema SAD69 possui as realizações de 1977, 1996 e a realização Técnica Doppler ou GPS. O sistema escolhido e sua realização terão influência considerável nas coordenadas obtidas. A variação das coordenadas entre o SAD69 (realização inicial) e o SAD69 (realização 1996) para a rede clássica, assume amplitudes sistemáticas, conforme mostrado na Figura 3 (IBGE, 1996).

Deslocamento das coordenadas entre as realizações SAD69 e SAD69/96 do SGB.

Figura 3

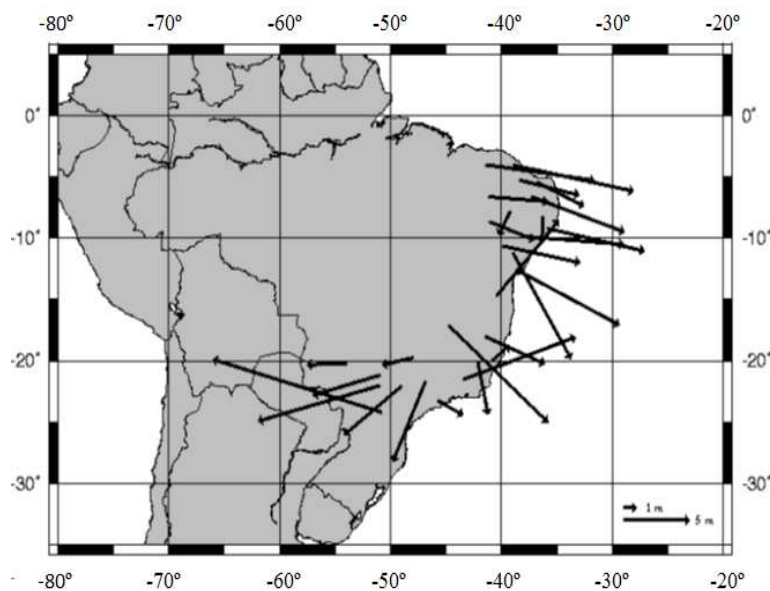


Fonte: IBGE 2001.

De acordo com a Figura 3, no estado de Minas Gerais, as diferenças entre as duas realizações do SAD69 podem chegar a 5 m e são significativas para as escalas maiores que 1:25.000. Com relação ao Córrego Alegre, estas distorções podem apresentar valores ainda maiores. A Figura 4 ilustra distorções da rede Córrego Alegre comparada com SAD69 realização inicial.

Distorções Córrego Alegre e SAD69. Fonte: adaptado de IBGE 2001.

Figura 4



Um dos problemas surgidos após o reajustamento da Rede Geodésica Brasileira (RGB) está relacionado à implantação, por parte da comunidade usuária e de empresas voltadas à produção cartográfica, de novas redes GPS e de redes empregadas para o apoio à Cartografia, a partir de pontos da rede GPS do estado (vértices estabelecidos já na era da tecnologia GPS/GNSS) e de pontos da rede clássica (obtidos antes da era GPS). Estas novas redes são vinculadas à antiga ou à nova realização do SAD69. Esta situação produziu muitos conflitos, ruídos e confusões, portanto é justificada a preocupação no sentido de caracterizar cada uma das redes e produtos derivados, principalmente, pela falta de conhecimento de muitos usuários em relação às transformações ocorridas (FREITAS et. al., 2004).

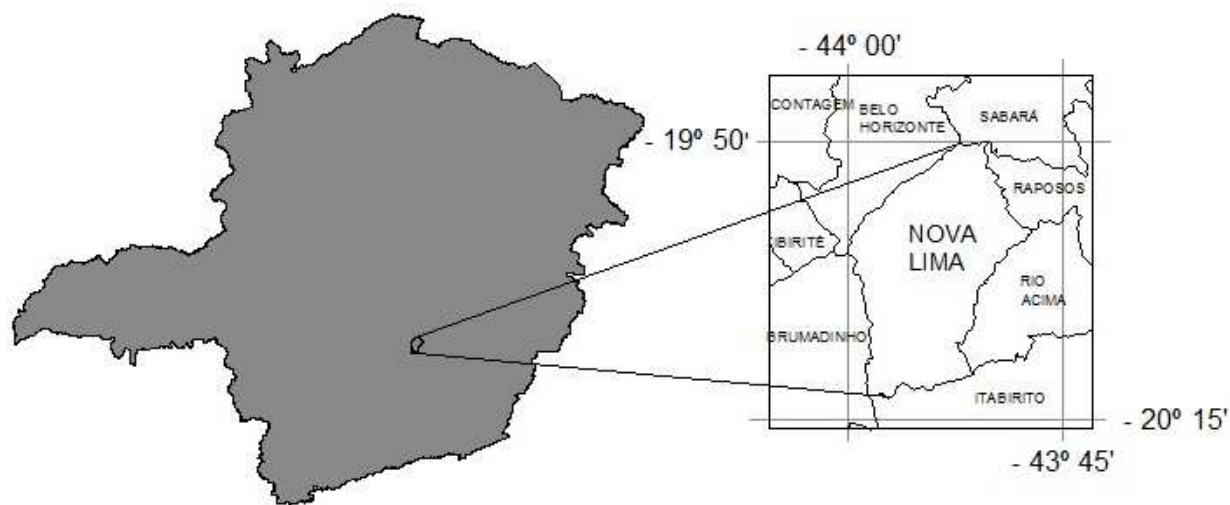
Dalazona (2001) destaca que a caracterização dos produtos derivados é importante para garantir respostas às seguintes questões: a) a que rede e a que realização do SAD69 o produto está vinculado? b) qual a precisão esperada para o produto? Além disso, a caracterização é de extrema importância no contexto da transição para um referencial geocêntrico, uma vez que as variações entre as duas realizações do SAD69 são significativas para determinadas escalas em função da rede de referência empregada (rede clássica ou rede GPS).

A evolução, o desenvolvimento matemático e a utilização de transformações de sistemas geodésicos (datum) é um assunto bem documentado, com muitas abordagens na literatura científica das áreas de cartografia e geodésia. Há farto material disponível em livros, artigos, teses, dissertações e outros textos científicos. Para o aprofundamento do tema pode-se recomendar os trabalhos de Oliveira (1998), Costa (1999a), Costa (1999b), Dalazona (2001), Dalazona e Freitas (2002), Freitas et al. (2004), Kwon et al. (2005), Shen et al. (2006), Zanetti (2006), Fernandes e Röschi (2008), Rodrigues (2008), Fernandes (2009), Blitzkow et al. (2011), Závoti (2012), Oliveira (2015), Zeng (2015). Assim, tendo sido apresentada a fundamentação de suporte do trabalho, descreve-se em seguida a metodologia com foco em uma área de estudo.

Estudo de caso

Para demonstrar a relevância da questão, aplicar os modelos de transformação, confirmar diferenças posicionais, analisar discrepâncias e discutir os desdobramentos foi realizado um estudo envolvendo trabalho de campo e processamento dos dados no município de Nova Lima, MG. O município possui uma área de 428,45 km², e faz divisa com as cidades de Belo Horizonte, Raposos, Rio Acima, Itabirito, Brumadinho, Sabará e Ibirité, conforme ilustração na Figura 5. O estudo faz parte de um escopo mais amplo que envolve conflitos de divisas territoriais entre esses municípios por conta de diferentes fatores, dentre os quais figuram as incertezas e descaracterizações dos sistemas geodésicos de referência. Os conflitos de divisas intermunicipais foram apresentados e discutidos em Borges et al. (2015).

Figura 5 Mapa de Localização de Nova Lima - MG.



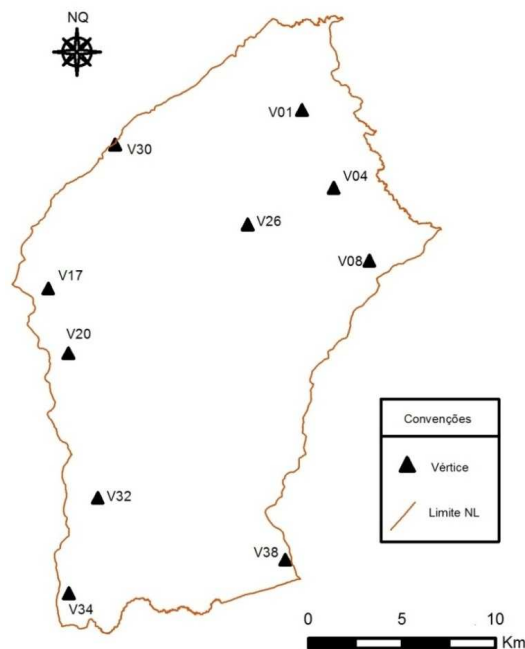
Fonte: Borges et al. (2015)

Para a coleta, processamento de dados e geração de mapas utilizou-se no trabalho um par de receptores do sistema GPS de dupla-frequência, Marca Promark 500 da Ashtech, software GNSS Solutions, software PROGRID, software AUTOCAD2010 e software ARCGIS10.1.

No processo de verificação das diferenças entre as coordenadas nos diversos sistemas geodésicos de referência, utilizou-se de vértices geodésicos fisicamente materializados e distribuídos pelo território do município de Nova Lima. Os pontos possuem clara identificação em campo, pois fazem parte de uma malha de vértices geodésicos para servir de amarração a levantamentos topográficos e cadastrais, além de servir de base de apoio cartográfico para o município. As coordenadas dos vértices foram determinadas com uso de receptores GPS geodésicos, apoiados na técnica de posicionamento estático. Cada vértice foi rastreado por um período que variou de 40 minutos a 2 horas, e os pontos foram reocupados 2 vezes. Em cada ponto existe uma placa de bronze com a descrição: "Protegido por Lei", referenciados no sistema geodésico SIRGAS2000.

Foram rastreados 10 vértices da malha existente selecionando-se aqueles representativos das posições com melhor distribuição espacial ao longo do perímetro do município, conforme ilustra a Figura 6. No levantamento e estabelecimento das coordenadas de cada vértice utilizou-se o sistema geodésico SIRGAS2000 e sistema de projeção UTM, fuso 23 hemisfério Sul, Meridiano Central 45° Oeste de Greenwich. O levantamento foi apoiado no posicionamento relativo referenciado à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) para garantir precisões submétricas da ordem de centímetros.

Figura 6 Localização dos vértices utilizados para medição e verificação das coordenadas.



Utilizando-se o software ProGrid, disponibilizado pelo IBGE, foi realizada a transformação de SIRGAS2000 para as duas realizações do sistema Córrego Alegre e para as três realizações do sistema SAD69. Os resultados dessa fase permitiram a comparação entre as coordenadas das estações nos diferentes SGR e uma análise crítica dos resultados.

Resultados e análises

O Quadro 2 apresenta as coordenadas UTM no sistema SIRGAS2000 dos vértices definidos para análise das posições e coordenadas, levantados em campo com uso de receptores geodésicos de sinais GPS, localizados no perímetro territorial do município de Nova Lima.

Quadro 2 Coordenadas Este e Norte, no sistema UTM, fuso 23, Sul, em SIRGAS2000 dos vértices em estudo, com os respectivos desvios padrão.

Descrição	E (m)	N (m)	σE (m)	σN (m)
V01	619761,74	7791189,08	0,005	0,005
V04	621455,21	7787035,86	0,007	0,006
V08	623362,43	7783140,02	0,009	0,008
V17	606201,56	7781656,36	0,009	0,008
V20	607280,30	7778194,84	0,009	0,007
V26	616856,98	7785077,13	0,008	0,008
V30	609773,10	7789348,65	0,010	0,006
V32	608847,78	7770471,04	0,008	0,009
V34	607299,37	7765372,06	0,008	0,007
V38	618867,20	7767167,37	0,010	0,009

As coordenadas dos vértices transformadas do sistema SIRGAS2000 para o sistema Córrego Alegre 1961 e para o sistema Córrego Alegre 1970/1972, por meio do ProGrid, são apresentadas no Quadro 3, onde são destacadas na última coluna as diferenças lineares de posicionamento entre as duas realizações do sistema Córrego Alegre.

O Quadro 4 apresenta os dados resultantes da transformação de SIRGAS2000 para as três diferentes realizações do sistema SAD69 com uso do ProGrid. As três últimas colunas destacam as diferenças lineares de posicionamento entre as três realizações do sistema SAD69.

Pode-se verificar que na região de estudo existe uma diferença média de 2,65 m entre as duas realizações do Datum Córrego Alegre, conforme Tabela 3. Com relação ao SAD69, a maior diferença encontrada ocorre entre o SAD69 clássico e o SAD69/96, apresentando valor médio de 2,18 m, conforme o Quadro 4.

Quadro 3

Coordenadas UTM e diferenças lineares de posição entre as duas realizações do sistema Córrego Alegre.

Sistema/ Descrição	Córrego Alegre 1961		Córrego Alegre (1970/1972)		Diferença (m) 61 e 70/72
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	
V01	619786,62	7791197,01	619788,89	7791195,63	2,67
V04	621480,09	7787043,77	621482,35	7787042,37	2,66
V08	623387,33	7783147,91	623389,59	7783146,49	2,67
V17	606226,40	7781664,22	606228,62	7781662,83	2,62
V20	607305,13	7778202,68	607307,36	7778201,27	2,63
V26	616881,82	7785085,02	616884,10	7785083,62	2,67
V30	609797,94	7789356,56	609800,20	7789355,20	2,64
V32	608872,60	7770478,83	608874,83	7770477,38	2,65
V34	607324,20	7765379,83	607326,40	7765378,37	2,64
V38	618892,04	7767175,15	618894,29	7767173,72	2,67
Média					2,65

Quadro 4

Dados de posição referentes às três realizações do sistema SAD69 e suas diferenças.

	SAD69 Rede Clássica		SAD69/96 Rede Clássica		SAD69 Técnica Doppler ou GPS		Diferença (metros)		
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	69 x 96	96 x GPS	69 x GPS
V01	619807,36	7791232,98	619806,63	7791234,96	619806,39	7791234,19	2,11	0,81	1,55
V04	621500,82	7787079,72	621500,10	7787081,74	621499,85	7787080,98	2,15	0,80	1,59
V08	623408,07	7783183,84	623407,33	7783185,90	623407,07	7783185,15	2,19	0,80	1,64
V17	606247,07	7781700,17	606246,47	7781702,22	606246,23	7781701,48	2,13	0,78	1,55
V20	607325,81	7778238,61	607325,21	7778240,70	607324,97	7778239,96	2,17	0,77	1,60
V26	616902,56	7785120,97	616901,88	7785123,00	616901,63	7785122,24	2,14	0,80	1,58
V30	609818,65	7789392,56	609818,01	7789394,52	609817,77	7789393,76	2,07	0,80	1,50
V32	608893,28	7770514,71	608892,70	7770516,89	608892,45	7770516,18	2,26	0,75	1,69
V34	607344,86	7765415,70	607344,29	7765417,91	607344,04	7765417,21	2,28	0,74	1,72
V38	618912,77	7767211,05	618912,11	7767213,24	618911,85	7767212,52	2,29	0,76	1,74
Média							2,18	0,78	1,61

Levando-se em conta o erro gráfico ou erro de graficismo, geralmente aceito como sendo 0,2 mm, pode-se afirmar que, sem metadados que permitam o conhecimento da realização do SGR na qual um documento cartográfico é produzido, seja em Córrego Alegre ou SAD69, tal documento cartográfico não pode ser representado em escala maior que 1/5.000, na classe "A", de acordo com o Decreto 89.817/84 que trata do Padrão de Exatidão Cartográfica (BRASIL, 1984). Essa escala associada à classe "A" correspondem a um detalhamento de representação de objetos acima de um metro. Esse rigor de qualidade posicional se torna mais exigente ainda, se for considerada a norma da CONCAR-EB (CONCAR, 2011) para a qual a escala 1/5.000 exige detalhamento de representação de feições acima de meio metro, restringindo a escala de representação para 1/10.000 ou menor.

De acordo com o Quadro 5, que mostra as diferenças lineares de posicionamento, em metros, dos diferentes SGR em relação ao SIRGAS2000, é possível verificar que a diferença entre as coordenadas em Córrego Alegre realização inicial e SIRGAS2000 apresentam uma diferença média de posicionamento de 26,06 m, enquanto a diferença de posicionamento para Córrego Alegre 1970/1972 é de 27,85 m. Com relação ao SAD69 e SIRGAS2000 as diferenças de posicionamento atingem os valores médios de 63,19 m, 64,19 m e 63,49 m, respectivamente para as três realizações do SAD69. Considerando as práticas de uso corrente e normas cartográficas vigentes as escalas de representação se tornam muito mais restritas em virtude desses valores do Quadro 5. No caso do erro gráfico de 0,2 mm e o valor máximo de 64,19 m mostrado no quadro, a representação ficaria restrita à escala de 1:320.000 ou menores.

Quadro 5 Diferença linear de posicionamento, em metros, dos diferentes SGR em relação ao SIRGAS2000.

Sistema / Vértices	Córrego Alegre 1961	Córrego Alegre 70/72	SAD69 Rede Clássica	SAD69/96 Rede Clássica	SAD69 Técnica Doppler/ GPS
V01	26,11	27,93	63,31	64,19	63,47
V04	26,11	27,91	63,28	64,19	63,47
V08	26,12	27,92	63,27	64,19	63,48
V17	26,05	27,82	63,17	64,19	63,49
V20	26,04	27,81	63,14	64,19	63,49
V26	26,06	27,89	63,24	64,19	63,47
V30	26,07	27,88	63,27	64,19	63,48
V32	26,01	27,78	63,07	64,19	63,51
V34	26,02	27,76	63,04	64,19	63,51
V38	26,03	27,82	63,12	64,19	63,50
Média	26,06	27,85	63,19	64,19	63,49

Quando se comparam dados dos SGR Córrego Alegre 1961 e SAD69, mostrados no Quadro 6, as diferenças de posicionamento atingem os valores médios de 41,47 m, 42,98 m e 42,21 m, respectivamente para as três realizações do SAD69. Comparação similar usando o Córrego Alegre 1970/1972 e SAD69 produz valores da mesma ordem de grandeza. Apesar de serem valores um pouco menores que os apresentados no Quadro 5, ainda restringiriam a escala de representação a 1:215.000 ou menores, fazendo a mesma analogia com erro gráfico de 0,2 mm.

Quadro 6 Diferença linear de posicionamento, em metros, dos SGR SAD69 em relação ao SGR Córrego Alegre 1961.

Sistemas / Vértices	SAD69 Rede Clássica	SAD69/96 Rede Clássica	SAD69 Técnica Doppler/GPS
V01	41,52	42,90	42,11
V04	41,50	42,92	42,13
V08	41,49	42,93	42,15
V17	41,47	42,97	42,21
V20	41,46	43,00	42,23
V26	41,50	42,95	42,16
V30	41,53	42,94	42,16
V32	41,41	43,04	42,30
V34	41,39	43,05	42,32
V38	41,46	43,05	42,30
Média	41,47	42,98	42,21

Considerando o contexto da área de estudo, os deslocamentos médios de 63,62 m entre SIRGAS2000 e SAD69 e de 42,22 m entre Córrego Alegre e SAD69 (deduzidos dos Quadros 5 e 6) produzem os valores gráficos correspondentes, em mm, de acordo com a escala da carta que são apresentados no Quadro 7, os quais permitem avaliar para quais escalas os deslocamentos são significativos.

Quadro 7 Valores gráficos em mm da diferença posicional entre SIRGAS2000/SAD69 e entre Córrego Alegre/SAD69 em diferentes escalas cartográficas.

Deslocamento entre SIRGAS2000 e SAD69	Escala do mapa	Deslocamento entre Córrego Alegre e SAD69
0,06	1:1.000.000	0,04
0,13	1:500.000	0,08
0,25	1:250.000	0,17
0,64	1:100.000	0,42
1,27	1:50.000	0,84
2,54	1:25.000	1,69
6,36	1:10.000	4,22
12,72	1:5.000	8,44
31,81	1:2.000	21,11
63,62	1:1.000	42,22

Estudo feito por Borges et al. (2015) reporta que a indefinição de limites municipais, causada por erros relacionados ao SGR ou pela ausência de metadados que pudessem defini-los, gerou muitos problemas para as municipalidades de Nova Lima e Belo Horizonte. Situações relacionadas à pertinência administrativa de logradouros, propriedades e regiões administrativas decorrentes da flutuação desses limites, por conta de erros de SGR, implicaram em casos recorrentes de bitributação municipal, de impedimentos na execução de melhoramentos, de obstrução na prestação de serviços públicos, de localização errônea de escolas municipais, urnas e seções eleitorais, além de outros.

Assim, os resultados e as discussões abordadas no presente estudo demonstram claramente a necessidade da informação acerca do sistema geodésico de referência utilizado e da sua realização nos documentos cartográficos ou nos dados geográficos em geral, para que os produtos derivados tenham precisão e confiabilidade. Os tempos atuais são caracterizados por novas abordagens no planejamento e na gestão do espaço geográfico onde a falta de informações, comum em épocas passadas, está sendo substituída pelo excesso de dados. Neste aspecto é muito importante o uso correto dos métodos e das ferramentas adequadas para processamento e gestão de dados geográficos, sob pena de serem produzidas análises derivadas contaminadas por imprecisões ou erros grosseiros.

Conclusões

A partir dos resultados e discussões do trabalho pode-se concluir que a qualidade da recuperação de informações espaciais pode ser afetada por muitos fatores. Um fator muito importante é a ausência de referência ou desconhecimento do Sistema Geodésico Brasileiro ou da sua realização que deu suporte ao documento cartográfico ou aos dados geográficos em geral. Ou seja, dados geográficos devem ser sempre acompanhados de metadados, no caso particular deste estudo, os metadados referentes ao SGR.

Neste contexto, dada a existência de inconsistências em toda rede Córrego Alegre e SAD69 em relação ao Sistema Geodésico Brasileiro oficial, conclui-se que a quantificação de erros e incompatibilidade provenientes do processo de conversão entre dois sistemas é uma tarefa que sempre irá demandar uma análise local criteriosa, especialmente quando estão envolvidas questões de limites territoriais municipais, estaduais e federais. O estudo deixa clara a necessidade de metadados consistentes, particularmente a informação acerca do sistema geodésico utilizado e da sua realização nos documentos cartográficos e nos dados geográficos para que as análises produzidas a partir deles tenham precisão e confiabilidade.

A adoção do SIRGAS2000 como sistema único e oficial foi um importante passo para homogeneização das informações, principalmente porque o sistema foi concebido no alicerce das tecnologias atuais de grande precisão. Desde 2015 todos os levantamentos já devem, por força de lei, serem referenciados ao SIRGAS2000, eliminando confusões decorrentes de informações cartográficas advindas de diferentes sistemas geodésicos e de suas possíveis realizações. No entanto, a transformação dos dados ainda existentes em diversos sistemas legados para o novo referencial brasileiro ainda é um trabalho árduo que deve ser realizado com acompanhamento analítico cuidadoso. Pesquisas futuras sugerem áreas mais abrangentes para melhorar a consistência dos resultados, espera-se que este estudo possa trazer contribuição na realização dessas tarefas.

Referências Bibliográficas

- BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. O. C.; GUIMARÃES, G. N.; COSTA, S. M. A. O conceito atual dos referenciais usados em geodésia. Revista Brasileira de Cartografia, no. 63/5, pp. 633-648, 2011.
- BORGES, A. F.; TIMBÓ ELMIRO, M. A.; NERO, M. A.; TEMBA, P. C. Métodos de cartografia e geoprocessamento aplicados na gestão de inconsistências de limites intermunicipais - estudo de caso entre Nova Lima e Belo Horizonte, Revista Geografias UFMG, v.11,n.2, Belo Horizonte, 2015.
- BRASIL. Decreto 89.817 de 30 de março de 1983. Normas para o controle de qualidade de documentos cartográficos. Brasília, Diário Oficial da União, 1984. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm>. Acesso em: 10 set. 2015.
- CONCAR; EXÉRCITO BRASILEIRO – CONCAR-EB. Especificação Técnica Para A Aquisição De Dados Geoespaciais Vetoriais. Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais. 2.ed. Brasil, 2011.
- COSTA, M. F. Uma Proposta para Compatibilização entre Referenciais Geodésicos. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1999a.
- COSTA, S. M. A. Integração da Rede Geodésica aos Sistemas de Referência Terrestres. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1999b.
- DALAZONA, R. Implicações na Cartografia com a Evolução do Sistema Geodésico Brasileiro e Futura Adoção do Sirgas. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2001.
- DALAZONA, R.; FREITAS, S. R. C. Efeitos na cartografia devido a evolução do sistema geodésico brasileiro e adoção de um referencial geocêntrico. Revista Brasileira de Cartografia, no. 54, pp. 54-76, 2002.
- FERNANDES, V. O.; RÖSCH, N. Aplicação de modelos de transformações Bursa-Wolf e Molodensky simplificada na transformação dos Sistemas Sad69 (1996) e Sirgas2000. In: II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, 2008.
- FERNANDES, V. O. Implicações da adoção do Referencial Geodésico Sirgas 2000 na Cartografia em escala grande. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- FREITAS, S. R. C.; LAZZAROTTO, D. R. ; SLUTER, C. R. ; LUZ, R. T. Avaliação da Compatibilidade dos Sistemas Geodésicos de Referência no Brasil. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 10, n.2, p. 225-239, 2004.
- GEMAEI, C. . Introdução à Geodésia Física. Curitiba: Editora da UFPR, 1999. 319p.
- IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resolução PR nº 23. Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos. Rio de Janeiro, 1983.
- IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resolução PR nº 22. Parâmetros para Transformação de Sistemas Geodésicos. Rio de Janeiro, 1989.
- IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ajustamento da Rede Planimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro. Rio de Janeiro, 1996.
- IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistemas de Referência. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/ibge/geografia/geodésico/default.shtm>>.Rio de Janeiro, RJ, 2001.

- IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resolução da Presidência do IBGE no 1/2005. Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. ProGrid: Guia do Usuário. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/projeto_mudanca_referencia_l_geodesico/progrid_guiado_usuario.pdf>. Rio de Janeiro, RJ, 2009.
- KWON, J. H; BAE, T.S; CHOI, Y. S; LEE, D. C; LEE, Y. W. Geodetic datum transformation to the global geocentric datum for seas and islands around Korea. *Geoscience Journal*, Vol. 09, n. 4, pp. 353-361, 2005.
- MONICO, J.F.G. Posicionamento pelo NAVSTAR – GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações. São Paulo: Editora UNESP, 2000.
- MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações. 2 ed. São Paulo, Editora UNESP, 2008.
- OLIVEIRA, J. R. Análise comparativa de métodos de transformação de coordenadas para a interoperabilidade entre data geodésicos da cartografia do IgeoE. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica) - Universidade de Lisboa, 2015.
- OLIVEIRA, L.C. Realizações do Sistema Geodésico Brasileiro Associadas ao SAD69: Uma Proposta Metodológica de Transformação. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.
- RODRIGUES, D. D. Rede geodésica de precisão no estado de Minas Gerais: avaliação de diferentes estratégias de processamento e ajustamento. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.
- SEEBER, G., *Satellite Geodesy – Foundations, Methods and Applications* – Berlin, New York. 1993.
- SILVA, I.; SAGANTINE, P. C. L. *Topografia para a Engenharia: Teoria e prática da geomática*. Elsevier, Rio de Janeiro, 2015.
- TORGE, W. *Geodesy*. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2001. 416 p.
- ZANETTI, M.A.Z. Implicações Atuais no Relacionamento entre Sistemas Terrestres de Origem Local e Geocêntrica. Tese de doutorado, CPGCG, UFPR, 111pp. 2006.
- ZÁVOTI, J. A Simple Proof of The Solutions Of The Helmert- and The Overdetermined Nonlinear 7-Parameter Datum Transformation. *Acta Geod. Geoph. Hung.*, Vol. 47(4), pp. 453–464, 2012.
- ZENG, H. Analytical algorithm of weighted 3D datum transformation using the constraint of orthonormal matrix. *Earth, Planets and Space a Springer Open Journal*, pp. 1-10, 2015.