

2 SISTEMA GEODÉSICO DE REFERÊNCIA E SUA EVOLUÇÃO NO BRASIL

Um Sistema Geodésico de Referência (SGR), do ponto de vista prático, permite que se faça a localização espacial de qualquer feição sobre a superfície terrestre. O SGR é definido a partir da adoção de um elipsóide de referência, posicionado e orientado em relação à superfície terrestre. A evolução tecnológica propiciou o melhoramento dos diversos SGRs existentes, tanto no aspecto de definição quanto no de realização do sistema (a definição do SGR caracteriza-se por um conjunto de convenções junto a um elipsóide ajustado às dimensões da Terra e devidamente orientado, já por realização entende-se um conjunto de pontos implantados sobre a superfície física da Terra com coordenadas conhecidas). Sob este ponto de vista, tanto as instituições e empresas voltadas à produção cartográfica quanto os usuários de dados georeferenciados utilizam informações baseadas nos diferentes sistemas de referência e suas realizações que coexistem no Brasil. Logo, é de extrema importância o conhecimento das características e restrições de cada um destes sistemas.

2.1 TAMANHO E FORMA DA TERRA

A tarefa da Geodésia consiste na determinação do tamanho e da forma da Terra, bem como dos parâmetros definidores do campo da gravidade. Pode-se acrescentar também “as variações temporais” dos elementos citados (GEMAEL, 1999, p. 16). Quando se trata da figura da Terra, esta normalmente é considerada como sendo um corpo rígido e as perturbações temporais do tamanho e forma são tratadas separadamente (VANICEK; KRAKIWSKY, 1986, p. 97).

A irregularidade da superfície terrestre traz muitas dificuldades na realização de cálculos matemáticos sobre tal superfície. Para fins práticos torna-se necessário encontrar um modelo representativo da superfície física da Terra (SMITH, 1996,

p.27). Existem diferentes tipos de modelos usados na Geodésia para representar física e matematicamente a superfície terrestre. Um modelo com significado físico é o geóide, cuja superfície é a equipotencial “que mais se aproxima do nível médio dos mares” (GEMAEL, 1999, p. 87). A adoção do geóide como superfície matemática de referência esbarra no conhecimento limitado do campo da gravidade terrestre. Além disso, o equacionamento matemático do geóide é complexo, o que o distancia de um uso mais prático como referência geométrica. Logo, não é conveniente para servir como superfície de referência para as chamadas redes geodésicas horizontais (VANICEK; KRAKIWSKY, 1986, p. 106).

Um modelo matematicamente viável, do ponto de vista geométrico, é o elipsóide de revolução ou biaxial, que fica definido por apenas dois parâmetros, usualmente o semi-eixo maior a e o achatamento f dado por (VANICEK; KRAKIWSKY, 1986, p. 110):

$$f = \frac{a - b}{a} \quad (1)$$

com b sendo o semi-eixo menor do elipsóide de revolução. O elipsóide também pode ser definido pelo semi-eixo maior (a) e semi-eixo menor (b) ou ainda pelo semi-eixo maior (a) e a excentricidade (e). O problema de encontrar o elipsóide com melhor ajuste à Terra envolveu cientistas por séculos na pesquisa de parâmetros cada vez mais refinados. Na Tabela 1 encontram-se os parâmetros de alguns elipsóides biaxiais.

TABELA 1 - ELIPSÓIDES BIAXIAIS

ANO	NOME	a (m)	b (m)	f^1
1830	Airy	6 377 563	6 356 257	299,325
1830	Everest	6 377 276	6 356 075	300,802
1841	Bessel	6 377 397	6 356 079	299,153
1858	Clarke	6 378 294	6 356 618	294,261
1866	Clarke	6 378 206	6 356 584	294,978
1880	Clarke	6 378 249	6 356 515	293,466
1907	Helmert	6 378 200	6 356 818	298,300
1909	Hayford	6 378 388	6 356 912	297,000
1927	NAD 27	6 378 206,4		294,9786982
1948	Krassovsky	6 378 245	6 356 863	298,300
1960	Fischer	6 378 155	6 356 773	298,3
1966	WGS 66	6 378 145	6 356 760	298,25
1967	IUGG	6 378 160	6 356 775	298,247
1972	WGS 72	6 378 135	6 356 751	298,26
1980	Internacional	6 378 137	6 356 752,3141	298,257222101
1983	NAD 83	6 378 137,0		298,257222101
1984	WGS 84	6 378 137		298,257223563

FONTE: adaptado de SMITH, 1996, p. 31

A evolução da Geodésia Espacial proporcionou uma evolução no estabelecimento dos modelos representativos da Terra, possibilitando uma associação entre os parâmetros geométricos e os parâmetros físicos do campo gravitacional terrestre. Uma solução está no modelo chamado de Terra Normal, que é um elipsóide de revolução ao qual se atribui a mesma massa da Terra incluindo a massa da atmosfera, a mesma velocidade de rotação da Terra real, além de sua superfície ser equipotencial (GEMAEL, 1999, p. 77). Logo, os elipsóides de revolução baseados em observações de satélites são definidos por parâmetros geométricos e por parâmetros físicos, como o semi-eixo maior (a), constante gravitacional geocêntrica (GM), velocidade angular (ω) e fator dinâmico de forma (J_2) o qual pode ser convertido no achatamento do elipsóide (SNYDER, 1987, p. 11).

2.1.1 Posição e Orientação do Elipsóide de Referência

A posição e a orientação do elipsóide adotado como o de referência pode ser com relação à Terra como um todo, geralmente estes elipsóides são geocêntricos, ou seja, o seu centro geométrico é definido como coincidente com o centro de massa da

Terra para uma dada época. Existe, entretanto, uma outra família de elipsóides cujo propósito não é representar a Terra como um todo e sim se ajustar a uma certa região, como por exemplo, a um país, grupo de países ou continente. Devido a isto o elipsóide não é geocêntrico. Neste caso, o posicionamento e a orientação são feitos através de seis parâmetros topocêntricos: as coordenadas de um ponto origem, orientação (azimute inicial), separação geóide-elipsóide (ondulação geoidal), e as componentes do desvio da vertical (componente meridiana ξ e componente primeiro vertical η) (COSTA, S.M.A, 1999, p. 17).

No Sistema Córrego Alegre a orientação do elipsóide deu-se de maneira totalmente arbitrária, ou seja, estabelecendo-se valores nulos para a ondulação geoidal e para as componentes do desvio da vertical no Datum, pois na época era a única forma de realização possível na prática. As coordenadas do vértice Córrego Alegre foram determinadas astronomicamente e estas coordenadas astronômicas foram transformadas em coordenadas geodésicas através das seguintes equações (GEMAEL, 1999, p.19):

$$\xi = \phi_A - \phi \quad (2)$$

$$\eta = (\lambda_A - \lambda) \cos \phi \quad (3)$$

$$\eta = (A_A - A) \cot g(\phi) \quad (4)$$

Onde:

ϕ_A, λ_A, A_A : são latitude, longitude e azimute astronômicos.

ϕ, λ, A : são latitude, longitude e azimute geodésicos.

Das equações (3) e (4) obtém-se a expressão:

$$A = A_A - (\lambda_A - \lambda) \cdot \tan \phi \quad (5)$$

conhecida como equação de Laplace e através da qual é possível transformar um

azimute astronômico em geodésico.

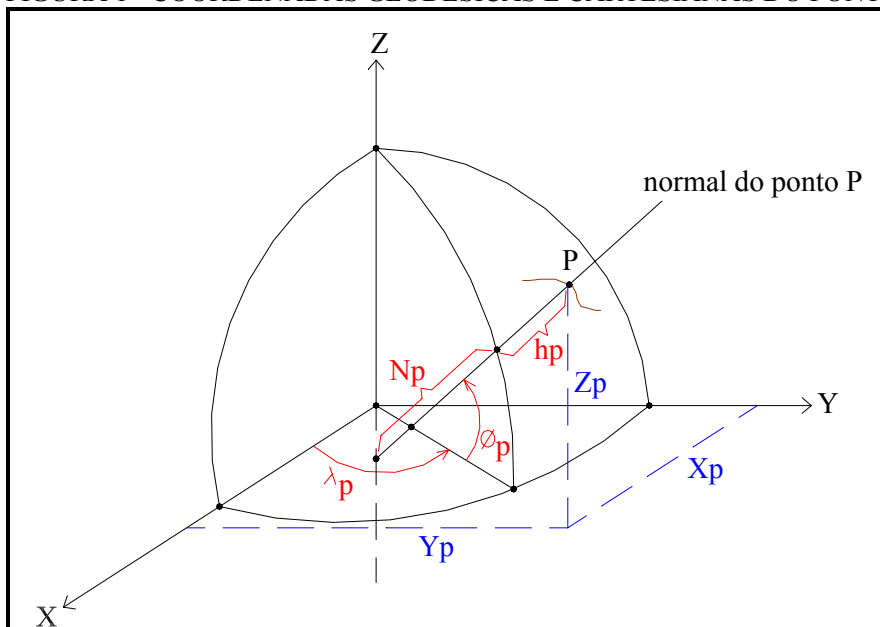
Com a imposição do valor nulo para as componentes do desvio da vertical no Datum, as coordenadas geodésicas deste vértice ficaram iguais às suas coordenadas astronômicas. Devido à orientação arbitrária, existia uma boa adaptação elipsóide-geóide na região de Minas Gerais e São Paulo, porém à medida que se caminhava para o Norte ou para o Sul, distanciando-se da origem, as discrepâncias ficavam bastante evidenciadas.

No SAD 69 a orientação do elipsóide deu-se de forma parcialmente arbitrária, determinando-se os valores das componentes do desvio da vertical e estabelecendo-se valor nulo para a ondulação geoidal no Datum (vértice Chuá). Através de uma determinação astronômica em Chuá e conhecendo-se os valores das componentes ξ e η foi possível calcular as coordenadas geodésicas do vértice por meio das equações (2) e (3), apresentadas anteriormente. Neste caso procurou-se posicionar e orientar o elipsóide de forma a obter uma boa adaptação entre a superfície do elipsóide e o geóide na América do Sul e, principalmente, de forma a obter um melhor ajustamento entre as altitudes elipsóidicas e ortométricas nas bordas oceânicas.

2.1.2 Coordenadas Geodésicas de um Ponto

O elipsóide devidamente ajustado às dimensões da Terra e orientado torna-se um referencial adequado para a atribuição de coordenadas a pontos sobre a superfície física da Terra. As coordenadas de um ponto P, referidas ao elipsóide, são ditas coordenadas geodésicas: latitude (ϕ_P), longitude (λ_P) e altitude geométrica ou elipsoidal (h_P). Porém, um terno cartesiano pode ser associado ao elipsóide, como mostra a Figura 1, logo o ponto P também pode ser definido por suas coordenadas cartesianas X_P , Y_P e Z_P .

FIGURA 1 - COORDENADAS GEODÉSICAS E CARTESIANAS DO PONTO P



A transformação, das coordenadas geodésicas para coordenadas cartesianas, é imediata e dada pela seguinte formulação (IBGE, 1998, p. 18):

$$X_p = (N_p + h_p) \cos \phi_p \cos \lambda_p \quad (6)$$

$$Y_p = (N_p + h_p) \cos \phi_p \sin \lambda_p \quad (7)$$

$$Z_p = [N_p(1 - e^2) + h_p] \sin \phi_p \quad (8)$$

$$N_p = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \phi_p)^{1/2}} \quad (9)$$

$$e^2 = 2f - f^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (10)$$

Onde:

X_p , Y_p e Z_p = coordenadas cartesianas do ponto P;

ϕ_p e λ_p = coordenadas geodésicas do ponto P;

h_p = altitude geométrica ou elipsoidal do ponto P;

N_P = raio de curvatura da seção 1º vertical no ponto P (ou grande normal);

a = semi-eixo maior do elipsóide de referência;

b = semi-eixo menor do elipsóide de referência;

f = achatamento do elipsóide de referência;

e^2 = quadrado da 1ª excentricidade do elipsóide de referência.

A transformação inversa, de coordenadas cartesianas para coordenadas geodésicas, pode ser solucionada iterativamente ou diretamente. As fórmulas que propiciam a solução iterativa são dadas por (MONICO, 2000, p. 89):

$$p = \sqrt{X_P^2 + Y_P^2} \quad (11)$$

$$h_P = \frac{p}{\cos \phi_P} - N_P \quad (12)$$

$$\phi_P = \arctan \left\{ \left(\frac{Z_P}{p} \right) \left(1 - e^2 \frac{N_P}{N_P + h_P} \right)^{-1} \right\} \quad (13)$$

$$\lambda_P = \arctan \left(\frac{Y_P}{X_P} \right) \quad (14)$$

O cálculo da longitude é feito diretamente através da fórmula (14), mas a altitude geométrica e a latitude são calculadas através de iterações. A solução dá-se através das seguintes etapas:

a) cálculo de p através da fórmula (11):

$$p = \sqrt{X_P^2 + Y_P^2}$$

b) cálculo de um valor aproximado para a latitude (ϕ_0):

$$\phi_0 = \arctan \left\{ \left(\frac{Z_P}{p} \right) (1 - e^2)^{-1} \right\}$$

c) cálculo de um valor aproximado para a grande normal (N_0):

$$N_0 = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \phi_0)^{1/2}}$$

d) cálculo da altitude geométrica (h):

$$h = \frac{p}{\cos \phi_0} - N_0$$

e) cálculo de um valor melhorado para a latitude:

$$\phi_p = \arctan \left\{ \left(\frac{Z_p}{p} \right) \left(1 - e^2 \frac{N_0}{N_0 + h} \right)^{-1} \right\}$$

f) verificar se existe necessidade de outra iteração, através da comparação entre os valores aproximado e melhorado da latitude.

A solução direta é dada pela seguinte formulação (MONICO, 2000, p. 90):

$$\phi_p = \arctan \left(\frac{Z_p + e'^2 b \sin^3 \theta}{p - e^2 a \cos^3 \theta} \right) \quad (15)$$

$$\lambda_p = \arctan \left(\frac{Y_p}{X_p} \right) \quad (16)$$

$$h_p = \frac{p}{\cos \phi_p} - N_p \quad (17)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{Z_p a}{p b} \right) \quad (18)$$

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \quad (19)$$

Onde:

e'^2 = quadrado da 2ª excentricidade do elipsóide de referência

2.2 SISTEMA GEODÉSICO DE REFERÊNCIA E REDES GEODÉSICAS

A definição de um sistema de referência é caracterizada pela idéia conceitual desse sistema (MONICO, 2000, p. 59). Um Sistema Geodésico de Referência (SGR) é definido com base num conjunto de parâmetros e convenções, junto a um elipsóide ajustado às dimensões da Terra e devidamente orientado, constituindo um referencial adequado para a atribuição de coordenadas a pontos sobre a superfície física.

Quando um referencial é definido e adotado por convenção, a etapa seguinte é caracterizada pela coleta de observações a partir de pontos sobre a superfície terrestre (rede), devidamente materializados. Fazem parte, ainda, o processamento e análise, bem como a divulgação dos resultados, que é, essencialmente, um conjunto de coordenadas associado a uma época em particular. As coordenadas podem vir acompanhadas de suas respectivas velocidades. Esse conjunto materializa o sistema de referência. (MONICO, 2000, p. 60).

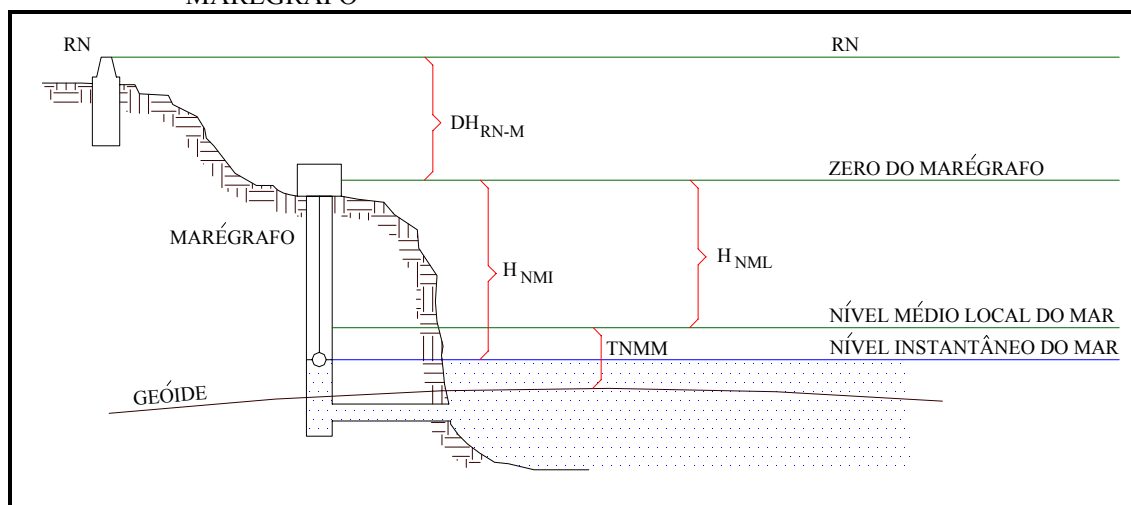
Pode-se dizer então, que a materialização ou realização do Sistema Geodésico de Referência dá-se através do conjunto de pontos implantados sobre a superfície física da Terra cujas coordenadas são conhecidas. A realização do sistema de referência é disponibilizada ao usuário através da divulgação do conjunto de coordenadas.

O conjunto de estações terrestres cujas posições foram determinadas com respeito a um sistema coordenado constitui as chamadas malhas ou redes geodésicas, que proporcionam uma forma de representação pontual da superfície física do planeta. Didaticamente as redes são divididas em três categorias: redes verticais, redes horizontais e redes tridimensionais (CASTAÑEDA, 1986, p. 24). As redes de pontos definidos por apenas uma coordenada, a altitude, são conhecidas como redes geodésicas verticais e as redes de pontos cujas posições horizontais são conhecidas, por exemplo, a latitude e a longitude, são chamadas de redes geodésicas horizontais. A razão para a separação em redes verticais e horizontais vem da necessidade do controle horizontal estar definido num sistema geométrico e do controle vertical estar de

alguma forma referido ao campo da gravidade da Terra (TORGE, 1991, p. 213). Finalmente, redes de pontos com três coordenadas são conhecidas como redes tridimensionais.

As redes geodésicas verticais são compostas por pontos implantados na superfície física da Terra. Cada ponto é conhecido por RN (Referência de Nível) e sua altitude ortométrica (H) é conhecida e determinada por técnicas de nivelamento. No estabelecimento das redes verticais existe maior preocupação com a precisão das altitudes do que com a precisão das coordenadas horizontais. Essas altitudes estão referenciadas ao geóide ou mais popularmente ao “Nível Médio dos Mares” (NMM). O NMM é determinado através de observações do nível do mar utilizando instrumentos conhecidos como marégrafos. Simplificadamente, a variação do nível do mar instantâneo (local) (H_{NMI}) com respeito ao zero do marégrafo é monitorada. Com os dados obtidos do monitoramento, calcula-se o nível médio do mar local (H_{NML}) e determina-se a altitude de uma RN situada próxima ao marégrafo ($H_{NML} + DH_{RN-M}$) como mostra a Figura 2 (VANICEK; KRAKIWSKY, 1986, p. 424):

FIGURA 2 - DETERMINAÇÃO DA ALTITUDE DE UMA RN SITUADA PRÓXIMA AO MARÉGRAFO



FONTE: adaptado de VANICEK; KRAKIWSKY, 1986, p. 424

As altitudes dos outros pontos da rede geodésica vertical são determinadas a

partir dos desníveis obtidos com nivelamento geométrico e referidas à RN situada próxima ao marégrafo. Porém, uma consideração a ser feita é a de que o NMM é definido em uma estação maregráfica (que constitui o Datum da rede vertical) após um certo número de anos de observações, valendo para aquele local e para uma dada época, pois o NMM varia de um ponto para outro e no mesmo ponto em função do tempo (GEMAEL, 1999, p. 211). No Brasil, o NMM é definido pelas observações maregráficas tomadas no porto de Imbituba, no litoral do Estado de Santa Catarina.

O uso do NMM como superfície de referência para as altitudes já foi amplamente aceito, porém atualmente é reconhecido que o NMM local observado nos marégrafos não pode ser considerado coincidente com o geóide global (PAN; SJÖBERG, 1998, p. 64). Ou seja, cada datum vertical é referido a uma superfície equipotencial particular, superfície esta, associada ao NMM num ponto costeiro (no marégrafo). Geralmente esta superfície possui uma discrepância com relação ao geóide global. Esta discrepância é chamada de Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM).

As redes geodésicas horizontais são compostas por pontos cujas coordenadas (geralmente latitude ϕ e longitude λ), com respeito a uma superfície de referência (o elipsóide), são conhecidas. As altitudes dos pontos das redes horizontais são determinadas com uma precisão relativa inferior a das coordenadas horizontais, por exemplo, através de nivelamento trigonométrico. Tais altitudes têm a função de propiciar elementos para redução das bases (medidas sobre a superfície física da Terra) ao elipsóide. O Datum da rede geodésica horizontal consiste num ponto (origem) cujas coordenadas são conhecidas.

Até a década de 60, as coordenadas horizontais dos pontos eram basicamente determinadas pelas técnicas de triangulação, trilateração e poligonação. A partir daí, surgiram os métodos de posicionamento por satélite, que proporcionaram a obtenção direta de coordenadas tridimensionais (TORGE, 1991, p. 213). As redes tridimensionais podem ser estabelecidas de duas formas (VANICEK; KRAKIWSKY, 1986, p. 100):

- a) combinar as coordenadas horizontais (ϕ, λ) e a altitude ortométrica (H) de pontos homólogos para obter então as coordenadas tridimensionais (ϕ, λ, h) ou (X, Y, Z). Para obter a coordenada h , chamada de altitude elipsoidal ou geométrica, é indispensável o conhecimento da ondulação geoidal (ΔN):

$$h \cong \Delta N + H \quad (20)$$

- b) utilizar técnicas de posicionamento que sejam capazes de fornecer diretamente as três coordenadas em algum referencial, como por exemplo o VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), SLR (*Satellite Laser Range*) e o GPS (*Global Positioning System*).

É clássica a divisão das redes geodésicas em redes verticais, horizontais e tridimensionais. Porém, deve-se ter em mente que com a evolução das técnicas de posicionamento, principalmente as técnicas espaciais, e com o aumento na precisão da determinação das coordenadas, existem na atualidade os conceitos de rede de referência fundamental e de redes derivadas ou a serem integradas. O objetivo da integração é combinar duas soluções da melhor maneira possível. Atualmente novos levantamentos podem ser integrados a levantamentos já existentes de três formas:

- a) as coordenadas de novos levantamentos são determinadas a partir de um ajustamento onde são injuncionadas as coordenadas das estações existentes;
- b) baseando-se em observações GPS através da técnica de posicionamento absoluto ou relativo. Neste caso os satélites fazem o papel de pontos de controle existentes. No posicionamento absoluto, quando os dados são processados com as efemérides transmitidas o resultado é referido ao WGS84 (*World Geodetic System 1984*), porém se os dados forem processados com as efemérides precisas, o resultado é referido ao ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*). No posicionamento relativo, quando os dados são processados com as efemérides transmitidas e a

estação de referência possui coordenadas conhecidas em WGS84 o resultado é referido ao WGS84, porém se os dados forem processados com as efemérides precisas e a estação de referência possui coordenadas ITRF conhecidas, o resultado é referido ao ITRF;

c) aplicando-se parâmetros de transformação (COSTA, S.M.A, 1999, p. 43).

2.3 O SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO

O estabelecimento do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) foi iniciado na década de 40. O SGB caracteriza-se pelo conjunto de estações que representam o controle horizontal e vertical necessários à localização e representação cartográfica no território brasileiro, seu estabelecimento e manutenção são atribuições do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) através de seu Departamento de Geodésia (IBGE, 2000, p. 5). A materialização do Sistema Geodésico Brasileiro dá-se através das Redes Geodésicas Brasileiras (RGB): Rede Horizontal, Rede Vertical e Rede Tridimensional (Rede Nacional GPS, Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo - RBMC), que são formadas pelos conjuntos de estações e coordenadas geodésicas.

2.3.1 Sistema com Datum Córrego Alegre

O Sistema com Datum Córrego Alegre, oficialmente adotado pelo Brasil da década de 50 até a década de 70, foi definido a partir de um ajustamento, pelo método dos correlatos ou equações de condição, da Rede Horizontal do SGB. Na definição deste sistema adotou-se como superfície de referência o Elipsóide Internacional de Hayford de 1924, com semi-eixo maior $a = 6\,378\,388$ m e achatamento $f = 1/297$ (IBGE, 1996, p. 4). Como ponto origem foi escolhido o vértice Córrego Alegre, 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, com isso aplicando-se as equações (2) e (3) apresentadas no item 2.1 verifica-se que as coordenadas geodésicas (ϕ , λ) do ponto ficam iguais às suas coordenadas astronômicas (ϕ_A , λ_A):

Latitude $\phi = \phi_A = 19^\circ 50' 14,91''$ S e

Longitude $\lambda = \lambda_A = 48^\circ 57' 41,98''$ W,

a altitude ortométrica do vértice Córrego Alegre é 683,81 m (IBGE, 1996, p. 4).

O sistema Córrego Alegre é de grande importância, pois ainda existe no país um grande número de documentos cartográficos e coordenadas referidas a ele. A Tabela 2 mostra o quantitativo das cartas do mapeamento sistemático produzidas neste sistema (IBGE, 2000, p. 24):

TABELA 2 - QUANTITATIVO DE CARTAS EM CÓRREGO ALEGRE

ESCALA DA CARTA	QUANTIDADE
1 : 1 000 000	46
1 : 250 000	320
1 : 100 000	1115
1 : 50 000	1262
1 : 25 000	148
Total	2891

FONTE: IBGE, 2000, p. 24

Apesar do Sistema Córrego Alegre não ser mais o sistema de referência oficial no Brasil, estas cartas vem sendo atualizadas e novos produtos vêm sendo gerados com base neste sistema. Além disso, o apoio terrestre e sua densificação, utilizados para a geração das cartas indicadas na Tabela 2, também são utilizados para a geração de produtos em escalas maiores. A realização do Sistema Córrego Alegre de precisão compatível com as técnicas e equipamentos da época, aliada à menor precisão da densificação do apoio terrestre, faz com que os produtos gerados com base neste sistema, principalmente os em escalas grandes, percam em qualidade quando comparados aos produtos gerados com base em sistemas de referência e tecnologias mais atuais.

Salienta-se que historicamente existiu um sistema de referência provisório

entre Córrego Alegre e SAD 69, que foi o Astro Datum Chuá e que algumas cartas foram editadas neste sistema. Na época foram estabelecidas estações gravimétricas na região do vértice Córrego Alegre objetivando o melhor conhecimento do geóide na região e a adoção de um novo ponto origem. Como resultado destas pesquisas foi escolhido um novo Datum, o vértice Chuá, e através de um novo ajustamento foi definido o novo sistema de referência, denominado de Astro Datum Chuá. Este sistema tinha como ponto origem o vértice Chuá, como elipsóide de referência o de Hayford e foi estabelecido com o propósito de ser um ensaio ou referência para a definição do SAD 69 (IBGE, 2001d).

A resolução PR número 22, de 21 de julho de 1983, traz os parâmetros de transformação entre os sistemas Córrego Alegre e SAD 69. Estes parâmetros consistem em três translações, que do Sistema Córrego Alegre para o SAD 69 são:

$$\text{Translação em } X (\Delta X) = -138,70 \text{ m}$$

$$\text{Translação em } Y (\Delta Y) = 164,40 \text{ m}$$

$$\text{Translação em } Z (\Delta Z) = 34,40 \text{ m}$$

Esta mesma resolução traz como modelo matemático, para a transformação de coordenadas entre sistemas geodésicos de referência, as equações diferenciais simplificadas de Molodensky:

$$\Delta\phi^0 = \frac{1}{M_1} \{ (a_1 \Delta f + f_1 \Delta a) \sin 2\phi_1 - \Delta X \sin \phi_1 \cos \lambda_1 - \Delta Y \sin \phi_1 \sin \lambda_1 + \Delta Z \cos \phi_1 \} \frac{180}{\pi} \quad (21)$$

$$\Delta\lambda^0 = \frac{1}{N_1 \cos \phi_1} \{ -\Delta X \sin \lambda_1 + \Delta Y \cos \lambda_1 \} \frac{180}{\pi} \quad (22)$$

$$\Delta N = (a_1 \Delta f + f_1 \Delta a) \sin^2 \phi_1 - \Delta a + \Delta X \cos \phi_1 \cos \lambda_1 + \Delta Y \cos \phi_1 \sin \lambda_1 + \Delta Z \sin \phi_1 \quad (23)$$

$$\phi_2^0 = \phi_1^0 + \Delta\phi^0 \quad (24)$$

$$\lambda_2^0 = \lambda_1^0 + \Delta\lambda^0 \quad (25)$$

Onde:

a_1 = semi-eixo maior do elipsóide no sistema S_1

f_1 = achatamento do elipsóide no sistema S_1

ϕ_1 = latitude geodésica no sistema S_1

λ_1 = longitude geodésica no sistema S_1

a_2 = semi-eixo maior do elipsóide no sistema S_2

f_2 = achatamento do elipsóide no sistema S_2

ϕ_2 = latitude geodésica no sistema S_2

λ_2 = longitude geodésica no sistema S_2

ΔN = diferença de altitudes geométricas ($S_2 - S_1$)

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ = parâmetros de translação do S_1 para o S_2

$$N_1 = \frac{a_1}{(1 - e_1^2 \sin^2 \phi_1)^{1/2}} = \text{raio de curvatura da seção } 1^\circ \text{ vertical no } S_1 \quad (26)$$

$$M_1 = \frac{N_1}{1 + e_1'^2 \cos^2 \phi_1} = \frac{a_1(1 - e_1^2)}{(1 - e_1^2 \sin^2 \phi_1)^{3/2}} = \text{raio de curvatura da seção meridiana no } S_1 \quad (27)$$

$$\Delta a = a_2 - a_1 \quad (28)$$

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (29)$$

$$e_1^2 = f_1(2 - f_1) \quad (30)$$

$$e_1'^2 = \frac{e_1^2}{1 - e_1^2} \quad (31)$$

Onde:

e'^2 = quadrado da segunda excentricidade do elipsóide de referência

Na utilização das equações diferenciais simplificadas de Molodensky, os parâmetros para a transformação do Sistema Córrego Alegre para o Sistema SAD 69 são os seguintes:

$$a_1 = 6\,378\,388 \text{ m}$$

$$f_1 = 1/297$$

$$a_2 = 6\,378\,160 \text{ m}$$

$$f_2 = 1/298,25$$

$$\Delta X = -138,70 \text{ m}$$

$$\Delta Y = 164,40 \text{ m}$$

$$\Delta Z = 34,40 \text{ m}$$

2.3.2 O Datum Sul Americano de 1969 (SAD 69)

A utilização do SAD 69 como sistema de referência único para a América do Sul, foi recomendada em 1969 devido à aprovação do relatório final do Grupo de Trabalho sobre o Datum Sul Americano, pelo Comitê de Geodésia reunido na XI Consultoria Pan-americana sobre Cartografia, em Washington, EUA (CASTAÑEDA, 1986, p. 68). O Projeto do Datum Sul Americano subdividiu-se em duas etapas (FISCHER, 1973, p. 6):

- a) estabelecimento de um sistema geodésico cujo elipsóide apresentasse boa adaptação regional ao geóide;
- b) ajustamento de uma rede planimétrica de âmbito continental referenciada ao sistema definido.

Atualmente a Rede Horizontal do SGB é composta por mais de 5.000 estações cujas coordenadas geodésicas estão referidas ao SAD 69, que foi oficialmente adotado no Brasil no final da década de 70 (IBGE, 2000, p. 5). Na definição do sistema adotou-se como modelo geométrico da Terra o Elipsóide de Referência Internacional de 1967, recomendado pela Associação Internacional de Geodésia (*International Association of Geodesy* - IAG), definido pelos parâmetros (IBGE, 1998,

p. 3):

- a) semi-eixo maior $a = 6\,378\,160,000$ m;
- b) com o achatamento $(1/298,247167427)$ aproximado para o valor $f = 1/298,25$.

A definição da origem e a orientação do elipsóide de referência foram feitas de forma a minimizar as diferenças em relação ao geóide no continente sul-americano (IBGE, 2000, p. 5). Como ponto origem adotou-se o vértice de triangulação Chuá, cujas coordenadas astronômicas e geodésicas são apresentadas na Tabela 3:

TABELA 3 - COORDENADAS DO VÉRTICE CHUÁ

	ASTRONÔMICA	GEODÉSICA
Latitude	$19^{\circ} 45' 41,34'' \text{ S} \pm 0,05''$	$19^{\circ} 45' 41,6527'' \text{ S}$
Longitude	$48^{\circ} 06' 07,80'' \text{ W} \pm 0,08''$	$48^{\circ} 06' 04,0639'' \text{ W}$
Azimute ao vértice Uberaba (contado a partir do ponto Sul)	$271^{\circ} 30' 05,42'' \pm 0,21''$	$271^{\circ} 30' 04,05''$
Altura geoidal	$N = 0 \text{ m}$	

FONTE: FISCHER, 1973, p. 6

No vértice Chuá foram determinadas as componentes do desvio da vertical e estabeleceu-se valor nulo para a ondulação geoidal. Os valores das componentes do desvio da vertical são (OLIVEIRA, 1998, p. 41):

- a) componente meridiana $\xi = 0,31''$;
- b) componente primeiro vertical $\eta = -3,52''$.

As coordenadas do vértice foram determinadas astronomicamente e com o conhecimento dos valores das componentes do desvio da vertical foi possível calcular as coordenadas geodésicas de Chuá através da aplicação das equações (2) e (3), apresentadas no item 2.1.

O primeiro ajuste realizado em ambiente computacional, para o estabelecimento do SAD 69, foi feito pelo *Defense Mapping Agency* (DMA) através do sistema computacional *Horizontal Adjustment by Variation of Coordinates* (HAVOC). A rede geodésica brasileira foi dividida em 10 áreas de ajuste, que foram

processadas em blocos separados em consequência das limitações computacionais da época (IBGE, 1996, p. 5). Numa segunda etapa, os dados de novos levantamentos geodésicos, provenientes da densificação da Rede Horizontal, foram ajustados no programa *Users System for Horizontal Evaluation and Reduction* (USHER). Neste caso eram consideradas fixas as coordenadas das estações já existentes (COSTA, S.M.A, 1999, p. 2). Este procedimento insere distorções nas coordenadas das estações uma vez que os erros sistemáticos são propagados através dos diversos ajustes. Basicamente, as distorções existentes na rede clássica ocorreram devido a três principais causas (IBGE, 1996, p. 6): fraca geometria das redes clássicas; ausência de um modelo geoidal preciso para a redução das observações geodésicas ao elipsóide; e métodos de ajustamento aplicados.

Na década de 70 iniciou-se no Brasil o uso dos sistemas de posicionamento por satélites através do sistema TRANSIT. Foram realizadas observações Doppler em estações da rede geodésica de alta precisão com a finalidade de estimar parâmetros de transformação entre o SAD 69 e o NSW 922 (sistema associado às efemérides precisas do sistema TRANSIT) (CASTAÑEDA, 1986, p. 36). Posteriormente foram estabelecidas estações na região amazônica onde não era possível a prática dos procedimentos clássicos. De uma forma bem abrangente, a realização do SGB, até o início da década de 90, foi obtida pelos procedimentos clássicos de triangulação e poligonação, tendo como observações básicas: direções horizontais, ângulos verticais, distâncias e valores astronômicos – coordenadas e azimutes (OLIVEIRA, 1998, p. 44); além de pontos estabelecidos com o sistema TRANSIT. Finalmente, em 1991 o IBGE adotou o GPS em seus trabalhos geodésicos (COSTA, S.M.A, 1999, p. 2).

A partir de 1994, com uma efetiva aplicação do GPS, começaram a ser implantadas redes estaduais de alta precisão, vinculadas ao SAD 69, com precisões relativas das linhas de base entre 1 e 3 ppm (partes por milhão). Um exemplo é a Rede Geodésica GPS de Alta Precisão do Estado do Paraná. Esta rede foi implantada através de um convênio de cooperação técnica entre o IBGE e o IAP (Instituto Ambiental do

Paraná) com os objetivos de: suprir as deficiências da Rede Geodésica Fundamental ou de Primeira Ordem; estabelecer uma rede de referência para posicionamento relativo com GPS e referenciar os trabalhos realizados no Paraná de maneira única e precisa. Um dos benefícios alcançados com a rede é o de proporcionar melhor atendimento aos diferentes usuários da Cartografia, da Geodésia e do Sensoriamento Remoto, nos mais variados setores de atividade, tanto do Serviço Público, como da iniciativa privada. Na área do Serviço Público, a rede passou a atender aos interesses e necessidades de uma série de instituições, como: SEMA, COPEL, SANEPAR, IBGE, INCRA e prefeituras municipais (PARANÁ, 1996, p. 2). A implantação da rede deu-se no período de fevereiro de 1994 a setembro de 1995 e é constituída por 20 estações implantadas de forma a garantir cobertura de todo o território paranaense. A distribuição dos vértices possibilita que qualquer região do Paraná conte com um vértice a uma distância inferior a 60 km de abrangência (PARANÁ, 1996, p. 3). Esta rede é extensivamente aplicada no Estado para a geração de produtos cartográficos, incluindo os cadastrais e em SIG (FREITAS; DALAZOANA, 2000, não paginado), vinculados principalmente à realização inicial do SAD 69.

Os 20 marcos da Rede GPS do Paraná foram implantados nas cidades de Curitiba, Ponta Grossa, Jaguariaíva, Joaquim Távora, Ortigueira, Londrina, Iretama, Maringá, Goioerê, Paranavaí, Querência do Norte, Guaíra, Toledo, Foz do Iguaçu, Francisco Beltrão, Laranjeiras do Sul, Clevelândia, Guarapuava, Bituruna e São Mateus do Sul. Para a determinação das coordenadas dos vértices foi empregado o posicionamento relativo. Como a rede encontrava-se sob a área de influência das estações Curitiba (UFPR) e Presidente Prudente (UEPP), ambas pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo, estas duas foram utilizadas como estações de referência para a implantação da Rede GPS (PARANÁ, 1996, p.8). Visando otimizar os trabalhos, a rede foi subdividida em oito figuras básicas, cada uma constituída por cinco marcos, onde alguns lados são sobrepostos de modo a manter a ligação entre elas. As figuras ficaram assim dispostas (PARANÁ, 1996, p. 6):

Figura 1: Toledo, Foz do Iguaçu, Francisco Beltrão, Laranjeiras do Sul e Clevelândia;

Figura 2: Francisco Beltrão, Laranjeiras do Sul, Clevelândia, Guarapuava e Bituruna;

Figura 3: Guarapuava, Bituruna, Ponta Grossa, São Mateus do Sul e Curitiba;

Figura 4: Curitiba, Ponta Grossa, Jaguariaíva, Ortigueira e Joaquim Távora;

Figura 5: Ortigueira, Joaquim Távora, Londrina, Iretama e Maringá;

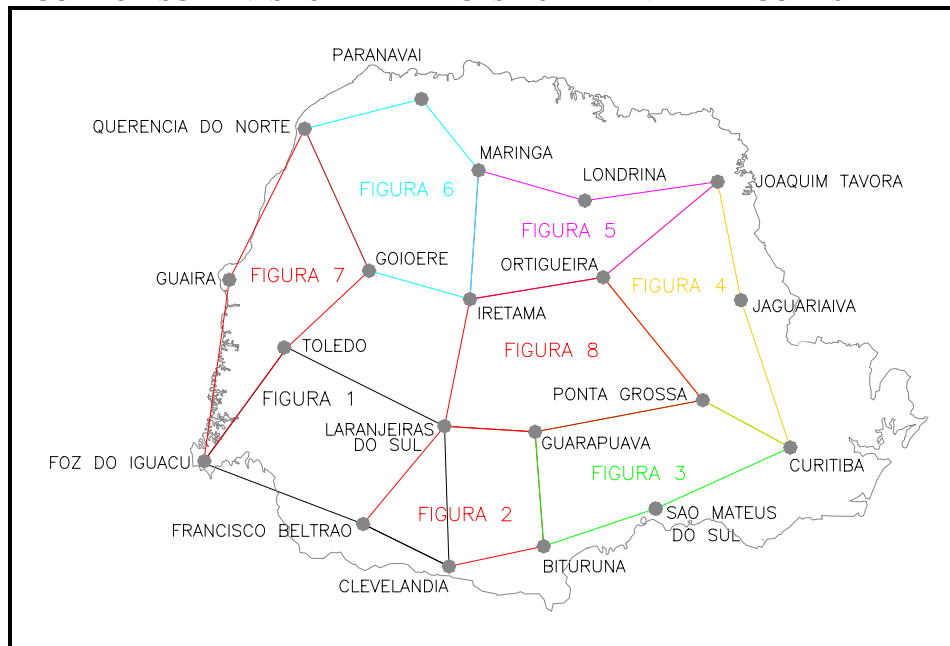
Figura 6: Iretama, Maringá, Goioerê, Paranavaí e Querência do Norte;

Figura 7: Goioerê, Querência do Norte, Guaíra, Toledo e Foz do Iguaçu;

Figura 8: Laranjeiras do Sul, Guarapuava, Ponta Grossa, Ortigueira e Iretama.

Os vetores de observação foram processados por figuras, utilizando-se a solução de dupla diferença de fase e empregando-se efemérides precisas do IGS (*International GPS Service*) (PARANÁ, 1996, p.11). A disposição das figuras nas quais a rede GPS do estado foi subdividida pode ser visualizada na Figura 3. Esta figura ilustra como o Paraná está apoiado pela rede.

FIGURA 3 – SUBDIVISÃO DA REDE GPS DO PARANÁ EM FIGURAS



Quando um ponto é rastreado com GPS, utilizando as efemérides transmitidas e injuncionando uma estação base cuja coordenada é conhecida em WGS

84 (*World Geodetic System 1984*) no caso de posicionamento relativo, este ponto tem também suas coordenadas referidas ao WGS 84, tornando necessária sua transformação para o sistema geodésico oficial do país, o SAD 69. A Resolução número 23, de 21 de fevereiro de 1989, que altera o Apêndice II da Resolução PR – 22/83, traz os parâmetros oficiais para a transformação de WGS 84 para SAD 69:

$$\text{Translação em } X (\Delta X) = 66,87 \text{ m} \pm 0,43 \text{ m}$$

$$\text{Translação em } Y (\Delta Y) = -4,37 \text{ m} \pm 0,44 \text{ m}$$

$$\text{Translação em } Z (\Delta Z) = 38,52 \text{ m} \pm 0,40 \text{ m}$$

Trata-se de três translações, pois se assume que os sistemas SAD 69 e WGS 84 são paralelos e que possuem a mesma escala. Salienta-se que não existem parâmetros de transformação entre o Sistema Córrego Alegre e o WGS 84, devendo ser feita uma transformação intermediária para SAD 69. Esta resolução traz ainda, uma seqüência de cálculo para a transformação entre os sistemas WGS 84 e SAD 69:

$$X_1 = (N_1 + h_1) \cos \phi_1 \cos \lambda_1 \quad (32)$$

$$Y_1 = (N_1 + h_1) \cos \phi_1 \sin \lambda_1 \quad (33)$$

$$Z_1 = [N_1(1 - e_1^2) + h_1] \sin \phi_1 \quad (34)$$

$$X_2 = X_1 + \Delta X \quad (35)$$

$$Y_2 = Y_1 + \Delta Y \quad (36)$$

$$Z_2 = Z_1 + \Delta Z \quad (37)$$

$$\phi_2 = \arctan \left(\frac{Z_2 + e_2'^2 b_2 \sin^3 u}{(X_2^2 + Y_2^2)^{1/2} - e_2^2 a_2 \cos^3 u} \right) \quad (38)$$

$$\lambda_2 = \arctan \left(\frac{Y_2}{X_2} \right) \quad (\text{para o quadrante em que se situa o Brasil}) \quad (39)$$

$$h_2 = \frac{(X_2^2 + Y_2^2)^{1/2}}{\cos \phi_2} - N_2 \quad (40)$$

Onde u é a latitude reduzida que pode ser expressa através das seguintes equações:

$$\operatorname{sen} u = \frac{tgu}{(1 + tg^2 u)^{1/2}} \quad (41)$$

$$\operatorname{cos} u = \frac{1}{(1 + tg^2 u)^{1/2}} \quad (42)$$

$$tgu = \frac{Z_2}{(X_2^2 + Y_2^2)^{1/2}} \frac{a_2}{b_2} \quad (43)$$

Sendo:

X_1, Y_1, Z_1 = coordenadas cartesianas no sistema S_1

X_2, Y_2, Z_2 = coordenadas cartesianas no sistema S_2

Na utilização das equações indicadas na Resolução número 23, os parâmetros para a transformação do Sistema WGS 84 para o Sistema SAD 69 são os seguintes:

$$a_1 = 6\,378\,137 \text{ m}$$

$$f_1 = 1/298,257223563$$

$$a_2 = 6\,378\,160 \text{ m}$$

$$f_2 = 1/298,25$$

$$\Delta X = 66,87 \text{ m}$$

$$\Delta Y = -4,37 \text{ m}$$

$$\Delta Z = 38,52 \text{ m}$$

Cabe ser ressaltado que estes parâmetros de transformação foram estimados com base na realização inicial de ambos os sistemas (SAD 69 e WGS 84) e utilizando somente a estação Chuá. Esta estação foi a única que não sofreu alteração em suas coordenadas com o reajustamento do SAD 69 realizado em 1996. Os parâmetros estão

limitados pela realização inicial do WGS 84 e também não sofreram alteração com o reajustamento do SAD 69 e nem devido à evolução do WGS 84, o qual já passou por dois refinamentos desde sua realização inicial.

O WGS 84 foi estabelecido em 1987 e sua realização inicial deu-se através de um conjunto de estações Doppler (NIMA, 1997, p.2-2). Esta realização fornecia precisão métrica devido à limitação da técnica utilizada, o Doppler. Posteriormente, foram realizados dois refinamentos no sistema objetivando melhorar a precisão da realização inicial. O primeiro refinamento recebeu a denominação WGS84 (G730), onde “G” indica o uso exclusivo da técnica GPS no refinamento e “730” se refere a semana GPS desta solução, foi utilizado nas órbitas dos satélites GPS a partir de 29 de junho de 1994. Deste primeiro refinamento participaram 32 estações, 10 estações do Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD) e 22 estações da rede IGS, a precisão das coordenadas desta solução foi de 10 cm (1σ) para as estações DoD. O segundo refinamento, correspondente a materialização utilizada até os dias de hoje, foi denominado de WGS84 (G873) e foi implementado em 29 de janeiro de 1997. Esta materialização foi baseada em observações GPS de 12 estações DoD. As coordenadas destas estações foram determinadas com uma precisão de 5 cm (1σ) (NIMA, 1997, p.2-4).

Com relação à produção cartográfica, a Tabela 4 apresenta o quantitativo das cartas do mapeamento sistemático produzidas em SAD 69 (IBGE, 2000, p. 24):

TABELA 4 - QUANTITATIVO DE CARTAS EM SAD 69

ESCALA DA CARTA	QUANTIDADE
1 : 250 000	397
1 : 100 000	963
1 : 50 000	313
1 : 25 000	240
Total	1913

FONTE: IBGE, 2000, p. 24

Com o surgimento de técnicas de levantamento mais precisas, como o GPS que estabelece simultaneamente as três componentes que definem a posição de um ponto no espaço, verificou-se a necessidade de um novo ajustamento com caráter global e integrado às novas observações GPS. Desta forma procurou-se reduzir ao máximo as inconsistências encontradas na rede, uma vez que apesar da alta precisão as redes GPS são freqüentemente distorcidas quando integradas a uma rede originalmente estabelecida por técnicas convencionais (IBGE, 1996, p. 6).

2.3.3 A Nova Realização do SAD 69

O Projeto de Reajustamento da Rede Geodésica Planimétrica Brasileira (REPLAN) foi criado pelo IBGE em 1985 e teve seu término no segundo semestre de 1996 (OLIVEIRA, 1998, p. 47). Através deste projeto, em 1996 a Rede Horizontal foi ajustada simultaneamente, neste caso os parâmetros definidores do SAD 69 foram mantidos e todas as observações da rede foram utilizadas, como por exemplo: direções horizontais, bases geodésicas, azimutes astronômicos, observações Doppler e GPS. Neste reajustamento foi utilizado o sistema *Geodetic Adjustment using Helmert Blocking of Space and Terrestrial Data* (GHOST), cujo objetivo é desenvolver ajustamentos em redes continentais. O *software* GHOST foi anteriormente utilizado pelo Canadá no Projeto *North American Datum of 1983* (NAD 83) (COSTA, S.M.A., 1999, p. 48). O sistema GHOST caracteriza-se pela utilização de modelagem tridimensional para o ajuste por mínimos quadrados (método paramétrico) e o emprego da técnica de *Helmert Blocking* na decomposição de redes geodésicas (esta técnica subdivide grandes sistemas de equações em vários sistemas e, portanto em pequenas soluções) (IBGE, 1996, p. 28).

O resultado deste novo ajustamento, que teve o apoio de medidas GPS ponderadas de acordo com suas precisões, é uma nova materialização do SAD 69 no Brasil, com novos valores de coordenadas para as estações horizontais. Segundo o IBGE (1996, p. 42) 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. Nesta nova materialização as coordenadas dos pontos diferem de até alguns metros daquelas originais no SAD 69. Segundo o IBGE (1996), estas diferenças devem ser interpretadas como reflexo das distorções existentes na rede. Não existem parâmetros de transformação oficiais entre as duas realizações do SAD 69. Porém é importante citar que estudos anteriores foram realizados visando a integração entre as duas materializações do SAD 69: por OLIVEIRA (1998) que apresenta uma análise onde, além de determinar parâmetros de transformação é feita uma modelagem das distorções usando uma transformação geométrica afim geral a 12 parâmetros combinada a uma Triangulação de *Delaunay*; e por COSTA, M.F. (1999) que utiliza uma transformação de similaridade no espaço tridimensional associada ao conceito de modelagem dos resíduos.

Salienta-se que a partir de 1997 os usuários do Banco de Dados Geodésicos do IBGE passaram a receber somente os valores das coordenadas reajustadas com seus respectivos desvios padrão, o que proporcionou ao usuário o conhecimento da confiabilidade das coordenadas das estações. Esta confiabilidade é traduzida pelo desvio padrão das coordenadas. O valor médio do desvio padrão das coordenadas horizontais após o reajustamento é de 10 cm para as estações GPS e de 50 cm para as estações da rede clássica (COSTA, S.M.A, 1999, p.88). A nomenclatura SAD 69 não foi oficialmente alterada com a nova realização. Isto pode acarretar diversos problemas, uma vez que as diferenças de coordenadas nas duas realizações são significativas para determinadas aplicações. Segundo o IBGE (1996), o deslocamento horizontal das coordenadas aumenta proporcionalmente com a distância do ponto origem, chegando a atingir cerca de 15 metros. Ainda, as grandes diferenças (da ordem de 50 m) em estações localizadas no estado do Amapá são em decorrência de problemas encontrados nos resultados antigos (IBGE, 1996, p.42). A Tabela 5 indica o efeito de uma variação de 15 m nas escalas do mapeamento sistemático:

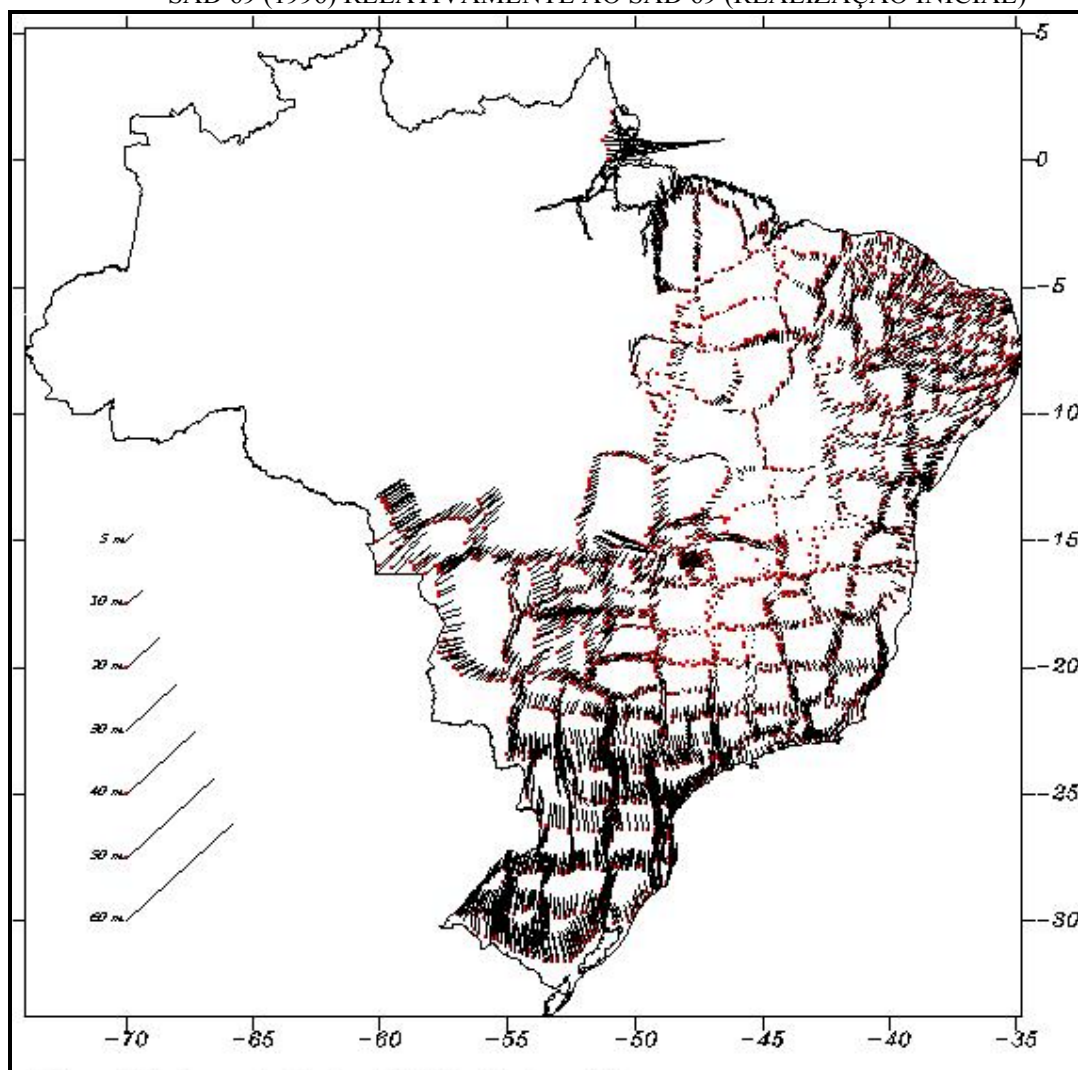
TABELA 5 – EFEITO DA VARIAÇÃO DE 15 m NAS ESCALAS DO MAPEAMENTO SISTEMÁTICO

ESCALA DA CARTA	EFEITO (mm)
1 : 1 000 000	0,015
1 : 500 000	0,03
1 : 250 000	0,06
1 : 100 000	0,15
1 : 50 000	0,3
1 : 25 000	0,6

A menor resolução perceptível pelo olho humano é de cerca de 0,2 mm, considerando este valor como limite mínimo a partir do qual as variações começam a ser significativas, pode-se observar que para as escalas do mapeamento sistemático, uma alteração de 15 m nas coordenadas começa a ser significativa para as escalas maiores ou iguais a 1:50 000. Um aspecto importante é que o efeito indicado na Tabela 5 é causado apenas pela variação nas coordenadas da rede clássica devido ao reajustamento da rede. O efeito final, segundo a escala da carta, é possivelmente pior, pois se deve considerar ainda os erros inerentes a densificação da rede, os cometidos durante a realização do apoio de campo, enfim, o efeito indicado na Tabela 5 não considera os erros inerentes às diferentes fases do mapeamento.

A Figura 4 apresenta, para a rede clássica, os vetores de variação das coordenadas horizontais entre o SAD 69 (realização inicial) e o SAD 69 (realização 1996). Analisando a figura verifica-se que, no caso da rede clássica, estes vetores assumem amplitudes sistemáticas em relação ao Datum Chuá. Cabe ressaltar que as coordenadas do vértice Chuá não sofreram alteração com o reajustamento. Através da Figura 4 observa-se que para o estado do Paraná as variações entre as coordenadas antigas e as reajustadas são da ordem de 10 m. A variação de aproximadamente 10 m produz um efeito de 0,2 mm nas cartas em escala 1:50 000, sendo então significativa para escalas maiores ou iguais a 1:50 000.

FIGURA 4 - VETORES DE VARIAÇÃO DAS COORDENADAS HORIZONTAIS DA RGB SAD 69 (1996) RELATIVAMENTE AO SAD 69 (REALIZAÇÃO INICIAL)



FONTE: IBGE, 1996, p. 46

Porém o caráter sistemático não é verificado na Rede Geodésica GPS de Alta Precisão do Estado do Paraná. A Tabela 6 indica as coordenadas das estações que compõem a rede em ambas as realizações do SAD 69, realização inicial e realização 1996. Já a Tabela 7 mostra a diferença entre as coordenadas geodésicas (latitude e longitude), expressas em centímetros, entre as duas realizações do SAD 69, bem como o vetor horizontal resultante da diferença destas coordenadas.

TABELA 6 - COORDENADAS NA REALIZAÇÃO SAD 69 E SAD 69 (1996) DA REDE GPS DE ALTA PRECISÃO DO PARANÁ

DESCRIÇÃO		SAD-69		
Ponto	Local	Latitude (S) ° ' "	Longitude (W) ° ' "	h (elip) (m)
91578	Foz do Iguaçu	25 25 10.15191	54 34 05.34608	230.20
91642	Curitiba	25 25 58.53740	49 20 24.61849	955.54
91643	Ponta Grossa	25 05 41.64421	50 06 16.74381	914.60
91644	Jaguariaíva	24 14 29.06792	49 42 15.62844	918.12
91645	Joaquim Távora	23 30 17.28382	49 56 45.16724	516.46
91646	Ortigueira	24 12 04.35130	50 55 55.36803	768.59
91647	Londrina	23 19 20.05643	51 12 05.98103	586.44
91648	Maringá	23 24 19.46150	51 55 58.79631	544.36
91649	Iretama	24 25 12.64874	52 07 19.12354	580.03
91650	Paranavaí	23 05 32.10576	52 26 26.53297	470.32
91651	Goioerê	24 09 51.18984	53 01 56.79544	448.69
91652	Querência do Norte	23 04 06.73041	53 28 46.68048	329.50
91653	Guaíra	24 04 50.13923	54 15 40.56262	233.57
91654	Toledo	24 46 46.16390	53 43 26.99064	472.01
91655	Francisco Beltrão	26 03 31.95745	53 03 53.33140	651.60
91656	Laranjeiras do Sul	25 25 26.74312	52 24 41.85223	881.22
91657	Clevelândia	26 24 57.76798	52 20 55.69603	972.69
91658	Guarapuava	25 21 14.82925	51 27 56.90550	1067.69
91659	Bituruna	26 09 42.31540	51 32 12.52743	894.13
91660	São Mateus do Sul	25 51 34.61574	50 23 48.85953	793.17

DESCRIÇÃO		SAD 69 (1996)		
Ponto	Local	Latitude (S) ° ' "	Longitude (W) ° ' "	h (elip) (m)
91578	Foz do Iguaçu	25 25 10.152410	54 34 05.343880	230.3588
91642	Curitiba	25 25 58.538584	49 20 24.616238	955.5862
91643	Ponta Grossa	25 05 41.645369	50 06 16.739695	915.0740
91644	Jaguariaíva	24 14 29.068120	49 42 15.626150	918.7239
91645	Joaquim Távora	23 30 17.283849	49 56 45.163250	516.9136
91646	Ortigueira	24 12 04.351867	50 55 55.364331	768.8707
91647	Londrina	23 19 20.056452	51 12 05.977423	586.8741
91648	Maringá	23 24 19.461993	51 55 58.791273	544.5463
91649	Iretama	24 25 12.649243	52 07 19.118659	579.9752
91650	Paranavaí	23 05 32.106047	52 26 26.537855	470.1478
91651	Goioerê	24 09 51.190178	53 01 56.793009	448.6174
91652	Querência do Norte	23 04 06.729962	53 28 46.679505	329.6304
91653	Guaíra	24 04 50.140432	54 15 40.569525	234.2930
91654	Toledo	24 46 46.174258	53 43 27.001433	472.1080
91655	Francisco Beltrão	26 03 31.992277	53 03 53.380351	652.0574
91656	Laranjeiras do Sul	25 25 26.735847	52 24 41.863150	881.7493
91657	Clevelândia	26 24 57.815099	52 20 55.766398	973.7498
91658	Guarapuava	25 21 14.828012	51 27 56.905779	1067.9386
91659	Bituruna	26 09 42.326560	51 32 12.508739	894.9662
91660	São Mateus do Sul	25 51 34.621123	50 23 48.865778	793.4210

FONTE: FREITAS; DALAZOANA, 2000, não paginado

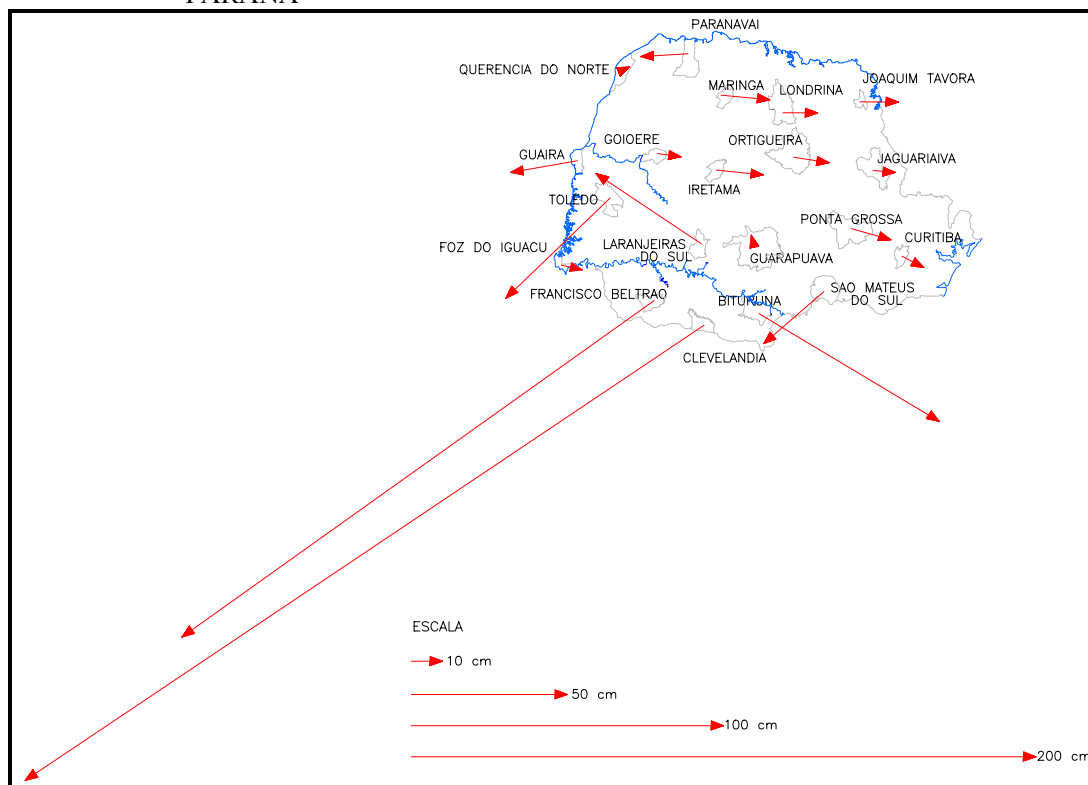
TABELA 7 - DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS GEODÉSICAS (LATITUDE E LONGITUDE) E VETOR HORIZONTAL RESULTANTE PARA A REDE GPS DE ALTA PRECISÃO DO PARANÁ

DESCRIÇÃO		DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS GEODÉSICAS		VETOR HORIZONTAL RESULTANTE
Ponto	Local	$\delta\phi$ (cm)	$\delta\lambda$ (cm)	r (cm)
91578	Foz do Iguaçu	-1,54	6,80	6,97
91642	Curitiba	-3,66	6,96	7,86
91643	Ponta Grossa	-3,58	12,71	13,20
91644	Jaguariaíva	-0,62	7,07	7,10
91645	Joaquim Távora	-0,09	12,33	12,33
91646	Ortigueira	-1,75	11,43	11,56
91647	Londrina	-0,07	11,14	11,14
91648	Maringá	-1,52	15,56	15,63
91649	Iretama	-1,55	15,08	15,16
91650	Paranavaí	-0,89	-15,09	15,12
91651	Goioerê	-1,04	7,51	7,58
91652	Querência do Norte	1,38	3,01	3,31
91653	Guaíra	-3,71	-21,33	21,65
91654	Toledo	-32,00	-33,34	46,21
91655	Francisco Beltrão	-107,59	-151,22	185,59
91656	Laranjeiras do Sul	22,47	-33,73	40,53
91657	Clevelândia	-145,56	-217,38	261,61
91658	Guarapuava	3,82	-0,86	3,91
91659	Bituruna	-34,47	57,74	67,25
91660	São Mateus do Sul	-16,63	-19,30	25,48

NOTA: Para o cálculo das diferenças entre as coordenadas geodésicas (latitude e longitude) em centímetros, considerou-se um raio médio para a Terra igual a 6 372 km.

Uma melhor visualização dos dados contidos na Tabela 7 pode ser obtida através da Figura 5, na qual são plotadas a magnitude e a orientação do vetor resultante. Este vetor resultante indica a variação total das coordenadas geodésicas horizontais, latitude e longitude, entre as duas realizações do SAD 69 para cada estação que compõe a rede GPS de Alta Precisão do Estado do Paraná.

FIGURA 5 - VETORES DE VARIAÇÃO DAS COORDENADAS GEODÉSICAS ENTRE AS DUAS REALIZAÇÕES DO SAD 69 PARA A REDE GPS DO ESTADO DO PARANÁ



Conforme pode ser constatado na Figura 5 as variações não apresentam caráter sistemático em todo o estado, apenas em determinadas regiões. Na figura é possível observar que os vetores resultantes dos vértices localizados nas cidades de Guaíra, Toledo, Francisco Beltrão, Clevelândia e São Mateus do Sul possuem orientação sudoeste. Já os vetores resultantes dos vértices localizados em Maringá, Londrina, Joaquim Távora, Ortigueira, Goioerê, Iretama, Jaguariaíva, Ponta Grossa, Curitiba e Bituruna, possuem orientação de leste a sudeste. Quanto à magnitude, existem variações aleatórias entre os valores iniciais e os reajustados, que chegam de poucos centímetros até aproximadamente três metros. As mínimas variações em latitude e longitude ocorreram na estação Querência do Norte, nesta estação houve uma variação de cerca de 1,38 cm em latitude e de 3,01 cm em longitude, resultando numa variação total de 3,31 cm. As máximas variações em latitude e longitude

ocorreram na estação Clevelândia, onde houve uma variação aproximada de 145,56 cm em latitude e de 217,38 cm em longitude, resultando numa variação total de 261,61 cm.

A variação de aproximadamente 10 m nas coordenadas dos vértices da rede clássica no Paraná não é significativa para as escalas menores do que 1:50 000 assim como as variações nas coordenadas dos pontos da Rede GPS de Alta Precisão do Estado. Porém a preocupação que surge é quanto à falta de conhecimento dos usuários quanto às transformações ocorridas, pois é possível verificar a implantação de novas redes GPS e até mesmo, de redes empregadas para o apoio à Cartografia, com base em pontos da rede clássica, com base em pontos da rede GPS de alta precisão e de forma mista. E estas novas redes são vinculadas ora à antiga, ora à nova realização do SAD 69. Devido a deficiências na base geodésica, os produtos cartográficos gerados, incluindo os cadastrais e em SIG, em escalas grandes, podem ser completamente distorcidos e incompatíveis com outros produtos. Os órgãos envolvidos com a produção cartográfica no Estado deveriam ter a clara concepção dos produtos que estão sendo gerados, porém isso nem sempre é verdadeiro e a situação torna-se mais crítica quando se trata da comunidade usuária leiga que desconhece a maioria dos aspectos abordados anteriormente.

2.4 ADOÇÃO DE UM SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA A AMÉRICA DO SUL

Até o advento da Geodésia por satélites, nas décadas de 60 e 70, a diferença entre os centros dos elipsóides de referência, adotados nos mais diversos SGRs nacionais, e o centro de massa da Terra não era realmente conhecida. Devido a isto, eram determinadas orientações locais para cada sistema geodésico de referência. Esta era a única forma de realização possível na prática e foi válida para vários sistemas de referência nacionais que foram desenvolvidos nesta mesma época em todo o mundo. No final da década de 80 e na década de 90, o uso crescente do GPS e as distorções

causadas na materialização dos sistemas de referência nacionais evidenciaram as inconsistências existentes entre estes e os sistemas de referência internacionais (sistemas baseados na adoção de elipsóides geocêntricos) (OSG, 2000). Além disto, as demais técnicas de posicionamento geodésico atingiram um alto grau de precisão o que tornou necessária a adoção de sistemas de referência que possibilitem um georeferenciamento global, de forma a compatibilizar e promover a integração das informações internacionalmente e que considerem a variação temporal das coordenadas de acordo com a dinâmica terrestre, de forma a tomar vantagem da alta precisão oferecida pelos atuais sistemas de posicionamento global.

Desta maneira, um sistema geodésico de referência moderno deve ser definido com base na adoção de um elipsóide de revolução cuja origem coincida com o centro de massas da Terra e deve ser materializado através de uma rede de estações com coordenadas geodésicas tridimensionais conhecidas. Atualmente, o modelo geométrico de referência recomendado pela Associação Internacional de Geodésia (IAG) é o GRS80 (*Geodetic Reference System, 1980*) e o referencial mais preciso é o ITRS [IERS (*International Earth Rotation Service*) *Terrestrial Reference System*] cuja materialização é chamada de ITRF [IERS (*International Earth Rotation Service*) *Terrestrial Reference Frame*]. O ITRS é materializado periodicamente devido à variação temporal das coordenadas das estações, com isso sua denominação vem sempre acompanhada do ano em que foi estabelecido (IBGE, 2000, p. 10).

Tendo em vista os aspectos evidenciados acima, muitos países já adotaram sistemas de referência geocêntricos, como por exemplo: Austrália, Estados Unidos, Canadá, países da Europa, África do Sul, Nova Zelândia (OSG, 2000) e Argentina. Neste sentido, o projeto SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul) foi criado na Conferência Internacional para Definição de um Datum Geocêntrico para a América do Sul, realizada em outubro de 1993 em Assunção, Paraguai, e teve estabelecidos os seguintes objetivos (IBGE, 1997, p. 1):

- a) definir um sistema de referência geocêntrico para a América do Sul;

- b) estabelecer e manter uma rede de referência, e
- c) definir e estabelecer um datum geocêntrico.

Com vistas a atender os objetivos acima foram adotadas, durante a conferência, as seguintes definições:

- a) sistema de referência SIRGAS: Materialização do *International Terrestrial Reference System* (ITRS) na América do Sul via estações GPS, propiciando uma rede continental vinculada a um *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) em dada época;
- b) modelo geométrico geocêntrico: eixos coordenados baseados no ITRS e parâmetros do elipsóide GRS80.

A realização inicial do sistema SIRGAS é composta por 58 estações distribuídas pelo continente Sul Americano, conforme mostra a Figura 6, onze destas estações estão localizadas no Brasil, sendo que nove delas coincidem com estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). As coordenadas das estações SIRGAS foram determinadas através de uma campanha GPS realizada no período de 26 de maio a 4 de junho de 1995 e referidas ao ITRF94, época 1995,4 (IBGE, 2000, p. 10).

FIGURA 6 - REDE SIRGAS 1995



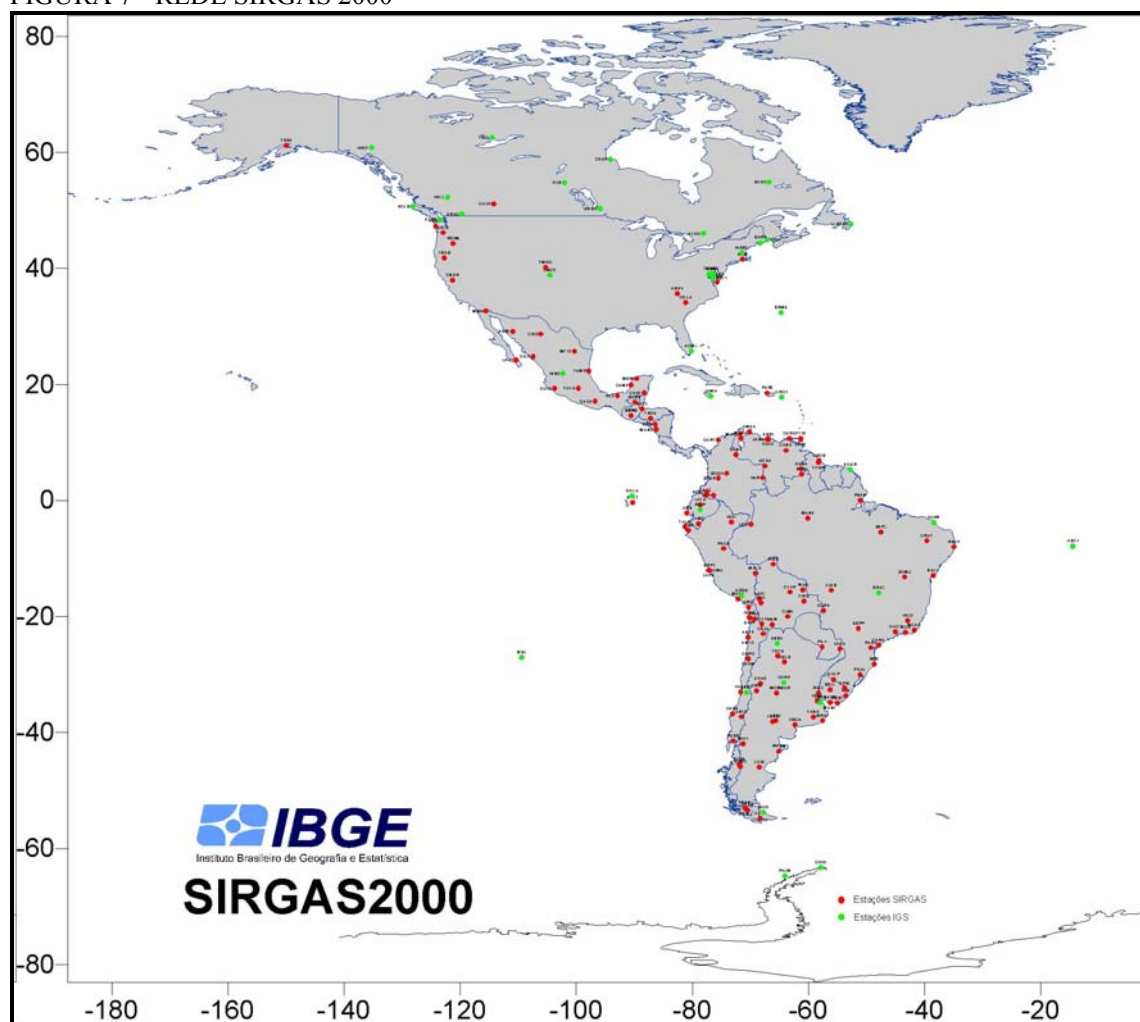
FONTE: IBGE, 2000, p. 11

NOTA: os diferentes símbolos representam os vários receptores GPS utilizados durante a campanha SIRGAS de 1995.

No período de 10 a 19 de maio de 2000 foi realizada a campanha SIRGAS 2000, tendo em vista a manutenção do SIRGAS como “referencial geodésico capaz de atender aos padrões atuais de posicionamento”, além de atender à componente altimétrica do SIRGAS. Esta componente altimétrica surgiu visando a definição e

implantação de um sistema altimétrico único para a América do Sul. Na campanha de 2000 foram reocupadas as estações da campanha de 1995, ocupadas estações próximas aos marégrafos que definem o referencial altimétrico em cada país e ocupadas estações altimétricas próximas às fronteiras entre os países. Esta nova campanha é composta por 184 estações situadas na América do Sul, América Central e América do Norte (IBGE, 2001a) conforme mostra a Figura 7. De acordo com resolução tomada durante o *IAG Symposium on Vertical Reference Systems, Cartagena 2001*, o Sistema SIRGAS passou a ser denominado Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas.

FIGURA 7 - REDE SIRGAS 2000



FONTE: IBGE, 2001a

Segundo FORTES (2000), a rede SIRGAS constitui-se numa das redes geodésicas continentais mais precisas do mundo. O WGS 84 (G873) possui características muito próximas ao SIRGAS, podendo ambos, para efeitos práticos da Cartografia, serem considerados como equivalentes, o que não é válido quando se trata de fins científicos. O WGS 84 já sofreu duas atualizações, desde o estabelecimento do sistema GPS, nessas atualizações o objetivo foi aproximá-lo ao ITRF, por ser este último o mais preciso. Para fins cartográficos, a realização atual do WGS 84 pode ser considerada coincidente com as realizações do ITRS, uma vez que a diferença entre coordenadas de um ponto referidas aos dois sistemas está estimada em algo menor do que cinco centímetros. Tendo em vista que o SIRGAS constitui uma densificação do ITRF94 na América do Sul, a mesma coincidência com o WGS 84 pode ser assumida, conforme o exposto anteriormente (IBGE, 2000, p.12). A adoção do SIRGAS segue uma tendência atual tendo em vista as potencialidades do GPS e facilidades para os usuários, pois com um sistema geocêntrico as coordenadas obtidas com GPS relativamente a esta rede podem ser aplicadas diretamente a todos os levantamentos, evitando a necessidade de transformações e integração entre os dois referenciais (FREITAS; DALAZOANA, 2000, não paginado).

A densificação da Rede SIRGAS é feita a partir da integração das redes geodésicas individuais dos países da América do Sul à Rede de Referência SIRGAS. Esta integração é importante para a verificação das distorções locais. A integração das redes nacionais com o SIRGAS vem sendo feita na Colômbia com o projeto MAGNA (*Marco Geocêntrico de Referência Nacional*) e na Argentina com o projeto POSGAR (*POSiciones Geodésicas ARGentinas*). Estes países optaram pelo desenvolvimento de novas redes. No Uruguai a rede planimétrica de 1ª ordem foi ajustada no sistema SIRGAS em 1998, obtendo-se parâmetros de transformação entre os dois sistemas e já estão sendo produzidos os primeiros produtos cartográficos em SIRGAS (COSTA, 2000). Na Venezuela, o projeto REGVEN (*Red Geocéntrica Venezolana*) tem como

objetivo o estabelecimento de uma rede geodésica de alta precisão caracterizada como uma densificação da rede SIRGAS. O sistema denominado SIRGAS-REGVEN foi oficialmente adotado na Venezuela em 1º de abril de 1999 em substituição ao PSAD 56 (La Canoa). A REGVEN vem sendo densificada desde 1995 e já foram determinados parâmetros de transformação entre SIRGAS-REGVEN e PSAD 56 (La Canoa), uma vez que existem muitos vértices de triangulação e poligonação referidos ao antigo sistema. Para o estabelecimento da REGVEN foram realizadas duas campanhas GPS, simultâneas às campanhas SIRGAS de 1995 e 2000 (IGVSB, 2001, não paginado).

COSTA, S.M.A. (1999) apresenta a integração da Rede Geodésica Brasileira ao SIRGAS, desenvolvida através de um ajustamento global e simultâneo da Rede Planimétrica Brasileira. Neste caso, foi realizado um ajustamento combinando as redes clássica e GPS e tendo como injeções as estações SIRGAS no Brasil. Apresenta ainda uma proposta para modelar as distorções provenientes das materializações de ambos os sistemas através de um modelo polinomial de distorção.

Já que o processo de transformação de coordenadas entre sistemas de referência por meio de parâmetros de transformação é considerado um dos métodos de integração, COSTA, S.M.A. (1999, p. 94) estimou parâmetros de transformação visando a integração do SAD 69 (realização 1996) com o SIRGAS. Os parâmetros foram estimados através do modelo matemático de similaridade e onze estações, sendo elas: Chuá, Curitiba (RBMC), Brasília (RBMC), Manaus (RBMC), 91696 (rede São Paulo), Presidente Prudente (RBMC), Cachoeira Paulista (SIRGAS), Rio de Janeiro (SIRGAS), Fortaleza (RBMC), Viçosa (RBMC) e Bom Jesus da Lapa (RBMC). Foram realizados testes com 3, 4 e 7 parâmetros e os resultados encontram-se na Tabela 8.

TABELA 8 – PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO SAD 69 (REALIZAÇÃO 96) PARA SIRGAS – TESTE DE 3, 4 E 7 PARÂMETROS COM 11 ESTAÇÕES

PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO	3 PARÂMETROS	4 PARÂMETROS	7 PARÂMETROS
Translação em X (m) / σ	-67,358 / 0,013	-67,185 / 0,041	-67,084 / 0,085
Translação em Y (m) / σ	3,974 / 0,013	3,789 / 0,044	3,839 / 0,079
Translação em Z (m) / σ	-38,314 / 0,013	-38,386 / 0,020	-38,275 / 0,068
Rotação em X (") / σ	-	-	-0,0003 / 0,0021
Rotação em Y (") / σ	-	-	0,0060 / 0,0021
Rotação em Z (") / σ	-	-	-0,0024 / 0,0033
Escala (ppm) / σ	-	0,0420 / 0,010	0,0420 / 0,009

FONTE: COSTA, S.M.A., 1999, p. 94

IBGE (2000, p. 13) apresenta outro ensaio para a determinação de parâmetros de transformação, utilizando o modelo de similaridade e quatro estações cujas coordenadas eram conhecidas em SAD 69 (materialização 1996) e em SIRGAS. As estações utilizadas para a determinação destes parâmetros foram: Curitiba (RBMC), Cachoeira Paulista (SIRGAS), Brasília (RBMC) e Presidente Prudente (RBMC). Desconsiderando as rotações e o fator de escala, os resultados obtidos são os indicados na Tabela 9 (IBGE, 2000, p. 13):

TABELA 9 – PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO DE SAD 69 (REALIZAÇÃO 96) PARA SIRGAS – TESTE COM 4 ESTAÇÕES

PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO	VALORES
Translação em X	-67,327 m \pm 0,036 m
Translação em Y	3,899 m \pm 0,036 m
Translação em Z	-38,292 m \pm 0,036 m

FONTE: IBGE, 2000, p. 13

Salienta-se que estes resultados só poderão ser utilizados como oficiais a partir da adoção do SIRGAS como referencial do país (IBGE, 2000, p. 13). Os parâmetros de transformação apresentados nas Tabelas 8 e 9 são parâmetros globais, porém devido à mudança do elipsóide de referência e no centro (origem) do sistema de coordenadas, as diferenças entre o SAD 69 e o SIRGAS não se apresentam homogêneas sobre todo o território nacional. COSTA, S.M.A (1999, p. 95) mostra que as diferenças nas coordenadas planimétricas entre os sistemas SAD 69 (realização

1996) e SIRGAS, calculadas para as onze estações que participaram da geração dos parâmetros apresentados na Tabela 8, podem variar de 58 m na região Nordeste até 73 m na região Sul do Brasil. Considerando um deslocamento médio de 65 m no contexto nacional, sua correspondência segundo a escala da carta pode ser vista na Tabela 10.

TABELA 10 – EFEITO DA DIFERENÇA ENTRE O SAD 69 (1996) E O SIRGAS NAS DIFERENTES ESCALAS DO MAPEAMENTO

ESCALA	DESLOCAMENTO (mm)
1:1 000 000	0,065
1:500 000	0,13
1:250 000	0,26
1:100 000	0,65
1:50 000	1,30
1:25 000	2,60
1:10 000	6,5
1:5 000	13,0
1:2 000	32,5
1:1 000	65,0

FONTE: IBGE, 2000, p. 22

Analisando a Tabela 10, observa-se que a diferença entre SIRGAS e SAD 69 (1996) começa a ser significativa para as escalas maiores ou iguais a 1:250 000. No caso das cartas em escala 1:250 000 uma variação de 65 m entre os dois sistemas provocaria um deslocamento de 0,26 mm. Esta variação torna-se extremamente sensível nas cartas em escalas grandes, como as cartas em escala cadastral.

Considerando os avanços obtidos através do Projeto SIRGAS no que diz respeito a um sistema geodésico de referência unificado, a 7th *United Nations Regional Cartographic Conference for the Americas*, realizada em Nova York no período de 22 a 26 de janeiro de 2001, recomendou que os países membros das Américas integrem seus sistemas de referência nacionais a um sistema de referência compatível com o SIRGAS. Essa integração é importante pois diversos problemas como, por exemplo, os relativos as fronteiras entre países, podem ser resolvidos mais facilmente com a adoção de um sistema geodésico de referência único, além de facilitar a integração e o intercâmbio de dados, entre outros.