

**Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área
Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e
Costeira Adjacente**

A3DIFS1 – Material Suplementar 1

**Ambiente Dulcícola– Tema Integração Fluvio-Estuarina: Fluxos
Hidrológicos**

RT-42 JAN 23

RSE2022 PMBA/FEST

Vitória,

Janeiro de 2023

1 METODOLOGIA

1.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

As estações pluviométricas existentes no interior e áreas lindeiras da bacia do Rio Doce foram identificadas por meio de consultas aos bancos de dados da Agência Nacional de Águas – ANA, Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural – Incaper, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN e Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

Para a criação dos mapas de interpolação da precipitação acumulada durante o PMBA/Fest, foram utilizados dados de 17 estações pluviométricas telemétricas (Tabela 1), e para os mapas de interpolação da precipitação acumulada total, do período úmido e do período seco da série histórica de 30 anos (1985-2014) foram utilizadas 70 estações pluviométricas convencionais (Tabela 2) de responsabilidade da Agência Nacional de Águas – ANA e operadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM. Os três mapas foram produzidos por três métodos de interpolação existentes no software ArcGis: Inverse Distance Weight (IDW), Spline e Kriging. Para os interpoladores IDW e Kriging, os mapas gerados foram bem semelhantes, tanto em relação à distribuição espacial da chuva quanto em termos numéricos (acumulados máximos e mínimos). Decidiu-se pela utilização do interpolador IDW, seguindo a metodologia utilizada no primeiro ano de monitoramento do PMBA/Fest, ou seja, potência igual a 2 e número de pontos igual a 6.

Tabela 1: Estações telemétricas utilizadas para análise pluviométrica 7 dias antes de cada amostragem

Resp./Operadora	Código	Estação
ANA/CPRM	A532	Governador Valadares
ANA/CPRM	316550301A	Sardoá – Centro
ANA/CPRM	A533	Guanhães
ANA/CPRM	1942062	PCH Inhapi Jusante
ANA/CPRM	312260301A	Dom Joaquim – Centro
ANA/CPRM	320270201A	São Domingos do Norte
ANA/CPRM	320400501A	Pancas
ANA/CPRM	311600101A	Chalé – Centro
ANA/CPRM	3155	Piracicaba Centro
ANA/CPRM	320460902A	Santa Teresa - Alto Caldeirão
ANA/CPRM	320010208A	Afonso Cláudio – Piracema
ANA/CPRM	320455	Alto Rio Possmoser
ANA/CPRM	1942034	GCH Bom Jesus do Galho
ANA/CPRM	2042053	PCH Tulio Cordeiro de Mello Montante 2
ANA/CPRM	315490301A	Rio Casca Centro
ANA/CPRM	2043084	PCH Furquim Jusante
ANA/CPRM	316600601A	Senhora de Oliveira – Centro

Tabela 2: Estações pluviométricas utilizadas para a interpolação do acumulado de precipitação da série histórica

Resp./Operadora	Código	Estação
ANA/CPRM	2042010	Abre Campo
ANA/CPRM	2043009	Acaiaca Jusante
ANA/CPRM	2041023	Afonso Cláudio montante
ANA/CPRM	1742019	Água Boa
ANA/CPRM	1840000	Água Branca
ANA/CPRM	1941012	Alto Rio Novo
ANA/CPRM	1941006	Assaraí montante
ANA/CPRM	1941003	Baixo Guandu
ANA/CPRM	1940016	Barra de São Gabriel
ANA/CPRM	1941005	Barra do Cuieté jusante
ANA/CPRM	1942030	Belo Oriente
ANA/CPRM	1942002	Bom Jesus do Galho
ANA/CPRM	2043026	Braz Pires
ANA/CPRM	1942031	Cachoeira dos Óculos montante
ANA/CPRM	1940020	Caldeirão
ANA/CPRM	1841003	Campanário
ANA/CPRM	1940005	Cavalinho
ANA/CPRM	1940006	Colatina - Corpo de Bombeiros
ANA/CPRM	2043059	Colégio Caraça
ANA/CPRM	1943002	Conc. do Mato Dentro
ANA/CPRM	1842005	Coroaci
ANA/CPRM	2143003	Desterro do Melo
ANA/CPRM	1841019	Divino de Laranjeiras
ANA/CPRM	1942008	Dom Cavati
ANA/CPRM	2041008	Dores do Manhumirim
ANA/CPRM	2042031	Fazenda Cachoeira D'Antas
ANA/CPRM	2043027	Fazenda Ocidente
ANA/CPRM	2043011	Fazenda Paraíso
ANA/CPRM	2041048	Fazenda Vargem Alegre
ANA/CPRM	1943003	Ferros
ANA/CPRM	1841020	Governador Valadares
ANA/CPRM	1842007	Guanhães
ANA/CPRM	1941009	Ibituba
ANA/CPRM	1941000	Ipanema
ANA/CPRM	1940012	Itaimbé
ANA/CPRM	1941018	Itanhomi
ANA/CPRM	1940000	Itarana
ANA/CPRM	1941008	Laranja da Terra
ANA/CPRM	1742017	Malacacheta
ANA/CPRM	1942029	Mario de Carvalho
ANA/CPRM	2042017	Matipó
ANA/CPRM	1943025	Morro do Pilar
ANA/CPRM	1941019	Mutum

Resp./Operadora	Código	Estação
ANA/CPRM	1942032	Naque Velho
ANA/CPRM	1940013	Novo Brasil
ANA/CPRM	1940009	Pancas
ANA/CPRM	2043010	Piranga
ANA/CPRM	2042018	Ponte Nova jusante
ANA/CPRM	2043014	Porto Firme
ANA/CPRM	2042008	Raul Soares montante
ANA/CPRM	1941004	Resplendor jusante
ANA/CPRM	1940023	Rio Bananal
ANA/CPRM	2042011	Rio Casca
ANA/CPRM	1943001	Rio Piracicaba
ANA/CPRM	1843012	Rio Vermelho
ANA/CPRM	1943007	Santa Barbara
ANA/CPRM	1943008	Santa Maria do Itabira
ANA/CPRM	1842008	Santa Maria do Suaçuí
ANA/CPRM	1941011	Santo Antônio do Manhuaçu
ANA/CPRM	1940001	São João de Petrópolis
ANA/CPRM	1842020	São João Evangelista
ANA/CPRM	2042016	São Miguel do Anta
ANA/CPRM	1842004	São Pedro do Suaçuí
ANA/CPRM	1941010	São Sebastião da Encruzilhada
ANA/CPRM	1843011	Serro
ANA/CPRM	1841011	Tumiritinga
ANA/CPRM	2043025	Usina da Brecha
ANA/CPRM	1943027	Usina Peti
ANA/CPRM	1942006	Vermelho Velho
ANA/CPRM	1841001	Vila Matias montante

Com o objetivo de verificar a origem das águas que compunham as vazões do rio Doce durante as campanhas de monitoramento, foi realizada uma análise das vazões das sub-bacias no período antecedente às campanhas, pelo fato de ser considerável a influência do rio Doce no período antecedente às campanhas de monitoramento. Como a influência do reservatório da Usina Hidrelétrica Eliezer Batista (Aimorés) foi considerada significativa na mistura das águas originadas a montante deste, a análise utilizou as vazões do rio Doce que afluem no lago e as vazões das estações a jusante do reservatório, que estão situadas nas bacias dos rios Pancas, Manhuaçu, Guandu, Santa Joana, São José, Colatina e Santa Maria do Rio Doce.

Os principais fatores que influem no regime hídrico de uma região são a topografia, a capacidade de infiltração dos solos (estritamente ligada ao uso e ocupação, às suas condições físicas como porosidade, textura, estrutura, entre outros) e o regime climático local, principalmente pluviosidade e os fatores que interferem na evapotranspiração (vento, radiação solar, temperatura e umidade relativa

do ar). A espacialização dessas variáveis reflete na diferenciação do regime fluviométrico de uma bacia ou das sub-bacias que a compõem, como é o caso da Bacia do Rio Doce.

Foi aplicada a modelagem hidrológica à Bacia do Rio Doce, justificada pelo fato de que a publicação de dados fluviométricos das estações na bacia do rio Doce não ocorre em tempo real, o que dificulta a interpretação dos dados quanto à origem das águas monitoradas por este PMBA/Fest, isto é, qual a percentagem da água monitorada em um determinado dia que vem da região próxima à barragem de Fundão e qual é a percentagem vinda de sub-bacias não impactadas pelo rompimento da barragem. Como as estações gerenciadas pelo CEMADEN e pela ANA (sistema Telemetria) publicam diariamente dados pluviométricos, julgou-se conveniente ajustar um modelo hidrológico à bacia do rio Doce para simular vazões tendo dados pluviométricos como uma das variáveis de entrada, de forma a auxiliar nas análises.

Dentre os modelos hidrológicos disponíveis, decidiu-se por utilizar o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Trata-se de um modelo hidrológico de simulação diária integrado a um Sistema de Informações Geográficas que permite a representação da bacia hidrográfica estudada em *layers*, sendo possível, desta forma, utilizar modelos digitais de elevação, mapas de solo e uso e ocupação do solo como dados de entrada e estudar o comportamento hidrológico das diversas variáveis de entrada, inclusive as ligadas ao clima. O modelo foi desenvolvido pelo *US Department of Agriculture - Agricultural Research Service* no *Soil and Water Research Laboratory*, em *Temple no Texas, EUA*, em 1990 e vem sofrendo atualizações constantes ao longo dos anos.

O SWAT permite que diferentes processos físicos sejam simulados em uma bacia hidrográfica com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água em bacias hidrográficas não instrumentadas (MACHADO, 2002).

O SWAT pode ser classificado como um modelo baseado em processos, incorporando equações que descrevem a relação entre as variáveis do sistema. É também classificado como um modelo distribuído, pois subdivide a bacia hidrográfica em sub-bacias ou Unidades de Resposta Hidrológica (URH) de modo a refletir a diferença do tipo de solo, cobertura vegetal, topografia e uso do solo em cada URH, sendo possível a subdivisão da bacia em centenas a milhares de unidades, cada uma representando um sistema aberto (ANDRIOLO *et al*, 2008).

Após os trabalhos de coleta e compilação de dados hidrológicos, a simulação hidrológica se dividiu em quatro etapas:

- Elaboração de mapas.
- Calibração do modelo
- Modelagem hidrológica atual.
- Análise dos resultados.

As informações cartográficas que compuseram dados de entrada do modelo SWAT foram o Modelo Digital de Elevação (MDE) e os mapas Pedológico e de Uso e Ocupação do Solo da bacia do rio Doce.

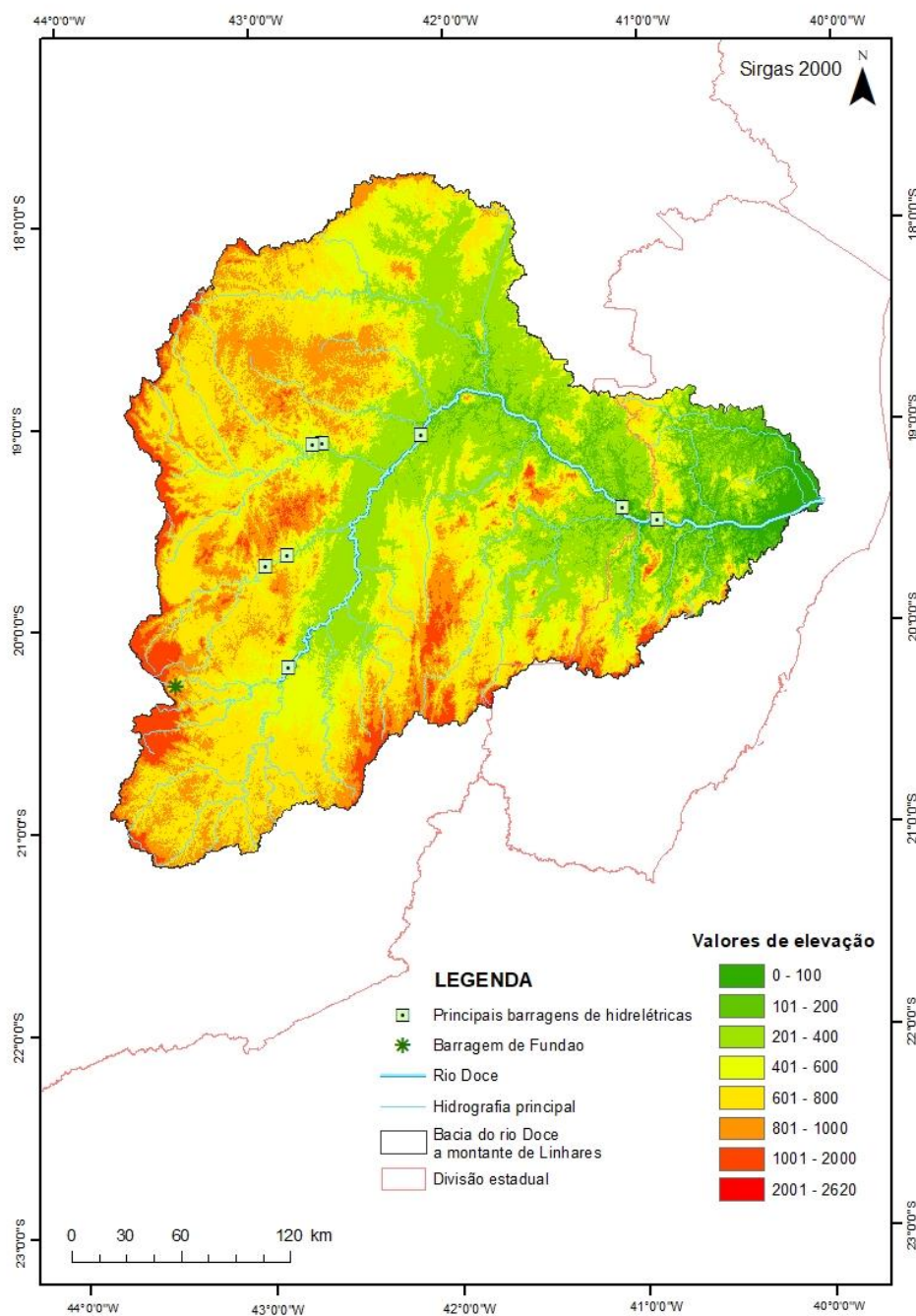
O MDE utilizado foi o disponibilizado no Portal para Informações e Dados Espaciais da Agência Nacional de Águas (GeoNetwork – ANA, 2018). Este possui moderada resolução espacial (células de 10m) e foi criado a partir de Modelos Digitais SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e *Global Digital Elevation Map*. A interpolação utilizada para a elaboração do MDE com resolução de 10 m foi pelo método “*Spline*”. Além disso, foram utilizados os pontos altimétricos cotados para alocação de torres de transmissão de sinal de telefonia celular distribuídos aleatoriamente por toda a área do projeto, aprimorando a acurácia do dado. Para a área correspondente ao fuso 23, foram utilizados 9.720 pontos com as coordenadas planialtimétricas conhecidas e na área pertencente ao fuso 24, um total de 6.478 pontos. Como resultado, foi gerado um MDE de Superfície (MDS) com uma precisão de 5 m na altimetria e 10 m na planimetria.

O Mapa de Uso e Ocupação do Solo utilizado é também disponibilizado pelo Portal para Informações e Dados Espaciais (GeoNetwork – ANA, 2018). O mapa foi criado por meio de imagens de satélites ALOS, QUICKBIRD, WORLD VIEW I e LANDSAT-7 e o produto tem uma escala de interpretação de 10 metros compatível com escala 1:100.000.

Já o Mapa Pedológico da bacia do Rio Doce foi criado em 2006 pela Diretoria de Geociências do IBGE e está disponibilizado pelo Portal FTP deste órgão em resolução 1:5.000.000 (IBGE, 2007).

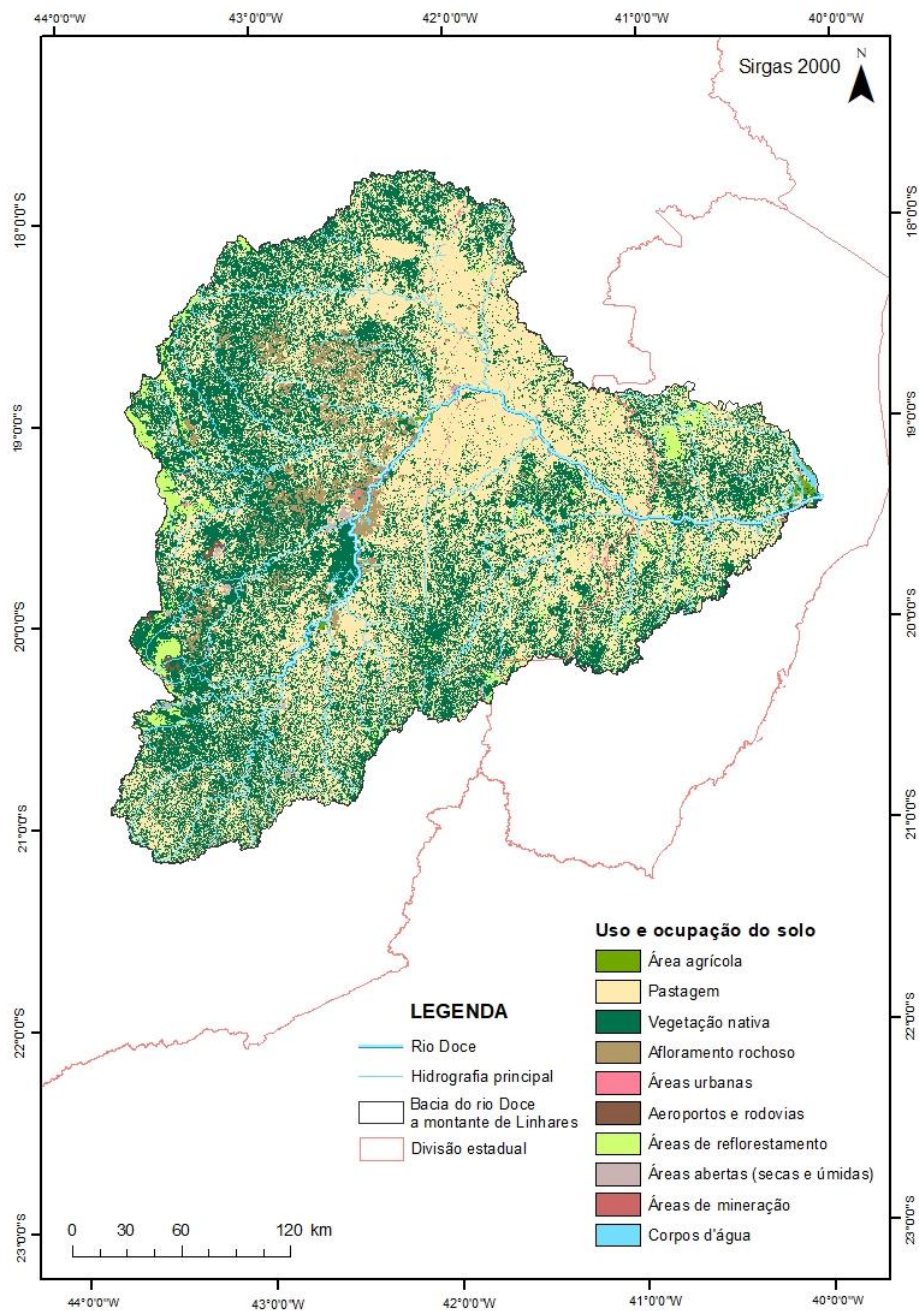
Os dados cartográficos e de altimetria utilizados estão apresentados a seguir: o MDE é apresentado na Figura 1, o mapa de Uso e ocupação do solo, na Figura 2e o Mapa Pedológico, na Figura 3.

Figura 1: MDE da Bacia do Rio Doce



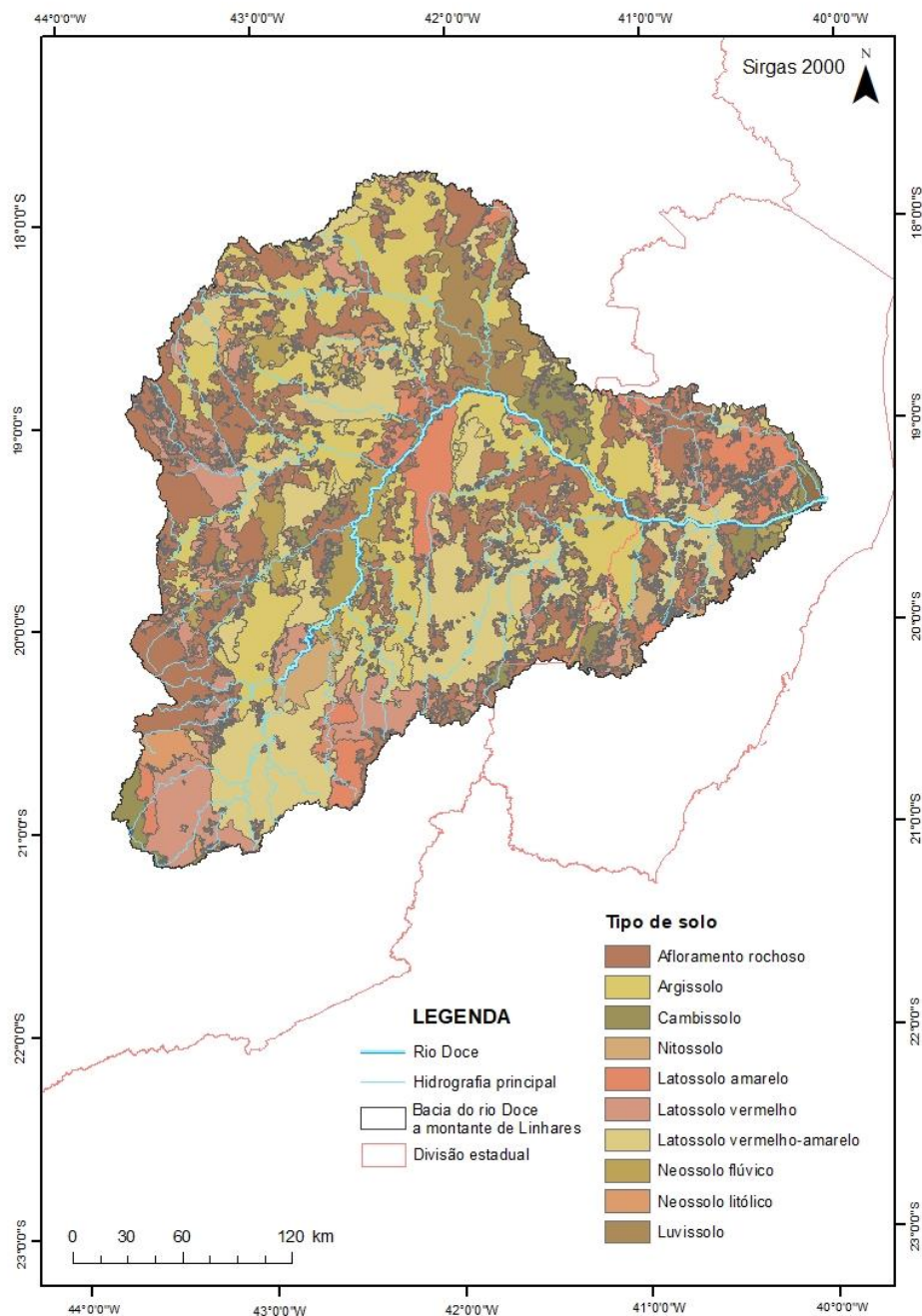
Fonte: ANA adaptado, 2018.

Figura 2: Mapa de Uso e Ocupação do solo da Bacia do Rio Doce



Fonte: ANA adaptado, 2018.

Figura 3: Mapa pedológico da Bacia do Rio Doce

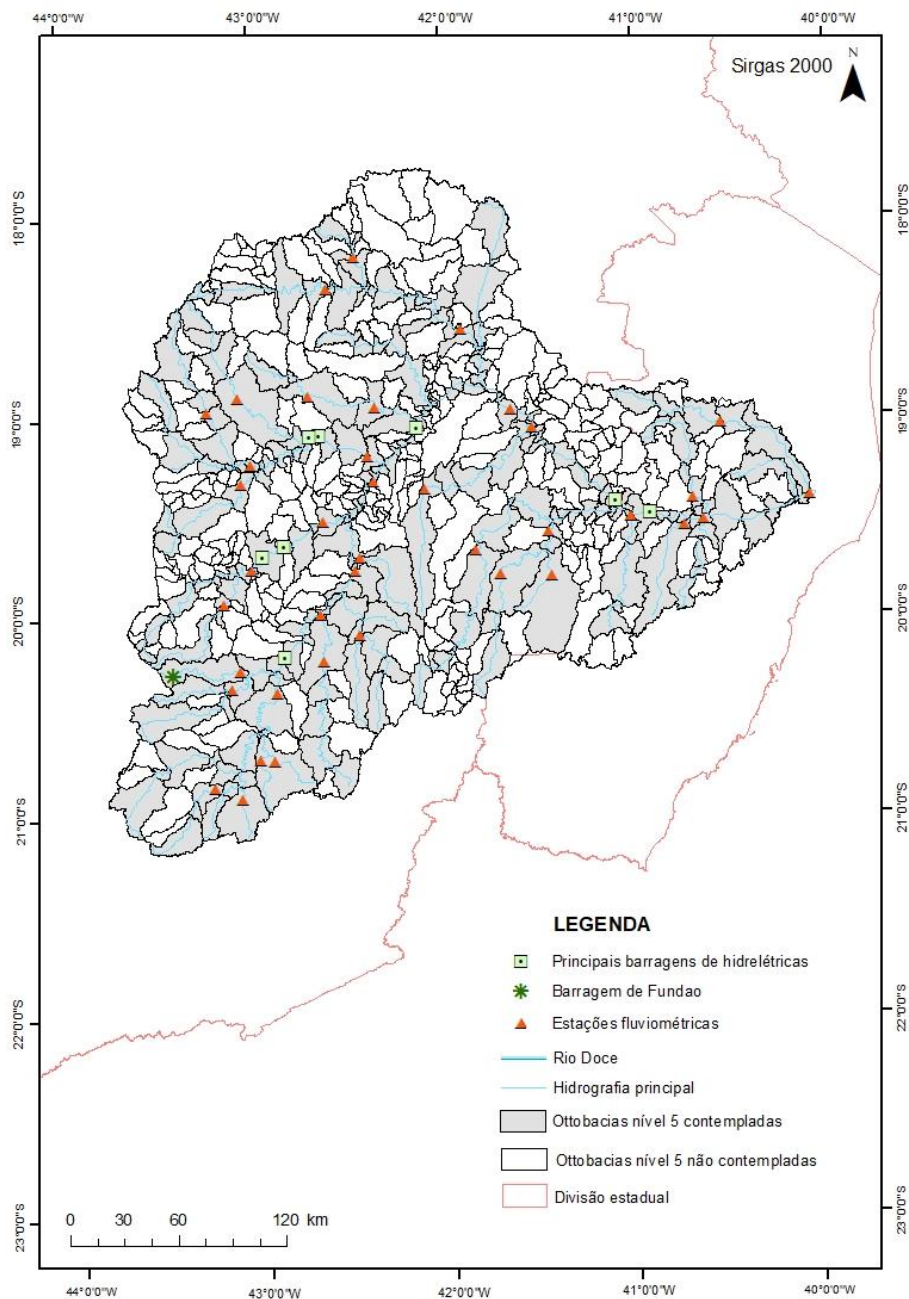


Fonte: IBGE adaptado, 2018.

O mapa pedológico original possui associações de solos incorporadas ao tipo de solo predominante. A partir do uso de imagens disponibilizadas pelo Google Earth, que possuem alta qualidade, foi possível que fossem identificar os limites de manchas com as associações dos solos com maior tendência ao escoamento superficial sem necessidade de ida a campo. As associações são: neossolo litólico + afloramento rochoso e neossolo litólico + gleissolo háplico. Nos mapas originais, essas associações estão incorporadas ao tipo de solo predominante e, com o uso das imagens, foi possível a separação das mesmas.

As estações fluviométricas foram também espacializadas em mapa de ottobacias nível 5, para que fossem visualizadas as sub-bacias contempladas e as não contempladas pelo modelo aplicado (Figura 3).

Figura 4: Espacialização das estações fluviométricas na Bacia do Rio Doce a montante de Linhares e divisão da bacia em ottobacias nível 5



O método de classificação e codificação de bacias hidrográficas pelo método do engenheiro brasileiro Otto Pfafstetter é natural e hierárquico, iniciando-se pela identificação do rio principal, e posteriormente dos maiores rios de uma determinada bacia, descendo em nível de detalhe a cada etapa, até que se tenha codificado todos os trechos da rede hidrográfica (PFAFSTETTER, 1989). Cada trecho corresponde a uma área de drenagem individual, o que favorece o gerenciamento e o controle das

ações do homem em áreas específicas, assim como as consequências que essas ações podem causar em todo o sistema hídrico. As otobacias são importantes ferramentas no planejamento e gestão dos recursos hídricos, bem como de fácil implementação computacional e boa interação com Sistemas de Informações Geográficas (ANA, 2012).

Embora a divisão hidrográfica pelo método Ottopfastetter seja amplamente utilizada no Brasil, não foi aplicada à modelagem, uma vez que é necessário que os exutórios das sub-bacias possuam dados para a calibração do modelo. Sendo assim, para a etapa de calibração do modelo, primeiramente foi inserido no SWAT o modelo digital de terreno da bacia e o shapefile com a posição das estações fluviométricas situadas em posições estratégicas e que possuem longa série de dados (1985 e 2017). As sub-bacias foram delimitadas de acordo com o modelo digital de terreno, tendo a posição das estações fluviométricas como ponto mais a jusante (considerando a área de drenagem efetivamente à jusante da estação).

A Figura 5 apresenta a espacialização das estações fluviométricas e as sub-bacias delimitadas a partir delas. A Tabela 3 contém os nomes dessas sub-bacias (conforme a numeração da Figura 5).

Figura 5: Posição das estações fluviométricas e sub-bacias a montante das mesmas

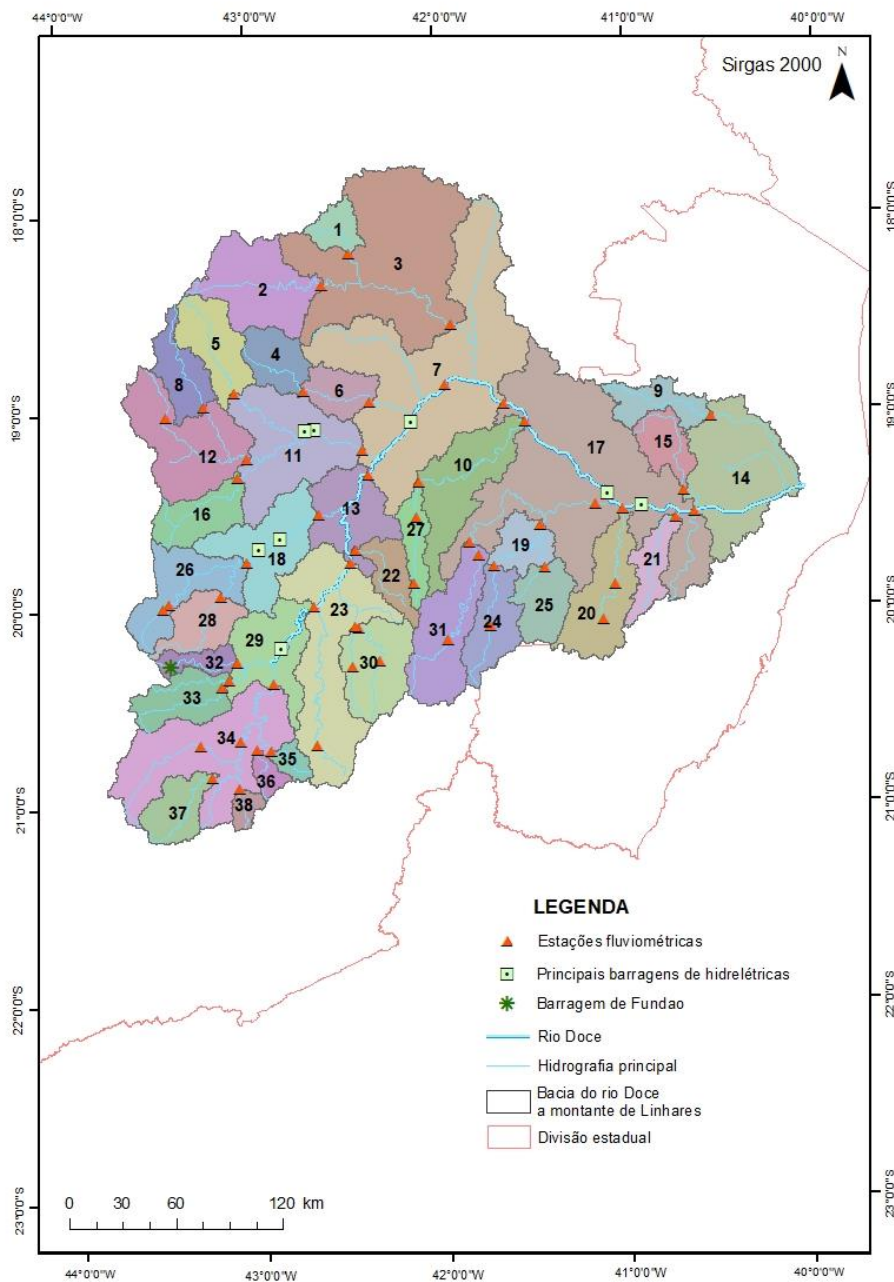


Tabela 4: Nomes das sub-bacias criadas a partir das estações fluviométricas distribuídas na Bacia do Rio Doce

Número da sub-bacia no mapa (Figura 10)	Nome da sub-bacia
1	Bacia da estação fluviométrica Santa Maria do Suaçuí
2	Bacia da estação fluviométrica São Pedro do Suaçuí
3	Bacia da estação fluviométrica Vila Matias Montante
4	Bacia da estação fluviométrica Fazenda Corrente
5	Bacia da estação fluviométrica Senhora do Porto
6	Bacia da estação fluviométrica Porto Santa Rita

Número da sub-bacia no mapa (Figura 10)	Nome da sub-bacia
7	Bacia da estação fluviométrica Tumiritinga
8	Bacia da estação fluviométrica Dom Joaquim
9	Bacia da estação fluviométrica Barra de São Gabriel
10	Bacia da estação fluviométrica Barra do Cuieté Jusante
11	Bacia da estação fluviométrica Naque Velho
12	Bacia da estação fluviométrica Ferros
13	Bacia da estação fluviométrica Belo Oriente
14	Bacia da estação fluviométrica Linhares Cais do Porto
15	Bacia da estação fluviométrica Ponte do Pancas
16	Bacia da estação fluviométrica Fazenda Barraca
17	Bacia da estação fluviométrica Colatina
18	Bacia da estação fluviométrica Mario de Carvalho
19	Bacia da estação fluviométrica Assaraí Montante
20	Bacia da estação fluviométrica Baixo Guandu
21	Bacia da estação fluviométrica Jusante Córrego da Piaba
22	Bacia da estação fluviométrica Pingo D'Água
23	Bacia da estação fluviométrica Cachoeira dos Óculos Montante
24	Bacia da estação fluviométrica Ipanema
25	Bacia da estação fluviométrica Mutum
26	Bacia da estação fluviométrica Nova Era IV
27	Bacia da estação fluviométrica Dom Cavati
28	Bacia da estação fluviométrica Rio Piracicaba
29	Bacia da estação fluviométrica Fazenda Cachoeira D'Antas
30	Bacia da estação fluviométrica Instituto Florestal Raul Soares
31	Bacia da estação fluviométrica Santo Antônio do Manhuaçu
32	Bacia da estação fluviométrica Fazenda Ocidente
33	Bacia da estação fluviométrica Acaiaca Jusante
34	Bacia da estação fluviométrica Ponte Nova Jusante
35	Bacia da estação fluviométrica Seriquite
36	Bacia da estação fluviométrica Fazenda Varginha
37	Bacia da estação fluviométrica Braz Pires
38	Bacia da estação fluviométrica Senador Firmino

Tabela 5: Características das estações fluviométricas utilizadas na etapa de calibração do modelo SWAT

Código	Estação	Resp./Operadora	Latitude	Longitude	Área Drenagem (km²)
56846000	Porto de Santa Rita	ANA/CPRM	-18.95	-42.36	1965.00
56055000	Braz Pires	ANA/CPRM	-20.85	-43.24	1089.00
56090000	Fazenda Varginha	ANA/CPRM	-20.71	-43.00	324.00
56110005	Ponte Nova Jusante	ANA/CPRM	-20.38	-42.90	6132.00
56335001	Acaiaca Jusante	ANA/CPRM	-20.36	-43.14	1371.00

Código	Estação	Resp./Operadora	Latitude	Longitude	Área Drenagem (km²)
56337000	Fazenda Ocidente	ANA/CPRM	-20.27	-43.10	531.00
56425000	Faz. Cachoeira D'Antas	ANA/CPRM	-19.99	-42.67	10079.00
56510000	Inst. Flor. Raul Soares	ANA/CPRM	-20.10	-42.46	1800.00
56539000	Cach. Óculos Montante	ANA/IGAM	-19.78	-42.48	15836.00
56570000	Pingo D'Água	ANA/CPRM	-19.71	-42.45	814.00
56610000	Rio Piracicaba	ANA/CPRM	-19.93	-43.17	1163.00
56659998	Nova Era IV	ANA/CPRM	-19.77	-43.03	3060.00
56696000	Mário de Carvalho	ANA/CPRM	-19.52	-42.64	5270.00
56719998	Belo Oriente	ANA/CPRM	-19.33	-42.38	24200.00
56765000	Dom Joaquim	ANA/CPRM	-18.96	-43.24	972.00
56775000	Ferros	ANA/CPRM	-19.23	-43.02	4058.00
56787000	Fazenda Barraca	ANA/CPRM	-19.33	-43.07	1280.00
56800000	Senhora do Porto	ANA/CPRM	-18.89	-43.08	1521.00
56825000	Naque Velho	ANA/CPRM	-19.19	-42.42	10170.00
56845000	Fazenda Corrente	ANA/CPRM	-18.89	-42.71	1064.00
56860000	São Pedro do Suaçuí	ANA/CPRM	-18.36	-42.61	2610.00
56870000	Santa Maria do Suaçuí	ANA/CPRM	-18.20	-42.45	670.00
56891900	Vila Matias montante	ANA/CPRM	-18.57	-41.92	10200.00
56920000	Tumiritinga	ANA/CPRM	-18.97	-41.64	55425.00
56935000	Dom Cavati	ANA/CPRM	-19.37	-42.11	784.00
56940002	Barra do Cuieté Jus.	ANA/CPRM	-19.07	-41.54	3250.00
56978000	Sto. Ant. do Manhauçu	ANA/CPRM	-19.68	-41.84	2287.00
56988500	Ipanema	ANA/CPRM	-19.80	-41.71	1420.00
56989001	Mutum	ANA/CPRM	-19.81	-41.44	1187.00
56989400	Assaraí montante	ANA/CPRM	-19.59	-41.46	3190.00
56998400	Barra de São Gabriel	ANA/CPRM	-19.04	-40.53	1070
56992000	Baixo Guandu	ANA/CPRM	-19.52	-41.01	2135.00
56994500	Colatina	ANA/CPRM	-19.53	-40.62	75800.00
56995500	Ponte do Pancas	ANA/CPRM	-19.42	-40.69	919.00
56993551	Jusante Córrego da Piaba	ANA/CPRM	-19.56	-40.73	873.00
56075000	Porto Firme	ANA/CPRM	-20.67	-43.09	4251.00
56085000	Seriquite	ANA/CPRM	-20.67	-43.09	4251.00
56065000	Senador Firmino	ANA/CPRM	-20.91	-43.10	291.00

Em seguida, foram inseridos no SWAT os mapas de solo e de uso e ocupação do solo da bacia do rio Doce. Para cada classe de solo e de uso e ocupação do solo, o modelo associa um conjunto de parâmetros e variáveis de entrada que são retirados de seu banco de dados ou fornecidos pelo modelador. Dados de solo da bacia foram retirados de levantamentos exploratórios de reconhecimento de solos, tanto para a porção mineira quanto para a porção espírito-santense (PANOSO, 1978; JACOMINE et al., 1979; PANOSO, 1980; MOTTA et al., 2004; IBGE, 2007). Já os dados das classes de uso do solo foram retirados do banco de dados existente no modelo.

Com base nas informações cartográficas, o modelo dividiu a bacia em 1705 Unidades de Resposta Hidrológica (URH), que são áreas com apenas um tipo de solo e um tipo de uso e/ou ocupação do solo.

Na etapa seguinte foram inseridos os dados climatológicos no modelo. O SWAT utiliza os seguintes dados: precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento. A precipitação utilizada é proveniente de dados reais medidos nas estações pluviométricas de responsabilidade da ANA e operadas pela CPRM (Tabela 6), enquanto, para as demais variáveis, foram utilizados dados de um banco de dados mundial denominado Centros Nacionais de Previsão Ambiental (*The National Centers for Environmental Prediction – NCEP*) pela Reanálise de Sistemas de Previsão Climática (*Climate Forecast System Reanalysis – CFSR*), o qual foi concluído para um período de 36 anos, que compreende de 1979 a 2014. A CFSR foi projetada e executada como uma superfície global de alta resolução para fornecer a melhor estimativa de dados climáticos durante esse período. Este site permite que seja feito download de dados climatológicos no formato de arquivo SWAT para um determinado local do globo terrestre e período de tempo. Com relação à pluviosidade, para cada sub bacia, o modelo utiliza dados da estação pluviométrica localizada mais próxima ao seu centroide. Foram adicionados ao modelo os dados das 90 estações pluviométricas apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Estações pluviométricas de longa série histórica utilizadas na modelagem hidrológica

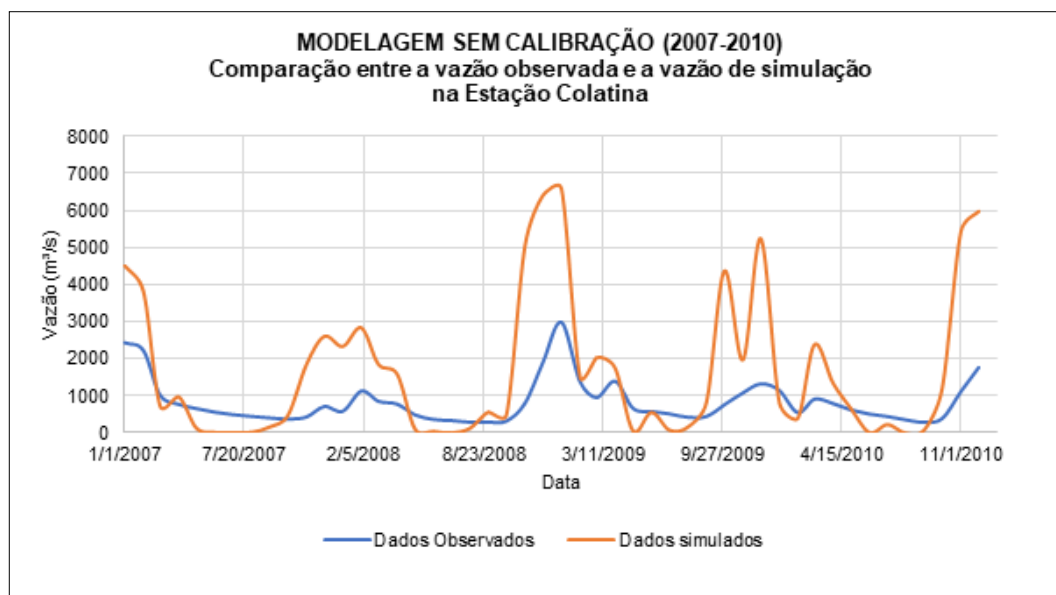
Resp./Operadora	Código	Estação	Latitude	Longitude
ANA/CPRM	2042010	Abre Campo	-20.69055556	-43.29944444
ANA/CPRM	2043009	Acaiaca Jusante	-20.67027778	-43.08805556
ANA/CPRM	2041023	Afonso Cláudio montante	-20.3625	-43.14388889
ANA/CPRM	1742019	Água Boa	-20.39	-43.18027778
ANA/CPRM	1840000	Águia Branca	-17.84555556	-42.07555556
ANA/CPRM	1941012	Alto Rio Novo	-17.99222222	-42.39388889
ANA/CPRM	1941006	Assaraí montante	-18.57472222	-41.91777778
ANA/CPRM	1941003	Baixo Guandu	-18.23861111	-41.74861111
ANA/CPRM	1940016	Barra de São Gabriel	-18.88305556	-41.95027778
ANA/CPRM	1941005	Barra do Cuieté jusante	-18.77694444	-41.48277778
ANA/CPRM	1839006	Barra Nova	-18.55277778	-42.76416667
ANA/CPRM	1942030	Belo Oriente	-19.31638889	-42.39611111
ANA/CPRM	2042014	Bicuiba	-18.59277778	-43.4125
ANA/CPRM	1942002	Bom Jesus do Galho	-18.61194444	-42.27861111
ANA/CPRM	2043026	Braz Pires	-18.97638889	-41.64027778
ANA/CPRM	1942031	Cach. dos Óculos montante	-19.76944444	-42.47694444
ANA/CPRM	1943010	Caeté	-18.36305556	-42.60222222
ANA/CPRM	1940020	Caldeirão	-18.27972222	-43.00055556
ANA/CPRM	1841003	Campanário	-18.77222222	-42.93111111
ANA/CPRM	1742014	Capelinha	-18.20111111	-42.45527778
ANA/CPRM	1940005	Cavalinho	-19.79888889	-41.70611111
ANA/CPRM	1840010	Cedrolândia	-19.06166667	-41.53277778
ANA/CPRM	1841018	Central de Minas	-19.67833333	-41.83611111
ANA/CPRM	1940006	Colatina - Corpo de Bombeiros	-19.16166667	-41.86222222

Resp./Operadora	Código	Estação	Latitude	Longitude
ANA/CPRM	2043059	Colégio Caraça	-19.01666667	-43.44416667
ANA/CPRM	1943002	Conc. do Mato Dentro	-19.44027778	-43.11861111
ANA/CPRM	1842005	Coroaci	-19.59472222	-41.45805556
ANA/CPRM	2143003	Desterro do Melo	-19.2175	-43.37416667
ANA/CPRM	1841019	Divino de Laranjeiras	-19.99888889	-42.3475
ANA/CPRM	1942008	Dom Cavati	-19.25027778	-43.01444444
ANA/CPRM	2041008	Dores do Manhumirim	-19.34305556	-41.24611111
ANA/CPRM	2043056	Fazenda Água Limpa jusante	-19.92277778	-43.17777778
ANA/CPRM	2042031	Fazenda Cachoeira D'Antas	-19.94527778	-43.40111111
ANA/CPRM	2043027	Fazenda Ocidente	-19.81111111	-41.43777778
ANA/CPRM	2043011	Fazenda Paraíso	-19.37361111	-42.105
ANA/CPRM	2142004	Fazenda Umbaúbas	-19.4925	-41.16166667
ANA/CPRM	2041048	Fazenda Vargem Alegre	-19.83361111	-42.31777778
ANA/CPRM	1943003	Ferros	-19.52472222	-42.64416667
ANA/CPRM	2040008	Garrafão (DNOS)	-19.88083333	-43.3675
ANA/CPRM	1841020	Governador Valadares	-20.10805556	-41.72833333
ANA/CPRM	1842007	Guanhães	-20.10361111	-42.44
ANA/CPRM	1941009	Ibituba	-20.29888889	-42.47805556
ANA/CPRM	1941000	Ipanema	-20.21472222	-42.65222222
ANA/CPRM	1940012	Itaimbé	-20.01138889	-42.67416667
ANA/CPRM	1941018	Itanhomi	-20.09694444	-43.48805556
ANA/CPRM	1940000	Itarana	-20.6825	-42.80666667
ANA/CPRM	1940022	Jacupemba	-20.38472222	-42.90277778
ANA/CPRM	1943024	José de Melo	-20.28555556	-43.09888889
ANA/CPRM	1741006	Ladainha	-20.8475	-43.24194444
ANA/CPRM	2043002	Lagoa Grande	-20.51666667	-43.01666667
ANA/CPRM	1941008	Laranja da Terra	-21.14916667	-43.52
ANA/CPRM	1742017	Malacacheta	-20.27722222	-42.32555556
ANA/CPRM	1841009	Mantenópolis	-20.17055556	-41.96111111
ANA/CPRM	1942029	Mario de Carvalho	-19.90111111	-41.05805556
ANA/CPRM	2042017	Matipó	-20.07861111	-41.12138889
ANA/CPRM	1943025	Morro do Pilar	-18.98555556	-40.74611111
ANA/CPRM	1941019	Mutum	-19.69111111	-41.02
ANA/CPRM	1942032	Naque Velho	-19.18861111	-42.42277778
ANA/CPRM	1940013	Novo Brasil	-19.52361111	-41.01416667
ANA/CPRM	1940009	Pancas	-19.53083333	-40.62305556
ANA/CPRM	2142002	Patrocínio do Muriaé	-19.2375	-40.59138889
ANA/CPRM	2043010	Piranga	-19.69222222	-40.39805556
ANA/CPRM	2042018	Ponte Nova jusante	-19.66361111	-40.83527778
ANA/CPRM	2043014	Porto Firme	-19.87444444	-40.87444444
ANA/CPRM	2042008	Raul Soares montante	-19.27416667	-40.32083333
ANA/CPRM	1941004	Resplendor jusante	-19.05777778	-40.51638889
ANA/CPRM	1940023	Rio Bananal	-19.22027778	-40.85333333

Resp./Operadora	Código	Estação	Latitude	Longitude
ANA/CPRM	2042011	Rio Casca	-19.05916667	-41.0275
ANA/CPRM	1943001	Rio Piracicaba	-19.80527778	-40.67888889
ANA/CPRM	1843012	Rio Vermelho	-19.955	-40.74166667
ANA/CPRM	1943007	Santa Barbara	-17.62944444	-41.73722222
ANA/CPRM	2041017	Santa Cruz Caparaó	-17.69166667	-42.52611111
ANA/CPRM	1943008	Santa Maria do Itabira	-18.76305556	-41.30833333
ANA/CPRM	2040007	Santa Maria de Jetibá	-19.90277778	-43.66638889
ANA/CPRM	1842008	Santa Maria do Suaçuí	-19.68972222	-43.58555556
ANA/CPRM	1941011	Santo Antônio do Manhuaçu	-19.21888889	-43.58805556
ANA/CPRM	1940001	São João de Petrópolis	-20.76944444	-42.30111111
ANA/CPRM	1842020	São João Evangelista	-20.17916667	-43.94277778
ANA/CPRM	2042016	São Miguel do Anta	-20.30305556	-43.61583333
ANA/CPRM	1842004	São Pedro do Suaçuí	-21.05027778	-42.51555556
ANA/CPRM	1941010	São Sebastião da Encruzilhada	-21.15	-42.20111111
ANA/CPRM	1843011	Serro	-21.19277778	-43.61388889
ANA/CPRM	1841011	Tumiritinga	-19.58861111	-40.19805556
ANA/CPRM	2043025	Usina da Brecha	-20.32277778	-41.70416667
ANA/CPRM	1943027	Usina Peti	-18.83888889	-41.11027778
ANA/CPRM	1940010	Valsugana Velha montante	-18.80972222	-40.69055556
ANA/IGAM	2143007	Vargem do Engenho	-20.14333333	-40.97527778
ANA/CPRM	1943035	Vau da Lagoa	-20.02805556	-40.74416667
ANA/CPRM	1942006	Vermelho Velho	-19.95333333	-40.5525
ANA/CPRM	1841001	Vila Matias montante	-18.95027778	-39.76444444

O modelo foi rodado no período de 2004 a 2013 utilizando os dados inseridos no mesmo nas etapas discutidas nos itens anteriores. A Figura 6 apresenta hidrograma simulado e medido na estação fluviométrica Colatina para o período 2007-2010.

Figura 6: Resultado da simulação hidrológica na etapa anterior à calibração



Conforme pode ser observado, os resultados da modelagem inicial não se mostraram satisfatórios, havendo, dessa forma, necessidade de se proceder a calibração do modelo.

A calibração de um modelo é realizada com a finalidade de fazer com que valores simulados se aproximem ao máximo aos valores medidos, utilizando coeficientes estatísticos como o Nash-Sutcliffe (NS) e o Percentual bias (Pbias) para comparação. Para a bacia do rio Doce, valores de vazão diária simulados nos exutórios das sub-bacias foram comparados com os valores de vazão medidos nas estações fluviométricas durante o processo de calibração.

Para a calibração do SWAT na bacia do rio Doce, foi utilizado o software SWAT-CUP (ABBASPOUR et al., 2005), tendo sido escolhido o algoritmo de parametrização Sufi-2. Este algoritmo vem sendo o mais utilizado em modelagem de bacias hidrográficas por todo o globo, principalmente devido a sua facilidade de aplicação. Além disso, o software conta com a lista de parâmetros utilizados dentro do modelo SWAT e seus respectivos valores mínimos e máximos aceitáveis. O Quadro 1 apresenta os parâmetros que foram calibrados com o uso do SWAT CUP. Estes foram escolhidos a partir de revisão de literatura e do estudo detalhado de cada um dos parâmetros. Para a calibração, foram utilizados dados de 2007 a 2010 (4 anos) e o de validação de 2011 a 2013 (3 anos).

Quadro 1: Parâmetros utilizados na calibração do modelo

Parâmetro	Descrição
ALPHA_BF	Fator de fluxo de base ou constante de recessão (dias)
CANMX	Quantidade de água interceptada (mm)
SURLAG	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial direto
GW_DELAY	Intervalo de tempo para recarga do aquífero (dias)
GW_REVAP	Coefficiente de ascensão de água à zona de saturação
GWQMN	Nível limite de água no aquífero livre para ocorrer o fluxo de retorno (mm)
CN2	Curva número inicial para condição de umidade do solo II
REVAPMN	Profund. de limiar de água no lençol freático para que ocorra reevaporação (mm)
SLSUBBSN	Comprimento médio da declividade (m)
RCHRG_DP	Coefficiente de percolação da água para o aquífero profundo (dias)
SOL_K	Condutividade hidráulica do solo (mm/h)
SOL_AWC	Armazenamento de água no solo (mm H ₂ O/mm solo)
SOL_Z	Profundidade da superfície do solo ao fundo da camada (mm)
EPCO	Fator de compensação de captação de plantas
ESCO	Coefficiente de compensação de evaporação de água no solo
CH_K2	Condutividade efetiva do canal (mm/h)
CH_N2	Coefficiente de Manning para o canal principal
BIOMIX	Eficiência da mistura biológica

Foram realizadas diversas simulações com mais de 1000 iterações cada, quando os parâmetros foram sendo ajustados até que a estatística Nash-Sutcliffe fosse considerada satisfatória. Os parâmetros ajustados e os modos de ajuste encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros calibrados

Parâmetro	Valor calibrado	Tipo de ajuste
ALPHA_BF	0.000273	substituição
CANMX	4.2242	adição
SURLAG	-1.848833	adição
GW_DELAY	99.985001	adição
GW_REVAP	-0.009426	adição
GWQMN	678.208008	adição
CN2	-0.30706	multiplicação
REVAPMN	23.533335	adição
SLSUBBSN	-0.27217	multiplicação
RCHRG_DP	0.02162	multiplicação
SOL_K	-4.76673	multiplicação
SOL_AWC	-0.022075	multiplicação

Parâmetro	Valor calibrado	Tipo de ajuste
SOL_Z	0.41853	multiplicação
EPCO	0.3741	adição
ESCO	0.020701	adição
CH_K2	5.591664	adição
CH_N2	0.168383	adição
BIOMIX	0.16243	multiplicação

O coeficiente escolhido para análise da calibração e validação do modelo foi o Nash-Sutcliffe (NS), que é o indicador estatístico de uso mais comum entre os usuários do SWAT. Para um ajuste perfeito entre os dados simulados e observados, o valor de NS deve ser o mais próximo possível de 1, sendo que resultados menores que zero significam que o uso da média dos dados observados é melhor que a simulação feita. Para o período de calibração o NS foi de 0,75 e para o período de validação foi de 0,43 e as comparações entre os dados observados e os dados simulados são mostrados na Figura 7 e na Figura 8: Gráfico validação do modelo (vazão simulada vs vazão observada ao longo do período).

Figura 7: Gráfico calibração do modelo (vazão simulada vs vazão observada ao longo do período)

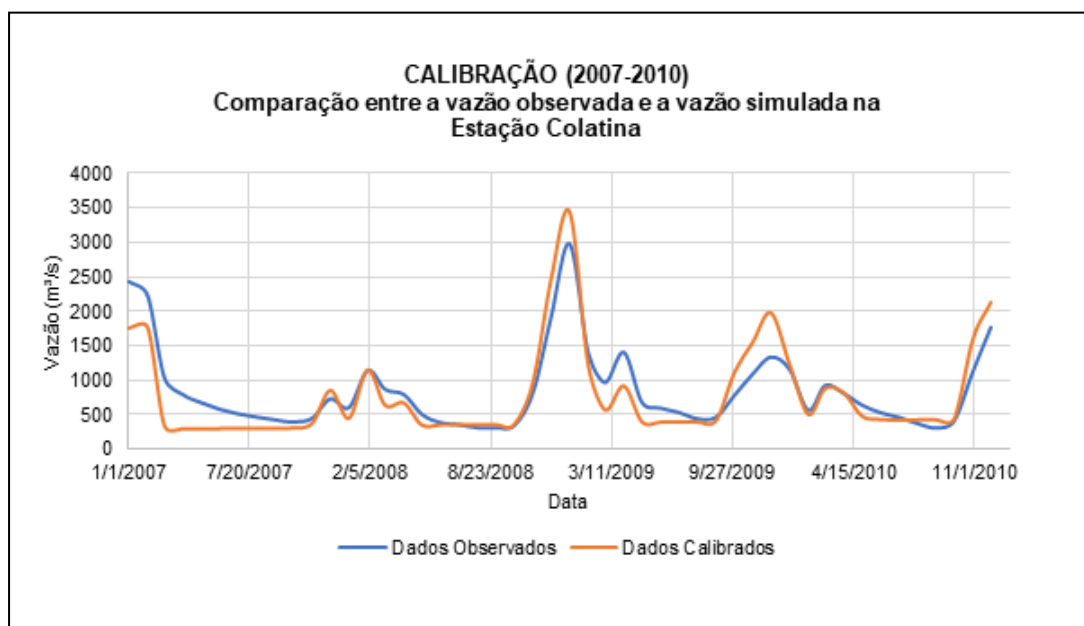
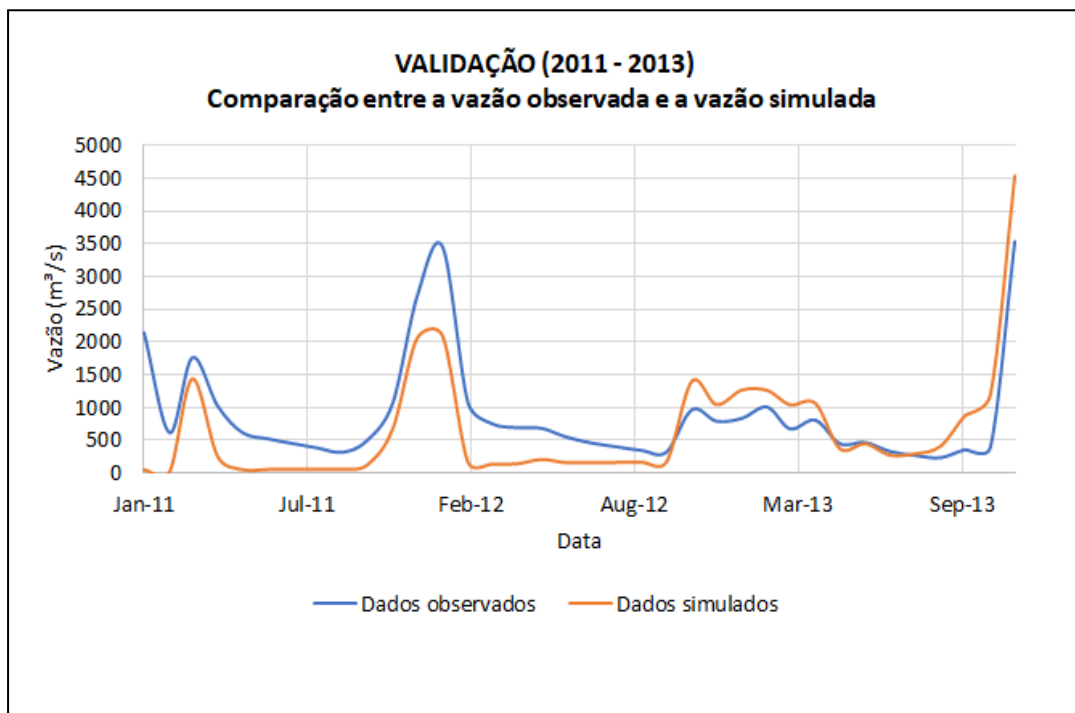


Figura 8: Gráfico validação do modelo (vazão simulada vs vazão observada ao longo do período)



Após a calibração e a validação do modelo a bacia foi dividida em regiões com base na hidrografia principal (Figura 9), a fim de se caracterizar a quantidade de água que chega ao rio Doce advinda das suas diferentes sub-bacias formadoras. Para este processo, foi necessária uma simulação com dados atuais, visando entender hidrologicamente a bacia do rio Doce durante o período de outubro de 2018 a março de 2022. Para tanto, o modelo requer dados pluviométricos para o mesmo período. Os dados utilizados foram buscados em bases que possuem estações telemétricas (CEMADEN, Sistema HIDRO – Telemetria da ANA e INMET), cujos dados são disponibilizados na internet diariamente ou em tempo real, e foram sendo compilados para alimentar o modelo SWAT durante as simulações hidrológicas mais recentes. Foi escolhida uma estação de dado atual para cada região hidrográfica, desde que possuíssem o menor número de dias com falha ao longo do período analisado. As estações são as mesmas já detalhadas na Tabela 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e estão espacializadas na Figura 10:

Espacialização das estações telemétricas ao longo da bacia do rio Doce

Figura 9: Divisão da bacia do rio Doce para análise do aporte de água por região

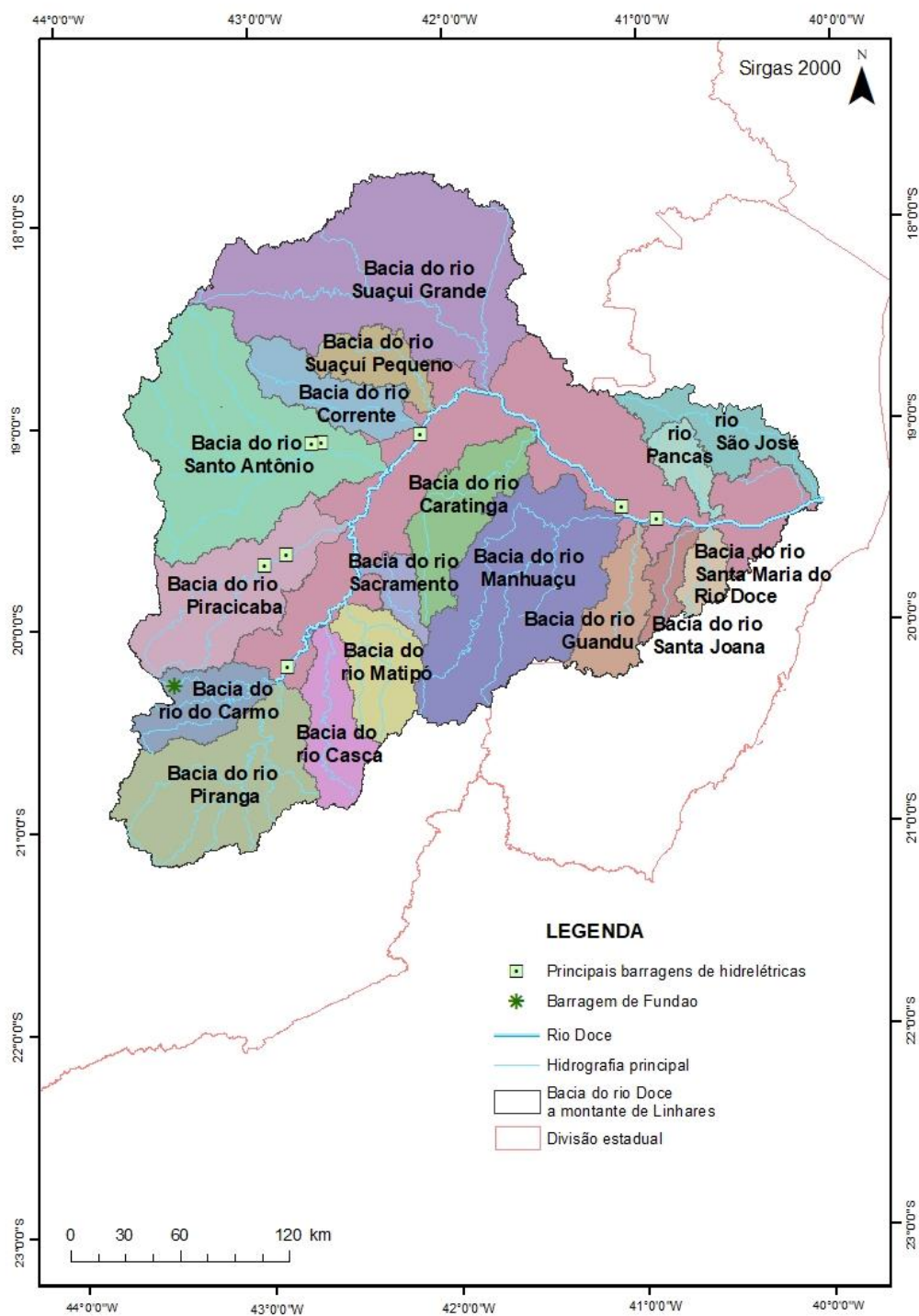
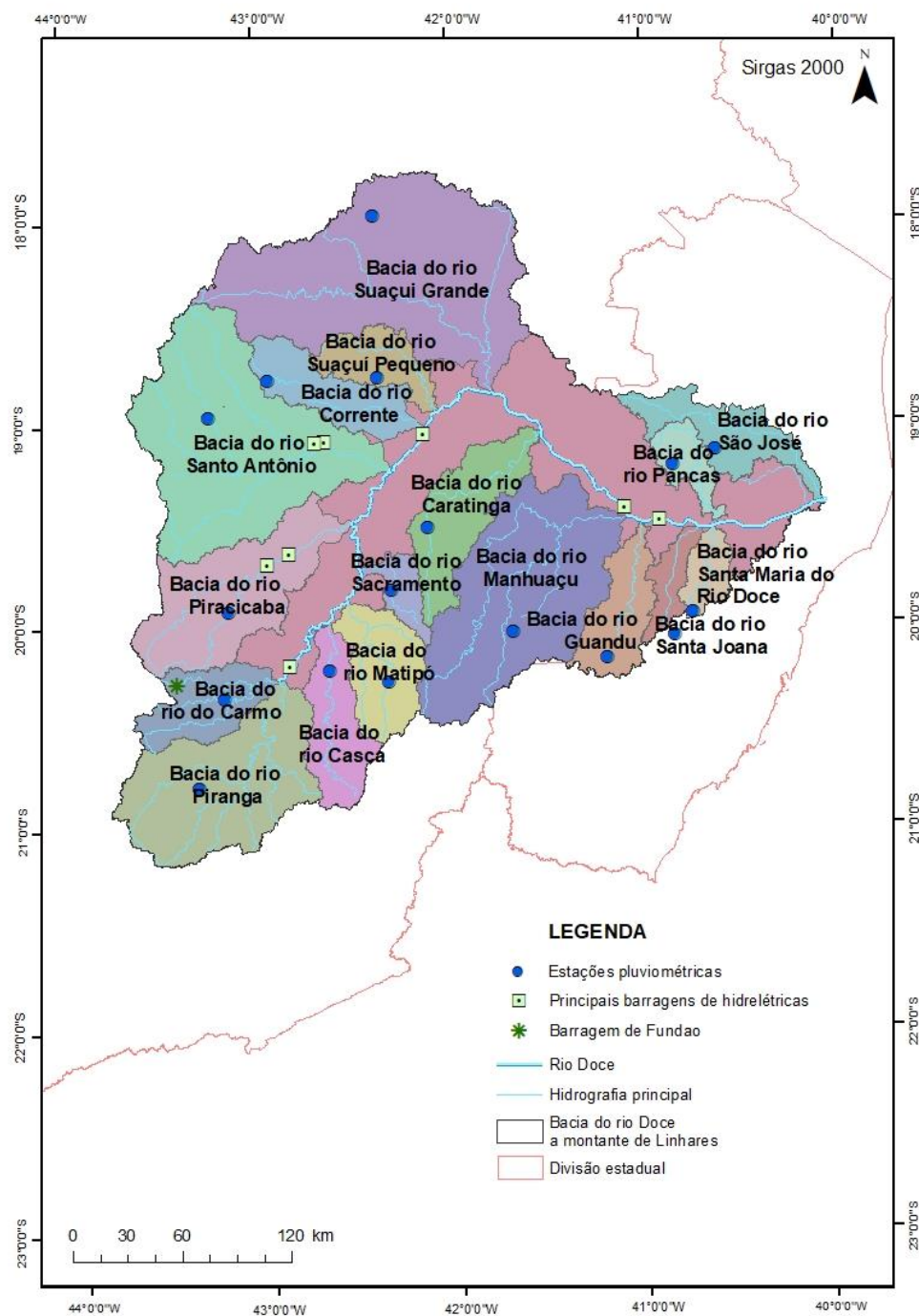


Figura 10: Espacialização das estações telemétricas ao longo da bacia do rio Doce



1.2 CARACTERIZAÇÃO DE INDUTORES, PRESSÕES AMBIENTAIS E AÇÕES DE RESPOSTA EXISTENTES NA BACIA

Identificação e acompanhamento das ações de resposta ao rompimento da barragem de fundão realizadas pela Fundação Renova

Para o desenvolvimento dos produtos deste subprojeto, foram levantadas, atualizadas e analisadas ações de diferentes naturezas, sendo elas: saneamento básico (eixo esgoto); recuperação de Áreas de Preservação Permanentes (APPs); proteção e recuperação de nascentes; reflorestamento; e manejo de rejeitos em reservatórios, por meio de coleta e análise de dados secundários obtidos em bases de dados públicas, de artigos técnico-científicos, relatórios da Fundação Renova e atas de reuniões das Câmaras Técnicas e do CIF.

Essas ações foram selecionadas para análise, por se tratarem de ações com impactos diretos nos fluxos de água e sedimentos e passíveis de quantificação. Se tratando das ações de reflorestamento, recuperação de APP e proteção de nascentes, relaciona-se a execução dessas ações com o controle de sedimentos, enquanto as ações de saneamento básico relacionadas ao eixo esgoto, influenciam diretamente na carga de DBO no Rio Doce. As ações de manejo de rejeitos no reservatório da UHE Risoleta Neves foram analisadas pela importância da ação e do funcionamento pleno da hidrelétrica para a região, além da possibilidade de quantificação dos resíduos, uma vez que grande parte da lama acumulou no reservatório.

A identificação foi realizada a partir do levantamento de [Relatórios Técnicos Anuais](#) e de acompanhamento dos programas implementados pela Fundação Renova, que descrevem o andamento das atividades, como também a quantia investida, desde 2016 até março de 2022.

A partir dos documentos mencionados anteriormente, foram identificados dados e informações referentes as ações, e estes foram organizados em tabelas de dados brutos, sendo posteriormente processados e tratados, construindo a base de todos os produtos gráficos e tabulares apresentados no banco de dados (o qual se encontra disposto no Material Suplementar).

Os programas utilizados para levantamento destes dados foram leitores de pdf, navegadores de internet e programas do pacote Office da Microsoft. Para análise, construção dos painéis, gráficos e tabelas foi utilizado o Tableau Desktop, e para a espacialização dos dados o Arcgis da Esri. As linhas do tempo de acompanhamento foram criadas no aplicativo Canvas.

Cabe ressaltar que não foram encontradas informações sobre as eficiências de remoção e as tecnologias a serem implementadas nas ETEs a serem construídas com repasses do Programa Coleta e Tratamento de Esgoto e Destinação Adequada de Resíduos Sólidos ([PG031](#)).

1.3 MONITORAMENTO DE FLUXOS DE ÁGUA E SEDIMENTOS

Com finalidade de monitorar descargas líquidas e sólidas no rio Doce, bem como fluxos e variações de níveis d'água, para caracterização do ambiente estudado, foram executados os monitoramentos descritos a seguir.

Os pontos de monitoramento estão localizados no Baixo Rio Doce, entre Linhares e a foz do rio em Regência (ver MAPMBA/FEST-RRDMS1.xlsx).

Nos pontos E21 e E22 foram realizadas medições de fluxos de água (vazão) e de sedimentos (carga de sedimentos).

No ponto E26 foram realizadas medições de fluxo de água, salinidade e temperatura.

Nos pontos E21, E26 foi feito monitoramento de níveis d'água. No ponto E22 não foram medidos níveis, uma vez que não foi autorizado o acesso da equipe de campo para instalação de seção fluviométrica.

As medições de vazão foram feitas com ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) River Ray e processadas no software Winriver II da RD Instruments.

Níveis d'água foram obtidos com sensores de pressão. Salinidades e temperaturas foram medidas in situ com sonda multiparâmetros portátil.

As amostragens da mistura água/sedimentos foram feitas pelo método de Igual Incremento de Largura em 12 verticais espaçadas ao longo das seções transversais. Os sedimentos de fundo foram coletados com draga em seis pontos em cada seção do rio.

Em laboratório foram determinadas as concentrações e granulometrias de sedimentos suspensos pelo método de tubo de retirada pela base, além de granulometrias de sedimentos de fundo pelo método de peneiramento.

As estimativas de fluxos de sedimentos foram feitas pelo Método modificado de Einstein, conforme apresentado em Carvalho (2008).

As campanhas foram realizadas em condições de vazões mais altas.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K.C. 2005. **Calibration of hydrologic models: when is a model calibrated**. In: ZERGER, A.; ARGENT, R.M. (eds.) MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation. Canberra: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 2005.

ANDRIOLO, M. V. et al. **Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos**. VI Simpósio Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Belo horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2008. p.1-17.

BRASIL, Agência Nacional de Águas. **Portal de Informações e Dados Especiais da agência nacional de águas – GeoNetwork**. Brasília: ANA, 2018. Disponível em: <<https://metadados.ana.gov.br/geonetwork>>.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. Coleção Manuais Técnicos em Geociências, v. 4. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

CARVALHO, N O. **Hidrossedimentologia prática**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

JACOMINE, P. K. T. et al. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Boletim Técnico n. 60. **Levantamento exploratório – Reconhecimento de Solos do Norte de Minas Gerais (Área de Atuação da SUDENE)**. Recife: EMBRAPA, 1979.

MOTTA, P. E. F.; BARUQUI, A. M.; SANTOS, H. G. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento – 44. **Levantamento de Reconhecimento de Média Intensidade dos Solos da Região do Alto Paraíba, Minas Gerais**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2004.

PANOSO, L. A. (coord.). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Boletim Técnico n. 76. **Levantamento Semidetalhado de Solos de Solos da Área do Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Leite, Coronel Pacheco, MG**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1980.

PANOSO, L. A. (coord.). Boletim Técnico n. 45. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Espírito Santo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1978.

PFAFSTETTER, O. **Classificação de Bacias Hidrográficas – Metodologia de Codificação**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), 1989. 19 p.