

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS – IPH

**ESTUDO HIDRODINÂMICO E CORRELAÇÃO COM SÓLIDOS
SUSPENSOS E TURBIDEZ NA LAGOA ITAPEVA DO LITORAL NORTE
DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

NICOLÁS LOPARDO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: André Luiz Lopes da Silveira

Co-orientador: David M. L. da Motta Marques

Banca Examinadora

Prof. Dr. Joel Goldenfum

IPH/UFRGS

Prof. Dr. Luciana Cardoso

PUC-RS

Prof. Dr. Walter Collischonn

IPH/UFRGS

Porto Alegre, dezembro de 2002

“É muito melhor arriscar coisas grandiosas para alcançar triunfo e glória, mesmo expondo-se à derrota, do que formar fila com os pobres de espírito, que nem gozam muito e nem sofrem muito, porque vivem nesta penumbra cinzenta em que nem conhecem vitória nem derrota.”

Roosevelt

APRESENTAÇÃO

Esta dissertação foi elaborada com o auxílio financeiro da CAPES e com verbas da FAPERGS para a criação da infra-estrutura do projeto “*Comportamento hidrodinâmico da Lagoa Itapeva (Litoral Norte do RS) e seu efeito potencial sobre comunidades planctônicas*” (processo nº 97/0291.5), sob coordenação do prof. Dr. David M. L. da Motta Marques.

O projeto foi desenvolvido no litoral costeiro da região norte do Rio Grande do Sul, em específico na lagoa Itapeva, a fim de estudar o comportamento hidrodinâmico e em seguida vinculá-lo à presença de sólidos suspensos e turbidez. A partir da fundamentação do problema de pesquisa, através da literatura existente, foram idealizadas diferentes equações de regressão múltipla para demonstrar que existe proporcionalidade entre as variações hidrodinâmicas e as ambientais.

A comprovação da hipótese e dos objetivos está relacionada ao comportamento dos fatores climáticos. Por isso, foram levantados dados em três pontos da lagoa e em diferentes estações climáticas que permitiram verificar variações distintas na parte norte, centro e sul. Além desse levantamento, foram coletados dados históricos da região que permitiram o estudo hidrológico e, conseqüentemente, o balanço hídrico. Comparando-se a variação dos níveis retirados do balanço hídrico com a variação dos níveis do levantamento de campo foi comprovada a hipótese do estudo hidrológico.

Portanto, foi possível utilizar o modelo hidrodinâmico bidimensional horizontal para águas rasas na lagoa Itapeva e atender aos dois objetivos do trabalho: o primeiro foi a correntologia para os períodos de campanha, e o segundo a obtenção de dados para serem aplicados no estudo de variabilidade ambiental. A correntologia, que visualiza espacialmente a circulação da água, caracterizou a compartimentação da lagoa em duas regiões.

Esta dissertação vem contribuir para enriquecer os estudos de gestão hídrica nos aspectos da qualidade e da quantidade da água, envolvendo conhecimentos interdisciplinares das áreas das ciências exatas, biológicas e humanas. Quero agradecer aos órgãos financiadores que contribuíram a concretização deste trabalho, bem como ao meu orientador, professor Doutor André Luiz Lopes da Silveira, por sua paciência, orientação e conselhos e ao meu co-orientador, professor Doutor David M. L. da Motta Marques.

Gostaria também de agradecer aos mestrandos, Adriano, Jaime, Jean, Sergio, Marllus e Paulo, doutorandos, em especial ao Vladimir Caramori, e estagiários e ao professor Master Science Alexandro Borche, que desenvolveu o programa de modelagem utilizado neste trabalho. À Nadir, secretária do programa de pós-graduação do IPH, pela prestação de serviços e por toda a ajuda que faz no IPH, meus agradecimentos, bem como a todos os companheiros do IPH que, de alguma forma, contribuíram para a elaboração desta dissertação.

RESUMO

A lagoa Itapeva no litoral norte do Rio Grande do Sul apresenta significativas reações hidrodinâmicas ao regime dos ventos e às cheias rápidas geradas pelos seus tributários da Serra do Mar, principalmente o rio Três Forquilhas. Os primeiros registros do monitoramento hidrometeorológico realizados na lagoa indicaram a reação rápida às rajadas de vento, provocando o que se denomina seiche: oscilações dos níveis d'água entre os extremos norte e sul da lagoa. Simulações com um modelo matemático hidrodinâmico bidimensional horizontal conseguiram reproduzir este fenômeno e elaborar o cálculo da síntese das velocidades e suas direções. Com isso, foi possível confirmar a complexidade da circulação interna da lagoa e apontar diferenças de comportamento principalmente entre as regiões sul, centro e norte. Foram analisadas as variáveis ambientais de sólidos suspensos e turbidez, selecionadas por exercerem influência nos fatores físicos, químicos e biológicos. Os resultados hidrodinâmicos de níveis e velocidades da água, gerados pelo modelo para os pontos de coleta, foram utilizados como base para o estudo de variações ambientais. Quando não foi possível estabelecer uma associação entre sólidos suspensos e turbidez, fez-se uso de outra variável hidrodinâmica, ligada às ondas, que não é simulada pelo modelo. A altura de onda calculada em função do vento foi essa terceira variável explicativa. As variáveis hidrodinâmicas explicaram de 70% a 95% das variações ambientais para cada campanha ao se utilizar valores médios de quatro horas. Ao se considerar toda a lagoa e todos os períodos de campanha chegou-se a 68% para turbidez e 49% para sólidos suspensos. O estudo hidrodinâmico e ambiental foi capaz de avaliar que a variação do nível de água em função dos aportes de água é lenta quando comparada à modificação dos níveis e às seiches criadas pelo efeito do vento sobre a lagoa e que estas variações de níveis e de velocidades têm importância significativa na variabilidade das variáveis ambientais: sólidos suspensos e turbidez.

Palavras-Chave – hidrodinâmica, ventos, ondas, lagoas costeiras, lagoas rasas, água doce, sólidos suspensos, turbidez, modelo bidimensional, lagoa Itapeva, Rio Grande do Sul.

ABSTRACT

The Itapeva Lagoon on the north shoreline of "Rio Grande do Sul" presents significant hydrodynamics reactions with the wind system and the fast flood generated by the rivers from "Serra do Mar", mainly the "Três Forquilhas" river. The first registrations of hidrometeorologic monitoring made on the lagoon indicated fast reactions for wind blow, generating the so called seiches, oscillations of the water column between the north and the south of the lagoon. Simulations using a mathematical bidimensional horizontal hydrodynamic model succeeded in reproducing this phenomenon and helped to calculate the synthesis of velocity of the water and direction. With this, it was possible to confirm the complexity of the circulation in the lagoon and to point different behaviors between south, center and north. The environmental sources selected for the analysis were suspended solids and turbidity, due to their influence in many physical, chemical and biological factors. The hydrodynamics results, such as water column and water velocity generated by the model for the collect points, were used as the base of the study of the environmental variations. When it was not possible to establish an association between the hydrodynamics variables with the suspended solids and turbidity, another hydrodynamic variable not simulated by the model was used. The waves generated by wind action were the third source used to explain the variations of suspended solids and turbidity in the lagoon. The hydrodynamic variable had explained 70% to 95% of the environmental variations for each campaign using average values of four hours. At if considering the entire lagoon and all the periods of campaign it was explained 68% for turbidity and 49% for suspended solids. The hydrodynamic and environmental study was capable to evaluate that the variation of the water level in function of the runoff is slow when compared with the modification of the level and seiches created by the effect of the wind on the lagoon and that these variations of levels and speeds have significant importance in the variability of the environmental variable: suspended solids and turbidity.

Key Word – hydrodynamic, wind, waves, estuary lagoons, shallow lagoons, fresh water, suspended solids, turbidity, bidimensional model, Itapeva lagoon, Rio Grande do Sul.

SUMÁRIO

CITAÇÃO.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DE LAGOS E RESERVATÓRIOS	6
3.1.1 Modelos de circulação bidimensional horizontal.....	7
3.1.2 Modelos Multicamadas de circulação bidimensional horizontal.....	8
3.1.3 Modelo bidimensional vertical para regiões estratificadas	8
3.1.4 Modelos Tridimensionais	8
3.1.5 Métodos Numéricos	9
3.1.6 Modelando Processos Ecológicos e Hidrodinâmicos.....	10
3.2 VARIÁVEIS DA HIDRODINÂMICA DE LAGOAS RASAS E VARIÁVEIS AMBIENTAIS	11
3.2.1 Ecossistemas Aquáticos.....	12
3.2.2 Causas e efeitos das variáveis hidrodinâmicas	13
3.2.3 Seiche.....	20
3.2.4 Turbidez e Sólidos suspensos.....	21
3.2.5 Justificativa.....	28
4 MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 ÁREA DE ESTUDO E DADOS DISPONÍVEIS	30
4.1.1 Localização.....	31
4.1.2 Climatologia.....	33
4.1.3 Geologia e Geomorfologia	35
4.1.4 Hidrogeologia.....	36
4.1.5 Dados coletados	37
4.2 SIMULAÇÃO CHUVA-VAZÃO E BALANÇO HÍDRICO	39
4.2.1 Modelo Chuva-Vazão: IPH II.....	40
4.2.2 Modelo de balanço hídrico - MOBALI.....	41
4.2.3 Método de Penman – Evapotranspiração	43
4.2.4 Balanço hídrico invertido (método alternativo).....	44
4.2.5 Contribuição de água subterrânea.....	46
4.3 MODELO HIDRODINÂMICO	46
4.3.1 Caracterização do corpo hídrico (Weiyan, 1992).....	46
4.3.2 Equações que regem o escoamento	48

4.3.3	<i>Definição do Tipo de Modelo Hidrodinâmico</i>	49
4.3.4	<i>Modelo Hidrodinâmico Bidimensional Horizontal</i>	51
4.3.5	<i>Programa IPH-A:</i>	54
4.3.6	<i>Altura de Onda</i>	58
4.3.7	<i>Exploração dos dados hidrodinâmicos</i>	59
4.3.8	<i>Metodologias para análise com bóias virtuais e oscilações de seiches</i>	60
4.4	ESTUDO ESTATÍSTICO ENTRE VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS E AMBIENTAIS	60
4.4.1	<i>Regressões Múltiplas</i>	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
5.1	VENTOS E ONDAS	62
5.2	BALANÇO HÍDRICO	68
5.3	SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS	77
5.3.1	<i>Níveis simulados</i>	77
5.3.2	<i>Seiches</i>	82
5.3.3	<i>Correntologia</i>	89
5.3.3.1	Verão – 04/01/1999 a 21/03/1999.....	90
5.3.3.2	Outono – 22/03/1999 a 21/06/1999	92
5.3.3.3	Inverno – 21/06/1999 a 22/09/1999	95
5.3.3.4	Primavera – 22/09/1999 a 17/12/1999	98
5.3.4	<i>Velocidades das correntes</i>	108
5.3.4.1	Verão – 04/01/1999 a 21/03/1999.....	111
5.3.4.2	Outono – 21/03/1999 a 21/06/1999	116
5.3.4.3	Inverno – 21/06/1999 a 22/09/1999	120
5.3.4.4	Primavera – 22/09/1999 a 17/12/1999	125
5.3.5	<i>Conclusões Parciais</i>	129
5.4	VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	131
5.4.1	<i>Correlações</i>	131
5.4.2	<i>Gráficos de Superfície</i>	135
5.4.3	<i>Regressões Múltiplas</i>	148
5.4.4	<i>Conclusões Parciais</i>	158
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	160
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162
	LISTA DE FIGURAS	viii
	LISTA DE TABELAS	xiv
	LISTA DE SIMBOLOS	xvi

Lista de Figuras

FIGURA 4.1 MAPA DE LOCALIZAÇÃO (FONTE: GUIA QUATRO RODAS 2001)	31
FIGURA 4.2 SUBSISTEMA NORTE DO SISTEMA COSTEIRO DO LITORAL DO RIO GRANDE DO SUL	32
FIGURA 4.3 LOCALIZAÇÃO DA LAGOA ITAPEVA EM RELAÇÃO AOS MUNICÍPIOS DE TORRES, SÃO PEDRO DE ALCÂNTARA, ARROIO DO SAL E TRÊS CACHOEIRAS.	32
FIGURA 4.4 MAPA DA BACIA DE DRENAGEM E PONTOS DE AMOSTRAGEM.....	33
FIGURA 4.5 PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA ANUAL NO ESTADO DO RS (MORENO, 1961)	34
FIGURA 4.6 LOCALIZAÇÃO DAS TORRES DE COLETA NA LAGOA ITAPEVA	37
FIGURA 4.7 TORRES DE COLETA.....	38
FIGURA 4.8 PLANO DE REFERÊNCIA, PROFUNDIDADES FIXA E VARIÁVEL	51
FIGURA 4.9 CONTORNO E PROFUNDIDADES DA LAGOA DE ITAPEVA	55
FIGURA 4.10 BATIMETRIA PARA UMA MALHA DE 500 METROS	56
FIGURA 4.11 ESQUEMA PARA CÁLCULO DO FETCH.....	59
FIGURA 4.12 LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ESTUDO	60
FIGURA 5.1 ROSA DOS VENTOS NA LAGOA ITAPEVA PARA O ANO DE 1999.....	62
FIGURA 5.2 VENTOS X TEMPO PARA A LAGOA ITAPEVA PARA O ANO DE 1999. EM VERMELHO – FALHAS NA COLETA DOS DADOS.....	64
FIGURA 5.3 VENTO X TEMPO PARA A LAGOA ITAPEVA PARA OS 4 PERÍODOS, SENDO A) 04/01/1999 - 21/03/1999 (VERÃO), B) 22/03/1999 – 21/06/1999 (OUTONO), C) 22/06/1999 – 22/09/1999 (INVERNO) E D) 23/09/1999 – 31/12/1999 (PRIMAVERA). EM VERMELHO – FALHAS NA COLETA DOS DADOS	65
FIGURA 5.4 ROSA DOS VENTOS PARA A LAGOA ITAPEVA PARA OS 4 PERÍODOS, SENDO A) 04/01/1999 - 21/03/1999 (VERÃO), B) 22/03/1999 – 21/06/1999 (OUTONO), C) 22/06/1999 – 22/09/1999 (INVERNO) E D) 23/09/1999 – 31/12/1999 (PRIMAVERA)	66
FIGURA 5.5 DIFERENÇAS NO CÁLCULO DE FETCH ENTRE ESTE ESTUDO E CARDOSO (2001)	67
FIGURA 5.6 VAZÕES GERADAS PARA O RIO TRÊS FORQUILHAS PARA O ANO DE 1999.....	70
FIGURA 5.7 HIDROGRAMA GERADO PELO PROGRAMA MOBALI	72
FIGURA 5.8 ESTIMATIVA DA VAZÃO DE SAÍDA	72
FIGURA 5.9 VAZÕES DE ENTRADA E SAÍDA PARA O ANO DE 1999 PELO MÉTODO DE PULS INVERTIDO	74
FIGURA 5.10 NÍVEIS REAIS E SIMULADOS PARA O ANO DE 1999 ATRAVÉS DO MÉTODO DE PULS INVERTIDO.....	74
FIGURA 5.11 PONTOS DE COLETA PARA QUANTIFICAÇÃO DA RECARGA	76
FIGURA 5.12 NÍVEIS MÉDIOS SIMULADOS E MÉDIA MÓVEL REAL PARA A LAGOA ITAPEVA DURANTE O ANO DE 1999.....	78
FIGURA 5.13 NÍVEIS MÉDIOS SIMULADOS E REAIS PARA A LAGOA ITAPEVA DURANTE 1999	79
FIGURA 5.14 GRÁFICO DA REGIÃO NORTE DA LAGOA ITAPEVA DURANTE O ANO DE 1999.....	80
FIGURA 5.15 GRÁFICO DA REGIÃO CENTRAL DA LAGOA ITAPEVA DURANTE O ANO DE 1999.....	80
FIGURA 5.16 GRÁFICO DA REGIÃO SUL DA LAGOA ITAPEVA DURANTE O ANO DE 1999	81
FIGURA 5.17 POSIÇÃO DAS CAMPANHAS DE AMOSTRAGEM DURANTE A VARIAÇÃO DO NÍVEL DA LAGOA ITAPEVA NO ANO DE 1999. A) 1 ^A CAMPANHA – 02/03 A 07/03, B) 2 ^A CAMPANHA – 21/05 A 26/05, C) 3 ^A CAMPANHA – 14/08 A 19/08.....	82
FIGURA 5.18 CORTES NA LAGOA ITAPEVA PARA ESTUDO DAS SEICHES.....	82

FIGURA 5.19 DIFERENÇA DE NÍVEL NA LAGOA ITAPEVA DA SEICHE TRANSVERSAL (VERTICAL) CALCULADA PARA O PONTO SUL DURANTE O ANO DE 1999. AS ELIPSES REPRESENTAM FALHAS NOS DADOS DE NÍVEL.....	83
FIGURA 5.20 DIFERENÇA DE NÍVEL NA LAGOA ITAPEVA DA SEICHE TRANSVERSAL (VERTICAL) CALCULADA PARA O PONTO CENTRAL DURANTE O ANO DE 1999. AS ELIPSES REPRESENTAM FALHAS NOS DADOS DE NÍVEL.....	83
FIGURA 5.21 DIFERENÇA DE NÍVEL NA LAGOA ITAPEVA DA SEICHE TRANSVERSAL (VERTICAL) CALCULADA PARA O PONTO NORTE DURANTE O ANO DE 1999. AS ELIPSES REPRESENTAM FALHAS NOS DADOS DE NÍVEL.....	84
FIGURA 5.22 DIFERENÇA DE NÍVEL NA LAGOA ITAPEVA DA SEICHE LONGITUDINAL (HORIZONTAL) CALCULADA DURANTE O ANO DE 1999. AS ELIPSES REPRESENTAM FALHAS NOS DADOS DE NÍVEL.....	84
FIGURA 5.23 DIFERENÇA DE NÍVEL NA LAGOA ITAPEVA DA SEICHE REAL DURANTE O ANO DE 1999 ..	85
FIGURA 5.24 COMPARAÇÃO DA DIFERENÇA DE NÍVEL NA LAGOA ITAPEVA CAUSADA PELA SEICHE DURANTE O ANO DE 1999	86
FIGURA 5.25 FREQUÊNCIA DOS DESNÍVEIS REAIS E SIMULADOS E SUA FREQUÊNCIA ACUMULADA PARA A SEICHE LONGITUDINAL DURANTE O ANO DE 1999 NA LAGOA ITAPEVA.....	87
FIGURA 5.26 COMPARAÇÃO DA RESPOSTA DO MODELO HIDRODINÂMICO COM OS DADOS REAIS AO EFEITO DO VENTO PARA A LAGOA ITAPEVA	88
FIGURA 5.27 LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ESTUDO E DIVISÃO EM REGIÕES DA LAGOA ITAPEVA.....	89
FIGURA 5.28 CORRETOLOGIA DA REGIÃO SUL DA LAGOA ITAPEVA PARA O VERÃO DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) S - 04/01 A 12/01, B) S1 - 04/01 A 09/01, C) S2 - 04/01 A 12/01, D) S3 - 04/01 A 14/01, E) S4 - 04/01 A 22/01 ...	90
FIGURA 5.29 CORRETOLOGIA DA REGIÃO CENTRO DA LAGOA ITAPEVA PARA O VERÃO DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) C - 04/01 A 25/01, B) C1 - 04/01 A 27/01, C) C2 - 04/01 A 14/01, D) C3 - 04/01 A 22/01, E) C4 - 04/01 A 17/01	91
FIGURA 5.30 CORRETOLOGIA DA REGIÃO NORTE DA LAGOA ITAPEVA PARA O VERÃO DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) N - 04/01 A 17/01, B) N1 - 04/01 A 27/01, C) N2 - 04/01 A 09/02, D) N3 - 04/01 A 25/01, E) N4 - 04/01 A 22/01	92
FIGURA 5.31 CORRETOLOGIA DA REGIÃO SUL DA LAGOA ITAPEVA PARA O OUTONO DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) S - 20/03 A 28/03, B) S1 - 20/03 A 15/04, C) S2 - 20/03 A 07/04, D) S3 - 20/03 A 02/04, E) S4 - 20/03 A 17/04	93
FIGURA 5.32 CORRETOLOGIA DA REGIÃO CENTRO DA LAGOA ITAPEVA PARA O OUTONO DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) C - 20/03 A 17/04, B) C1 - 20/03 A 03/06, D) C2 - 20/03 A 12/04, D) C3 - 20/03 A 26/05, E) C4 - 20/03 A 26/05	94
FIGURA 5.33 CORRETOLOGIA DA REGIÃO NORTE DA LAGOA ITAPEVA PARA O OUTONO DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) N - 20/03 A 21/06, B) N1 - 20/03 A 11/06, C) N2 - 20/03 A 18/06, D) N3 - 20/03 A 02/04, E) N4 - 20/03 A 02/04	95

FIGURA 5.34 CORRENTOLOGIA DA REGIÃO SUL DA LAGOA ITAPEVA PARA O INVERNO DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) S - 21/06 A 29/06, B) S1 - 21/06 A 01/08, C) S2 - 21/06 A 04/07, D) S3 - 21/06 A 22/09, E) S4 - 21/06 A 22/09	96
FIGURA 5.35 CORRENTOLOGIA DA REGIÃO CENTRO DA LAGOA ITAPEVA PARA O INVERNO DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) C - 21/06 A 22/07, B) C1 - 21/06 A 09/08, C) C2 - 21/06 A 22/09, D) C3 - 21/06 A 22/09, E) C4 - 21/06 A 22/09	97
FIGURA 5.36 CORRENTOLOGIA DA REGIÃO NORTE DA LAGOA ITAPEVA PARA O INVERNO DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) N - 21/06 A 31/07, B) N1 - 21/06 A 10/08, C) N2 - 21/06 A 10/09, D) N3 - 21/06 A 25/07, E) N4 - 21/06 A 31/07	98
FIGURA 5.37 CORRENTOLOGIA DA REGIÃO SUL DA LAGOA ITAPEVA PARA A PRIMAVERA DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) S - 21/09 A 17/10, B) S1 - 21/09 A 29/09, C) S2 - 21/09 A 17/10, D) S3 - 21/09 A 01/11, E) S4 - 21/09 A 01/10	99
FIGURA 5.38 CORRENTOLOGIA DA REGIÃO CENTRO DA LAGOA ITAPEVA PARA A PRIMAVERA DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) C - 21/09 A 01/10, B) C1 - 21/09 A 14/11, C) C2 - 21/09 A 30/10, D) C3 - 21/09 A 17/10, E) C4 - 21/09 A 01/11	100
FIGURA 5.39 CORRENTOLOGIA DA REGIÃO NORTE DA LAGOA ITAPEVA PARA A PRIMAVERA DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) N - 21/09 A 25/10, B) N1 - 21/09 A 01/10, C) N2 - 21/09 A 25/10, D) N3 - 21/09 A 27/10, E) N4 - 21/09 A 29/09	101
FIGURA 5.40 MAPA COM A MÉDIA DOS VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA PARA A LAGOA ITAPEVA DURANTE O ANO DE 1999	102
FIGURA 5.41 MAPA COM A MÉDIA DOS VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA PARA A LAGOA ITAPEVA PARA O VERÃO (04/01/1999 – 21/03/1999).....	103
FIGURA 5.42 MAPA COM A MÉDIA DOS VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA PARA A LAGOA ITAPEVA PARA A 1 ^A CAMPANHA (02/03/1999 – 07/03/1999).....	103
FIGURA 5.43 MAPA COM A MÉDIA DOS VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA PARA A LAGOA ITAPEVA PARA O OUTONO (22/03/1999 – 21/06/1999)	104
FIGURA 5.44 MAPA COM A MÉDIA DOS VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA PARA A LAGOA ITAPEVA PARA A 2 ^A CAMPANHA (21/05/1999 – 26/05/1999).....	104
FIGURA 5.45 MAPA COM A MÉDIA DOS VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA PARA A LAGOA ITAPEVA PARA O INVERNO (21/06/1999 – 22/09/1999)	105
FIGURA 5.46 MAPA COM A MÉDIA DOS VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA PARA A LAGOA ITAPEVA PARA A 3 ^A CAMPANHA (14/08/1999 – 19/08/1999).....	105
FIGURA 5.47 MAPA COM A MÉDIA DOS VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA PARA A LAGOA ITAPEVA PARA A PRIMAVERA (22/09/1999 – 17/12/1999).....	106
FIGURA 5.48 MAPA COM A MÉDIA DOS VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA PARA A LAGOA ITAPEVA DURANTE GRANDE VAZÃO AFLUENTE (01/04/1999 – 09/04/1999).....	106

FIGURA 5.49 MAPA COM A MÉDIA DOS VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA PARA A LAGOA ITAPEVA DURANTE PEQUENA VAZÃO AFLUENTE E FORTE VENTO SO (13/02/1999, 01/11/1999 E 01/12/1999)	107
FIGURA 5.50 MAPA COM A MÉDIA DOS VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA PARA A LAGOA ITAPEVA DURANTE PEQUENA VAZÃO AFLUENTE E FORTE VENTO NE (20/05/1999 – 21/05/1999)	107
FIGURA 5.51 LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ESTUDO PARA A VELOCIDADE DA ÁGUA E DIVISÃO EM REGIÕES DA LAGOA ITAPEVA.....	108
FIGURA 5.52 VELOCIDADE DA ÁGUA PARA OS PONTOS DE COLETA. A) VERÃO – 04/01/1999 A 21/03/1999, B) OUTONO – 21/03/1999 A 21/06/1999, C) INVERNO – 21/06/1999 A 22/09/1999, D) PRIMAVERA – 22/09/1999 A 17/12/1999, i) 1 ^A CAMPANHA – 02/03 A 07/03, ii) 2 ^A CAMPANHA – 21/05 A 26/05, iii) 3 ^A CAMPANHA – 14/08 A 19/08	109
FIGURA 5.53 FREQUÊNCIA DAS VELOCIDADES DA ÁGUA PARA OS TRÊS PONTOS DE COLETA (SUL, CENTRO E NORTE) E SUA FREQUÊNCIA ACUMULADA DURANTE O ANO DE 1999 NA LAGOA ITAPEVA	110
FIGURA 5.54 ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DA REGIÃO SUL DA LAGOA ITAPEVA PARA O VERÃO DE 1999. i) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, ii) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), iii) ROSA DOS VENTOS, A) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S, B) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S1, C) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S2, D) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S3, E) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S4	112
FIGURA 5.55 ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DA REGIÃO CENTRO DA LAGOA ITAPEVA PARA O VERÃO DE 1999. i) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, ii) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), iii) ROSA DOS VENTOS, A) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C, B) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C1, C) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C2, D) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C3, E) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C4	113
FIGURA 5.56 ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DA REGIÃO NORTE DA LAGOA ITAPEVA PARA O VERÃO DE 1999. i) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, ii) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), iii) ROSA DOS VENTOS, A) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N, B) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N1, C) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N2, D) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N3, E) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N4.....	115
FIGURA 5.57 ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DA REGIÃO SUL DA LAGOA ITAPEVA PARA O OUTONO DE 1999. i) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, ii) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), iii) ROSA DOS VENTOS, A) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S, B) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S1, C) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S2, D) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S3, E) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S4	116
FIGURA 5.58 ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DA REGIÃO CENTRO DA LAGOA ITAPEVA PARA O OUTONO DE 1999. i) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, ii) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), iii) ROSA DOS VENTOS, A) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C, B) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C1, C) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C2, D) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C3, E) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C4	118
FIGURA 5.59 ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DA REGIÃO NORTE DA LAGOA ITAPEVA PARA O OUTONO DE 1999. i) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, ii) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), iii) ROSA DOS VENTOS, A) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N, B) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N1, C) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N2, D) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N3, E) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N4.....	119

FIGURA 5.60 ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DA REGIÃO SUL DA LAGOA ITAPEVA PARA O INVERNO DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S, B) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S1, C) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S2, D) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S3, E) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S4	121
FIGURA 5.61 ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DA REGIÃO CENTRO DA LAGOA ITAPEVA PARA O INVERNO DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C, B) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C1, C) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C2, D) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C3, E) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C4	122
FIGURA 5.62 ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DA REGIÃO NORTE DA LAGOA ITAPEVA PARA O INVERNO DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N, B) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N1, C) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N2, D) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N3, E) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N4.....	124
FIGURA 5.63 ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DA REGIÃO SUL DA LAGOA ITAPEVA PARA A PRIMAVERA DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S, B) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S1, C) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S2, D) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S3, E) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO S4	125
FIGURA 5.64 ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DA REGIÃO CENTRO DA LAGOA ITAPEVA PARA A PRIMAVERA DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C, B) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C1, C) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C2, D) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C3, E) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO C4	127
FIGURA 5.65 ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA DA REGIÃO NORTE DA LAGOA ITAPEVA PARA A PRIMAVERA DE 1999. I) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MEDIDOS, II) VENTO NA LAGOA EM FUNÇÃO DO TEMPO (M/S), III) ROSA DOS VENTOS, A) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N, B) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N1, C) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N2, D) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N3, E) ROSA DA VELOCIDADE DA ÁGUA NO PONTO N4.....	128
FIGURA 5.66 ROSA DOS VENTOS DURANTE A 1 ^A CAMPANHA (02/03/1999 A 07/03/1999).....	133
FIGURA 5.67 ROSA DOS VENTOS DURANTE A 2 ^A CAMPANHA (21/05/1999 A 26/05/1999).....	133
FIGURA 5.68 ROSA DOS VENTOS NA CAMPANHA DE AGO/99 – DIAS 14 A 16 E 16 A 19	134
FIGURA 5.69 TURBIDEZ EM FUNÇÃO DE A) NI E VA, C) NI E AO, E) VA E AO. SÓLIDOS SUSPENSOS EM FUNÇÃO DE B) NI E VA, D) NI E AO, F) VA E AO. NI – NÍVEL DA ÁGUA, VA – VELOCIDADE DA ÁGUA, AO – ALTURA DE ONDA. UTILIZANDO MÉDIAS DE 1 HORA PARA A 1 ^A CAMPANHA (VERÃO) PARA O PONTO SUL.....	136
FIGURA 5.70 TURBIDEZ EM FUNÇÃO DE A) NI E VA, C) NI E AO, E) VA E AO. SÓLIDOS SUSPENSOS EM FUNÇÃO DE B) NI E VA, D) NI E AO, F) VA E AO. NI – NÍVEL DA ÁGUA, VA – VELOCIDADE DA ÁGUA, AO – ALTURA DE ONDA. UTILIZANDO MÉDIAS DE 1 HORA PARA A 2 ^A CAMPANHA (OUTONO) PARA O PONTO SUL	137
FIGURA 5.71 TURBIDEZ EM FUNÇÃO DE A) NI E VA, C) NI E AO, E) VA E AO. SÓLIDOS SUSPENSOS EM FUNÇÃO DE B) NI E VA, D) NI E AO, F) VA E AO. NI – NÍVEL DA ÁGUA, VA – VELOCIDADE DA ÁGUA, AO – ALTURA DE ONDA. UTILIZANDO MÉDIAS DE 1 HORA PARA A 3 ^A CAMPANHA (INVERNO) PARA O PONTO SUL	138

FIGURA 5.72 TURBIDEZ EM FUNÇÃO DE A) NI E VA, C) NI E AO, E) VA E AO. SÓLIDOS SUSPENSOS EM FUNÇÃO DE B) NI E VA, D) NI E AO, F) VA E AO. NI – NÍVEL DA ÁGUA, VA – VELOCIDADE DA ÁGUA, AO – ALTURA DE ONDA. UTILIZANDO MÉDIAS DE 1 HORA PARA A 1 ^A CAMPANHA (VERÃO) PARA O PONTO CENTRAL..	139
FIGURA 5.73 TURBIDEZ EM FUNÇÃO DE A) NI E VA, C) NI E AO, E) VA E AO. SÓLIDOS SUSPENSOS EM FUNÇÃO DE B) NI E VA, D) NI E AO, F) VA E AO. NI – NÍVEL DA ÁGUA, VA – VELOCIDADE DA ÁGUA, AO – ALTURA DE ONDA. UTILIZANDO MÉDIAS DE 1 HORA PARA A 2 ^A CAMPANHA (OUTONO) PARA O PONTO CENTRAL.....	140
FIGURA 5.74 TURBIDEZ EM FUNÇÃO DE A) NI E VA, C) NI E AO, E) VA E AO. SÓLIDOS SUSPENSOS EM FUNÇÃO DE B) NI E VA, D) NI E AO, F) VA E AO. NI – NÍVEL DA ÁGUA, VA – VELOCIDADE DA ÁGUA, AO – ALTURA DE ONDA. UTILIZANDO MÉDIAS DE 1 HORA PARA A 3 ^A CAMPANHA (INVERNO) PARA O PONTO CENTRAL.....	141
FIGURA 5.75 TURBIDEZ EM FUNÇÃO DE A) NI E VA, C) NI E AO, E) VA E AO. SÓLIDOS SUSPENSOS EM FUNÇÃO DE B) NI E VA, D) NI E AO, F) VA E AO. NI – NÍVEL DA ÁGUA, VA – VELOCIDADE DA ÁGUA, AO – ALTURA DE ONDA. UTILIZANDO MÉDIAS DE 1 HORA PARA A 1 ^A CAMPANHA (VERÃO) PARA O PONTO NORTE.....	142
FIGURA 5.76 TURBIDEZ EM FUNÇÃO DE A) NI E VA, C) NI E AO, E) VA E AO. SÓLIDOS SUSPENSOS EM FUNÇÃO DE B) NI E VA, D) NI E AO, F) VA E AO. NI – NÍVEL DA ÁGUA, VA – VELOCIDADE DA ÁGUA, AO – ALTURA DE ONDA. UTILIZANDO MÉDIAS DE 1 HORA PARA A 2 ^A CAMPANHA (OUTONO) PARA O PONTO NORTE ...	143
FIGURA 5.77 TURBIDEZ EM FUNÇÃO DE A) NI E VA, C) NI E AO, E) VA E AO. SÓLIDOS SUSPENSOS EM FUNÇÃO DE B) NI E VA, D) NI E AO, F) VA E AO. NI – NÍVEL DA ÁGUA, VA – VELOCIDADE DA ÁGUA, AO – ALTURA DE ONDA. UTILIZANDO MÉDIAS DE 1 HORA PARA A 3 ^A CAMPANHA (INVERNO) PARA O PONTO NORTE...	145
FIGURA 5.78 TURBIDEZ EM FUNÇÃO DE A) NI E VA, C) NI E AO, E) VA E AO. SÓLIDOS SUSPENSOS EM FUNÇÃO DE B) NI E VA, D) NI E AO, F) VA E AO. NI – NÍVEL DA ÁGUA, VA – VELOCIDADE DA ÁGUA, AO – ALTURA DE ONDA. UTILIZANDO MÉDIAS DE 1 HORA PARA TODA AS CAMPANHAS E TODOS OS PONTOS DE AMOSTRAGEM DA LAGOA ITAPEVA.....	146
FIGURA 5.79 VALORES CALCULADOS X OBSERVADOS DE TURBIDEZ E SS NO PONTO SUL. A) TURBIDEZ: 1 ^A CAMPANHA – VERÃO; B) SS: 1 ^A CAMPANHA – VERÃO; C) TURBIDEZ: 2 ^A CAMPANHA – OUTONO; D) SS: 2 ^A CAMPANHA – OUTONO; E) TURBIDEZ: 3 ^A CAMPANHA – INVERNO; F) SS: 3 ^A CAMPANHA – INVERNO; G) TURBIDEZ: TODAS AS CAMPANHAS; H) SS: TODAS AS CAMPANHAS	150
FIGURA 5.80 VALORES CALCULADOS X OBSERVADOS DE TURBIDEZ E SS NO PONTO CENTRAL. A) TURBIDEZ: 1 ^A CAMPANHA – VERÃO; B) SS: 1 ^A CAMPANHA – VERÃO; C) TURBIDEZ: 2 ^A CAMPANHA – OUTONO; D) SS: 2 ^A CAMPANHA – OUTONO; E) TURBIDEZ: 3 ^A CAMPANHA – INVERNO; F) SS: 3 ^A CAMPANHA – INVERNO; G) TURBIDEZ: TODAS AS CAMPANHAS; H) SS: TODAS AS CAMPANHAS	152
FIGURA 5.81 VALORES CALCULADOS X OBSERVADOS DE TURBIDEZ E SS NO PONTO NORTE. A) TURBIDEZ: 1 ^A CAMPANHA – VERÃO; B) SS: 1 ^A CAMPANHA – VERÃO; C) TURBIDEZ: 2 ^A CAMPANHA – OUTONO; D) SS: 2 ^A CAMPANHA – OUTONO; E) TURBIDEZ: 3 ^A CAMPANHA – INVERNO; F) SS: 3 ^A CAMPANHA – INVERNO; G) TURBIDEZ: TODAS AS CAMPANHAS; H) SS: TODAS AS CAMPANHAS	154
FIGURA 5.82 VALORES CALCULADOS X OBSERVADOS DE TURBIDEZ E SS NOS TRÊS PONTOS DE AMOSTRAGEM. A) TURBIDEZ; B) SS.....	157

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 RELAÇÃO ENTRE A ALTURA DE ONDA PRODUZIDA E A DINÂMICA DE FUNDO, EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE MÉDIA ENTRE OS PONTOS DE AMOSTRAGEM (1,5M) NA LAGOA ITAPEVA (CARDOSO, 2001)	27
TABELA 3.2 <i>FETCH</i> EFETIVO PARA CADA DIREÇÃO DE VENTO PREDOMINANTE SAZONALMENTE E A ESTIMATIVA DA ALTURA DE ONDA PRODUZIDA (CARDOSO, 2001).....	28
TABELA 4.1 COORDENADAS DOS PONTOS DE COLETA.....	37
TABELA 4.2 DADOS REQUERIDOS.....	39
TABELA 4.3 ALTURA DA ONDA (M) - HAKANSON (1981)	58
TABELA 5.1 ESCALA DE BEAUFORT – INTENSIDADE DO VENTO	63
TABELA 5.2 <i>FETCH</i> EFETIVO (KM) PARA A LAGOA ITAPEVA	66
TABELA 5.3 ALTURA MÉDIA DA ONDA (M) PARA CADA CAMPANHA NA LAGOA ITAPEVA*	68
TABELA 5.4 COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO (R^2) PARA AS 4 HIPÓTESES	69
TABELA 5.5 VALORES DE ALTURA DO LENÇOL FREÁTICO E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA COLETADOS EM CAMPO (FONTE: ECOPLAN, 1997).....	75
TABELA 5.6 DESNÍVEIS MÁXIMOS COM DADOS REAIS ENTRE OS PONTOS DE COLETA NA LAGOA ITAPEVA	85
TABELA 5.7 VELOCIDADE E DIREÇÃO DA ÁGUA PARA OS PONTOS DE COLETA DURANTE AS ESTAÇÕES DO ANO E DURANTE AS CAMPANHAS.....	129
TABELA 5.8 CORRELAÇÕES PARA A LAGOA ITAPEVA DURANTE A ANO DE 1999 ENTRE NÍVEL DE ÁGUA, VELOCIDADE DO VENTO E VELOCIDADE DA ÁGUA COM SÓLIDOS SUSPENSOS E TURBIDEZ PARA OS PONTOS DE AMOSTRAGEM.....	132
TABELA 5.9 CORRELAÇÕES PARA A LAGOA ITAPEVA PARA A 1 ^ª CAMPANHA (02/03/1999 A 07/03/1999) ENTRE NÍVEL DE ÁGUA, VELOCIDADE DO VENTO E VELOCIDADE DA ÁGUA COM SÓLIDOS SUSPENSOS E TURBIDEZ PARA OS PONTOS DE AMOSTRAGEM.....	132
TABELA 5.10 CORRELAÇÕES PARA A LAGOA ITAPEVA PARA A 2 ^ª CAMPANHA (21/05/1999 A 26/05/1999) ENTRE NÍVEL DE ÁGUA, VELOCIDADE DO VENTO E VELOCIDADE DA ÁGUA COM SÓLIDOS SUSPENSOS E TURBIDEZ PARA OS PONTOS DE AMOSTRAGEM.....	133
TABELA 5.11 CORRELAÇÕES PARA A LAGOA ITAPEVA PARA A 3 ^ª CAMPANHA (14/08/1999 A 19/08/1999) ENTRE NÍVEL DE ÁGUA, VELOCIDADE DO VENTO E VELOCIDADE DA ÁGUA COM SÓLIDOS SUSPENSOS E TURBIDEZ PARA OS PONTOS DE AMOSTRAGEM.....	134
TABELA 5.12 CORRELAÇÕES COM SS PARA A CAMPANHA – 14 A 16 AGO/99.....	134
TABELA 5.13 CORRELAÇÕES COM SS PARA A CAMPANHA – 16 A 19 AGO/99.....	135
TABELA 5.14 RESUMO DAS REGRESSÕES MÚLTIPLAS ENTRE AS VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS E AMBIENTAIS PARA O PONTO DE AMOSTRAGEM SUL NA LAGOA ITAPEVA DAS CAMPANHAS EFETUADAS EM 1999.	149
TABELA 5.15 COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA O PONTO DE AMOSTRAGEM SUL NA LAGOA ITAPEVA DAS CAMPANHAS EFETUADAS EM 1999	149
TABELA 5.16 RESUMO DAS REGRESSÕES MÚLTIPLAS ENTRE AS VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS E AMBIENTAIS PARA O PONTO DE AMOSTRAGEM CENTRAL NA LAGOA ITAPEVA DAS CAMPANHAS EFETUADAS EM 1999	151
TABELA 5.17 COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA O PONTO DE AMOSTRAGEM CENTRAL NA LAGOA ITAPEVA DAS CAMPANHAS EFETUADAS EM 1999	151

TABELA 5.18 RESUMO DAS REGRESSÕES MÚLTIPLAS ENTRE AS VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS E AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS PARA O PONTO DE AMOSTRAGEM NORTE NA LAGOA ITAPEVA DAS CAMPANHAS EFETUADAS EM 1999	153
TABELA 5.19 COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA O PONTO DE AMOSTRAGEM NORTE NA LAGOA ITAPEVA DAS CAMPANHAS EFETUADAS EM 1999	153
TABELA 5.20 RESUMO DAS REGRESSÕES MÚLTIPLAS ENTRE AS VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS E AMBIENTAIS PARA CADA O PONTO DE AMOSTRAGEM NA LAGOA ITAPEVA CONSIDERANDO TODAS AS CAMPANHAS EFETUADAS EM 1999	156
TABELA 5.21 COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA CADA O PONTO DE AMOSTRAGEM NA LAGOA ITAPEVA CONSIDERANDO TODAS AS CAMPANHAS EFETUADAS EM 1999	156
TABELA 5.22 RESUMO DAS REGRESSÕES MÚLTIPLAS ENTRE AS VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS E AMBIENTAIS PARA TODOS OS PONTO DE AMOSTRAGEM NA LAGOA ITAPEVA CONSIDERANDO TODAS AS CAMPANHAS EFETUADAS EM 1999	157
TABELA 5.23 COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA TODOS OS PONTO DE AMOSTRAGEM NA LAGOA ITAPEVA CONSIDERANDO TODAS AS CAMPANHAS EFETUADAS EM 1999	157
TABELA 5.24 RESUMO DAS VARIÁVEIS, MÉDIAS UTILIZADAS E CORRELAÇÕES DAS REGRESSÕES PARA AS CAMPANHAS DE CADA PONTO DE COLETA.....	158

Lista de Símbolos

- G – radiação incidente de onda curta ($\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{dia}$);
- Rt – radiação no topo da atmosfera ($\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{dia}$);
- α, β – parâmetros, que dependem do local, utilizados no cálculo da radiação incidente de onda curta;
- p – proporção entre o número efetivo de horas de brilho solar e o máximo possível;
- $I(t)$ – hidrograma de entrada no tempo t ;
- $O(t)$ – hidrograma de saída no tempo t ;
- $dS(t)$ – volume armazenado no tempo t ;
- dt – intervalo de tempo t ;
- Q – recarga do aquífero (m^3/s);
- K – condutividade hidráulica (m/s);
- dh – diferença das alturas piezométricas (m);
- dl – distância entre leituras piezométricas (m);
- a – inclinação do fundo da lagoa;
- h – altura da lâmina de água da lagoa (m);
- L – comprimento da maior dimensão da lagoa (m);
- S – entropia;
- T – temperatura absoluta;
- E – energia da massa m ;
- Q_c – calor;
- m – massa do fluido em questão (kg);
- V – vetor velocidade (m/s);
- F – força externa (N);
- W – trabalho feito na massa m por F ;
- U, V – componentes do vetor velocidade do escoamento nas direções x e y (m/s);
- ζ – nível medido a partir de um plano de referência fixo (m);
- h – profundidade referida a este plano de referência fixo (m);
- H – profundidade total do escoamento $\rightarrow H = h + \zeta$ (m);
- Ω – Aceleração de Coriolis (m/s^2);
- τ_{sx}, τ_{sy} – componentes da tensão de cisalhamento na superfície causadas pelo vento;
- C_h – coeficiente de Chezy;
- v_t – coeficiente de dissipação turbulenta (m^2/s);
- h_m – profundidade média da lagoa (m);

$\Delta x, \Delta y$ – tamanho da malha utilizada no programa IPH-A (m);
 n – coeficiente de Manning;
 k – constante de Karman;
 z_0 – rugosidade do fundo;
 W_x, W_y – componentes da velocidade do vento (m/s);
 C_v – coeficiente de ajuste;
 T – período da seiche (horas);
 n – número de nós da seiche;
 g – força da gravidade ($9,81\text{m/s}^2$);
 Q_{saida} – vazão de saída da lagoa (m^3/s);
 a, b, c, d – parâmetros da equação da vazão de saída da lagoa;
 h_i – profundidade na lagoa (m);
 L_f – comprimento efetivo sobre a lagoa, medido do ponto de amostragem até as margens da lagoa nas direções do vento (*fetch*).

1 INTRODUÇÃO

A água doce em áreas costeiras é um dos elementos fundamentais para o desenvolvimento destas regiões, o que tem levado à sua exploração intensiva trazendo com isto sérios impactos ambientais. Para evitar ou mitigar estes efeitos, permitindo que os recursos hídricos sejam fonte de bem-estar da população local e fator de alavancagem da economia regional, há a necessidade de serem desenvolvidas abordagens para a gestão destes ambientes.

As lagoas costeiras são excelentes áreas de lazer. O ecoturismo vem ganhando destaque em relação ao turismo tradicional, pois valoriza turisticamente a região e ao mesmo tempo preocupa-se com a beleza cênica e harmonia paisagística. O turismo náutico também é uma boa alternativa, desde que sejam tomadas as devidas medidas de suporte de carga do ambiente, pois pode contribuir através da realização de campeonatos náuticos, gerando uma valorização turística da região. Todos estes fatores contribuem para uma valorização imobiliária das áreas de entorno.

Lagoas costeiras são ecossistemas que ocorrem ao longo de toda a costa brasileira, sendo que o maior número delas são encontradas nos Estados do Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul. Podem-se considerar as lagoas costeiras brasileiras como um dos conjuntos de ecossistemas aquáticos continentais mais representativos do país (Esteves, 1998).

O conhecimento do regime hídrico-ambiental destes sistemas costeiros é, portanto, fundamental para uma correta avaliação das ações de gestão a serem empreendidas. Neste sentido, já se vêm desenvolvendo ao longo dos anos, estudos e melhoramentos nos modelos matemáticos para permitir a reprodução e estudo destes fenômenos.

A primeira geração destes modelos foi à avaliação de funções analíticas pelo computador, já na segunda geração vieram os modelos específicos, fabricados somente para o caso em estudo e em seguida apareceram os de terceira geração, onde entrou o conceito de modelação hidrodinâmica (Abbott, 1980).

Os modelos matemáticos que utilizam as equações da continuidade e dinâmicas (hidrodinâmicas) são bastante utilizados no estudo de escoamentos de rios, lagos e mares, principalmente quando há regimes turbulentos e não permanentes.

Para o estudo de corpos hídricos com baixa profundidade, como lagoas costeiras e, portanto, dependentes principalmente do regime de ventos, faz-se necessário o uso da modelagem hidrodinâmica. Em razão da baixa profundidade considera-se ainda que a velocidade não varia em função da profundidade, portanto os modelos mais indicados são os modelos hidrodinâmicos bidimensionais horizontais.

Em paralelo têm-se os estudos de caracterização ambiental, onde se estudam as variáveis físicas, químicas e biológicas dos corpos hídricos em escala temporal e espacial.

No início, os estudos focalizavam o consumo humano (enfoque sanitário), deixando de lado a qualidade voltada para as comunidades aquáticas (enfoque ecológico). Ainda hoje, a Lei nº 6.938 (CONAMA, 1992a) e a resolução nº 20/86 (CONAMA, 1992b) baseiam-se em dados estáticos e não dinâmicos. Agora, com o crescimento da importância da gestão dos recursos hídricos e com a preocupação, não só da preservação dos ambientes aquáticos, mas também dos ecossistemas, há a necessidade de tentar-se vincular quantidade com qualidade de água, ou seja, de se conhecer as relações eco-hidrológicas.

Desde os primeiros estudos limnológicos, no final do século passado, foram avaliados os mais diferentes fatores e sua significância para caracterização do estado trófico de um lago. Inicialmente os trabalhos originaram-se em regiões glaciais e, por diferenciarem-se apenas pelas características morfológicas, foram a estas que se atribuiu uma maior atenção. O aperfeiçoamento dos métodos de análises químicas permitiu determinações mais precisas e assim, surgiram várias metodologias de tipificação das lagoas segundo o estado trófico (Schäfer, 1988).

Muitos estudos são feitos em relação aos ecossistemas aquáticos levando-se em consideração apenas variáveis físicas, químicas e biológicas em escala temporal e espacial, porém poucos estudos tentam correlacionar os efeitos das variáveis hidrodinâmicas com essas variáveis.

Por outro lado, o efeito da dinâmica da água sobre a comunidade biológica pode ser indireto, através de fatores como turbidez-não-algal, nutrientes (fósforo e nitrogênio) e outras características químicas da água, tais como matéria orgânica dissolvida e particulada, suprimento de alimento e oxigênio dissolvido, estes sim, influenciados diretamente pela dinâmica (Marques, 2000).

A avaliação da qualidade das águas é uma atividade cujo intuito é a medição de parâmetros indicadores, relacionados com a condição ambiental dos cursos hídricos avaliados. O padrão de uso e ocupação dos solos de uma região determina os tipos de resíduos produzidos, os quais irão impactar em maior ou menor grau os cursos hídricos que recebem esta carga. A partir da avaliação da qualidade das águas podemos detectar, dentre outros problemas:

- A contaminação das águas ocasionada pelo despejo de esgotos domésticos e industriais;
- Alterações nas concentrações de nutrientes e produção primária em ecossistemas aquáticos;
- Alterações relacionadas com o manejo inadequado de solos (erosão e assoreamento);
- Contaminação de mananciais com insumos utilizados em atividades agropecuárias.

Como contribuição a esta ampla necessidade de conhecimento, o presente estudo aborda dois aspectos específicos que estão presentes nos objetivos a seguir:

1. Conhecimento da hidrodinâmica de uma lagoa costeira no plano horizontal;
2. Estabelecimento de relações entre esta hidrodinâmica e uma importante componente ambiental ligada aos sólidos suspensos e turbidez.

Estas duas variáveis ambientais são parâmetros físicos, determinados pelo volume de material suspenso na coluna de água. Estes parâmetros podem sofrer alterações decorrentes da adição antrópica de sedimentos aos cursos d'água, com origem em escavações, terraplenagens, dragagens e desmatamentos. Na situação natural, tanto os sólidos suspensos, quanto a turbidez são variáveis imprescindíveis para o conhecimento do ciclo limnológico.

Suas medidas dependem ou estão intimamente relacionadas à transparência Secchi, à ressuspensão de material de fundo e à produtividade do ecossistema.

O estudo aborda o caso da lagoa Itapeva no litoral norte do Rio Grande do Sul, durante o ano de 1999, ano em que foram feitas campanhas de campo intensivas e sazonais (Cardoso, 2001). Algumas informações destas amostragens de campo, juntamente com simulações do escoamento da lagoa por um modelo hidrodinâmico, embasam este estudo de caso.

A circulação nas lagoas e reservatórios pode ser simulada, em geral, pelas equações de movimento e pela equação da continuidade. Os modelos hidrodinâmicos podem ser divididos nos seguintes tipos, em função do objetivo a ser alcançado. Cada tipo de modelo tem suas vantagens e aplicabilidades conforme descrito a seguir.

1. Modelos de circulação bidimensional horizontal (uma camada);
2. Modelos bidimensionais de duas camadas ou de múltiplas camadas;
3. Modelos bidimensionais verticais para regiões estratificadas;
4. Modelos tridimensionais.

3.1.1 MODELOS DE CIRCULAÇÃO BIDIMENSIONAL HORIZONTAL

Estes modelos são baseados nas equações dos modelos tridimensionais, as quais são integradas na vertical. O resultado desta simplificação são as equações bidimensionais que, comparativamente, são mais fáceis de analisar e possuem um tempo menor de processamento computacional. Este tipo de modelo não mostra variações na componente vertical do fluido e calcula apenas o transporte total de massa.

A principal limitação destes modelos é a não consideração dos efeitos de velocidade e variação da densidade na direção vertical, contudo ele é adequado para o uso em lagoas de águas rasas e para um estudo preliminar do escoamento em lagoas de maior profundidade.

Os primeiros estudos a abordar modelos hidrodinâmicos bidimensionais horizontais, para escoamentos em lagos, mares e estuários iniciaram na década de 60 e o trabalho de Leendertse (1967) é referência básica. Diversos autores estudaram o modelo bidimensional, como por exemplo: Daubert and Graffe (1967), Marsch (1971), Abbott et al. (1973), Hinwood e Wallis (1975). A evolução de modelos desse tipo é avaliada basicamente pelo refinamento dos métodos numéricos de solução das equações, mas o aperfeiçoamento obtido não invalida a aplicação de modelos clássicos como o de Leendertse (1967).

3.1.2 *MODELOS MULTICAMADAS DE CIRCULAÇÃO BIDIMENSIONAL HORIZONTAL*

Neste tipo de modelo, o corpo d'água é representado por várias camadas, sendo que cada uma delas possui uma densidade diferente e constante. A espessura da camada é variável e a posição varia dependendo do escoamento e das características internas do corpo d'água.

Este modelo é recomendado para lugares fortemente estratificados e com baixa capacidade de mistura entre as camadas. Em obras como as de Simons (1973, 1980) *apud* Orlob (1983), Wang e Connor (1975) *apud* Orlob (1983), Cheng et al. (1976) *apud* Orlob (1983) pode-se encontrar uma boa descrição desses modelos.

Usualmente o modelo mais utilizado é o de duas camadas, uma correspondente ao epilimnio, parte superior da lâmina que tem luminosidade, trabalhando mais com processos aeróbios, e outro ao hipolimnio, parte inferior onde predominam processos anaeróbios.

3.1.3 *MODELO BIDIMENSIONAL VERTICAL PARA REGIÕES ESTRATIFICADAS*

Quando as dimensões na horizontal para o corpo d'água são muito inferiores à direção vertical, seção longitudinal, pode ser usado este modelo. Normalmente utilizam-se em reservatórios e rios.

Através dele pode-se estudar variações na vertical como: temperatura, salinidade, turbidez, pH, OD, entre outros.

3.1.4 *MODELOS TRIDIMENSIONAIS*

O modelo mais complexo e avançado entre os modelos já citados. O desenvolvimento de computadores mais velozes tem facilitado seu uso, apesar da grande quantidade de cálculos que são necessários.

Em reservatórios e em alguns tipos de lagos faz-se necessário este modelo para uma melhor representação da variação de nutrientes, plâncton e outros organismos que estão

fortemente associados às correntes térmicas verticais, à profundidade da água e à correntologia tridimensional.

Hoje, já estão sendo usados modelos que trabalham com qualidade e quantidade, ou seja, com hidrodinâmica e qualidade de água. Shen et al. (2002) utilizaram um modelo 3D para simular o transporte em longo prazo de poluentes na baía de Hakata, Japão e encontraram resultados satisfatórios em sua calibração. Uma simulação 3D como esta se justifica porque a circulação em ambientes de baías, estuários e regiões marítimas costeiras pode assumir uma complexidade somente descritível por simulações que consideram todas as direções de fluxo.

3.1.5 MÉTODOS NUMÉRICOS

Nas simulações hidrodinâmicas multidimensionais, a arquitetura dos métodos numéricos que resolvem as equações discretizadas no espaço-tempo se constituiu num aspecto chave de definição de um modelo, em função das limitações das capacidades de processamento dos computadores. Hoje em dia as escolhas dependem mais de critérios pessoais do modelador porque não há uma vantagem marcante de um método sobre os outros.

Na literatura dos anos mais recentes sobre os avanços dos métodos numéricos com equações hiperbólicas para as leis de conservação, pode-se notar que muito mais pesquisadores voltaram-se para o estudo das equações de Euler do que nas equações para lagoas rasas, havendo nestas uma tendência de aplicação de métodos clássicos. Navarro et al. (1995) afirmaram que os métodos clássicos e os esquemas de diferenças ainda dominavam o mercado.

Basicamente, os métodos numéricos são, na grande maioria de diferenças finitas ou de elementos (malhas ou volumes) finitos. Nos métodos de diferenças finitas as malhas numéricas são retangulares, mas as equações têm discretização mais simples. Nos métodos de elementos ou volumes finitos as malhas numéricas, em geral, são com células triangulares (propiciando melhor representação do contorno), mas as equações discretizadas têm maior complexidade. Com a evolução dos computadores, as desvantagens intrínsecas das malhas regulares dos métodos de diferenças finitas foram contornadas por refinamentos nas malhas

de cálculo. Desta forma, os métodos de diferenças finitas consolidaram-se como uma opção clássica de modelagem.

O esquema ADI (integração por caminhos alternados) de Leendertse (1967), por exemplo, é um método numérico clássico de diferenças finitas implícitas para modelos bidimensionais horizontais, cuja utilização já foi comprovada em simulações do lago Guaíba e lagoa dos Patos com o modelo IPH-A (Borche, 1986).

Diferentes esquemas numéricos foram comparados para as equações bidimensionais das águas rasas e cada esquema possui suas vantagens e desvantagens. O método explícito tem como vantagem a simplicidade no uso e nas condições de contorno, porém tem problemas de estabilidade em cada iteração, precisando de intervalos menores para cada iteração (Dronkers et al. (1975) *apud* Song et al., 1995). Por sua vez, o método implícito pode utilizar intervalos maiores, porém as equações a serem resolvidas, em geral, são muito grandes (Ramming et al. (1980) *apud* Song et al., 1995). E os esquemas ADI que podem utilizar intervalos maiores que o explícito são inferiores aos métodos totalmente implícitos, pois possuem apenas dois sistemas de matrizes triangulares para serem resolvidas alternadamente (Stteling (1983) *apud* Song et al., 1995). De qualquer forma os esquemas ADI podem ter sua precisão controlada pelo grau de discretização (Silveira, 1986).

3.1.6 MODELANDO PROCESSOS ECOLÓGICOS E HIDRODINÂMICOS

A modelagem e estudos que buscam unir variáveis hidrodinâmicas e ambientais têm se concentrado mais na região marinha e estuários, deixando um pouco de lado as lagoas costeiras. No caso das lagoas costeiras de águas rasas a influência da hidrodinâmica é diferente do que no mar, pois nelas a influência dos ventos é consideravelmente maior, tendo a capacidade de misturar toda a coluna de água.

O caminho tradicional para integrar-se a equação de transporte no tempo e no espaço é através da consideração dos valores médios das propriedades incluindo em um coeficiente de dispersão, os efeitos dos termos não-lineares da equação. Existem, contudo, várias vantagens em agrupar modelos ecológicos e hidrodinâmicos. Um modelo de transporte pode simular a distribuição de uma propriedade, por exemplo, a salinidade, e então amenizar o contínuo monitoramento necessário para obter os dados de campo descritos.

A simulação do modelo de um ecossistema é uma ferramenta que capacita alguém não somente a descrever, mas também a prever a qualidade físico-química e biológica da água, dependendo do modo de gerenciamento hidráulico, variação de condições meteorológicas, mudança no fluxo da bacia, entre outros fatores (Thébault & Salençon, 1993; Salençon & Thébault, 1996).

Em modelagem biológica não se deve esperar a exata superposição entre cálculos e medidas "*in loco*", como se busca normalmente em modelagem de processos físicos. Estas medidas fornecem uma imagem instantânea de um ecossistema, o qual está sujeito a maiores flutuações no tempo-espaço, enquanto que um modelo simula a evolução de variáveis médias. Por isso, é bastante comum encontrar-se certas discrepâncias, dada a complexidade do sistema biológico. Mais importante que minimizar as discrepâncias entre valores simulados e medidos, é representar o comportamento do sistema e as ordens de magnitude de eventos significantes (Salençon & Thébault, 1996).

A extrema sensibilidade do ecossistema à hidrodinâmica justifica por si só a união de dois modelos (biológico e hidrodinâmico), tanto quanto permite seu uso potencial como uma ferramenta no gerenciamento hídrico (Thébault & Salençon, 1993).

Justamente pelo fato da biologia ser muito pontual, ou seja, por ela ser distinta em cada região estudada é que se devem desenvolver modelos que possam ser usados para regiões tropicais e subtropicais, onde possivelmente os valores dos parâmetros das equações de cálculo para estimativa dos processos biológicos devem ser distintos aos das regiões temperadas, por exemplo. Estes modelos devem permitir uma certa maleabilidade, pois estas premissas não se verificam de forma geral no ecossistema em questão, o que determina a impossibilidade de descrever o estado trófico do sistema.

3.2 VARIÁVEIS DA HIDRODINÂMICA DE LAGOAS RASAS E VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Neste sub-capítulo serão abordados estudos que justifiquem ou que comparem a variação dos valores hidrodinâmicos com as variáveis ambientais. Descreve-se inicialmente, de maneira geral, a importância da hidrodinâmica nos ecossistemas aquáticos, em seguida detalham-se um pouco mais suas causas e seus efeitos e, finalmente são abordadas as variáveis em estudo: sólidos suspensos e turbidez.

3.2.1 *ECOSSISTEMAS AQUÁTICOS*

O conhecimento ecológico de um sistema aquático pressupõe que se tenham informações básicas sobre sua dinâmica, pois esta possui uma relação direta com a posição geográfica do ecossistema, tendendo a ser menos evidenciada em latitudes menores (Ganf & Horne (1975) *apud* Esteves et al., 1998). Assim sendo, modelos propostos para regiões temperadas não devem ser usados diretamente para regiões tropicais, por exemplo.

Assim, a dinâmica da água deve afetar de certa forma o estado trófico do ambiente lêntico, as águas calmas em questão. Este ambiente tem sido bem avaliado e métodos foram desenvolvidos para o hemisfério norte, porém existem restrições quanto à aplicabilidade de tais modelos em ambientes tropicais e subtropicais, em função da grande quantidade de parâmetros intrínsecos aos modelos e que, em geral, são bem distintos das regiões tropicais e subtropicais.

Ainda com relação aos processos biológicos, químicos, geológicos e físicos para ambientes lagunares, estes não são bem conhecidos nem compreendidos, gerando um problema para o gerenciamento e desenvolvimento destas fontes. Também, freqüentemente não respondem ecologicamente do mesmo modo à adição, natural ou antropogênica, de sedimentos, nutrientes e poluentes. É surpreendente que exista tão pouca informação sintetizada sobre lagoas costeiras, considerando que elas ocupam 13% de todos os ambientes costeiros do mundo (Kjerfve, 1990).

Pode-se citar como estudo sobre lagoas costeiras o lago *Neusiedlersee*, Áustria/Hungria, único entre os lagos da Europa Central, tem uma grande área superficial (320 km²), mas uma profundidade média de apenas 1,3m (profundidade máxima 2m). Devido aos freqüentes ventos o lago é sempre bem misturado e continuamente turvo, devido a partículas de sedimento que são retiradas do fundo pela ação da onda. Variabilidade horizontal é, entretanto, muito mais importante que a estratificação vertical, a qual ocorre ocasionalmente. A limitação de luz devido a quantidades altas e variáveis de turbidez suspensa dentro do perfil de profundidade tem sido documentada por numerosos perfis fotossintéticos. As interações em curto prazo entre fatores abióticos afetando o ambiente subaquático (turbulências, ação de onda, velocidade de vento e turbidez inorgânica) e componentes bióticos do sistema estão sendo investigados (Dokulil & Padisák, 1994). Segundo Cardoso (2001) este lago apresenta características semelhantes à lagoa Itapeva.

3.2.2 CAUSAS E EFEITOS DAS VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS

As variáveis hidrodinâmicas operam através de uma variedade de controles diretos e indiretos. Inicialmente falar-se-á um pouco (1) das causas ou condições de contorno das lagoas (controles diretos e indiretos) e suas diferentes respostas (efeitos hidrodinâmicos) na lagoa; e (2) dos efeitos sobre as comunidades aquáticas.

1. Condições de contorno

As características principais que governam estuários e lagoas costeiras são marés, descarga de rios, atrito do vento e balanço de calor na superfície, mas respondem desigualmente a estas funções devido à suas diferenças geomorfológicas. Enquanto que, circulação, mistura e transporte tem sido extensivamente estudados em estuários da planície costeira, estes processos têm sido menos enfatizados para lagoas costeiras. Contudo, são de fundamental importância para o planejamento e implementação de estratégias na gestão costeira em lagoas costeiras, o movimento hidrodinâmico, a dinâmica física e a dependência da qualidade da água e a eutrofização na descarga (Kjerfve & Magill, 1989).

Abaixo serão comentadas as características mais importantes para este estudo: balanço hídrico e ventos.

a) Balanço Hídrico

Os balanços hídricos completos considerando chuva, evaporação, entrada de água doce e variação de maré existem somente para poucas lagoas costeiras (Knoppers et al., 1991). Porém, um modelo conceitual ligando processos físicos e biológicos, mesmo em nível genérico, não tem sido alcançado devido à grande diversidade entre lagoas. Uma tentativa de integração tem sido proposta para várias lagoas mexicanas (Yáñez-Arancibia, 1987). Knoppers et al. (1991) apresentaram uma visão geral de características fisiográficas e processos físicos que governam as lagoas costeiras represadas ao longo da costa fluminense (RJ), incluindo exemplos da variabilidade das funções de forças físicas em escalas diárias sazonais, e um balanço hídrico contribuindo para estudos contínuos de processos bio-geoquímicos nestes sistemas lagunares.

Entre as componentes do balanço hídrico, a variação da descarga dos rios tem forte consequência para as mudanças nos modos de circulação. Além de extensos períodos de chuvas e variações no escoamento de água doce, o vento também tem profundo impacto na circulação das águas nas lagoas costeiras (Kjerfve & Magill, 1989).

Todas estas mudanças das componentes do balanço hídrico, como também as alterações climáticas trazem mudanças no regime hidrodinâmico e têm consequências sobre as comunidades aquáticas como foi verificado por diversos autores e em seguida serão citados seus resultados.

A seguir alguns exemplos de lagoas com suas características físicas, climática, condições de contorno e os efeitos hidrodinâmicos resultantes (Cardoso, 1999).

- As lagoas fluminenses são rasas, sistemas que respondem às mudanças de curto prazo de forças meteorológicas, descargas de rios, marés, e oscilações de temperatura com variações de advecção lateral e mistura vertical de massas de água, freqüente ressuspensão de sedimentos superficiais, gradientes de turbidez e regimes de luminosidade (Knoppers & Moreira, 1988 e 1990; Domingos, 1991). O outono é a estação mais crítica marcada por mudanças na composição de espécies fitoplanctônicas e taxas de produção primária nas lagoas (Knoppers & Moreira, 1990; Moreira & Knoppers, 1990; Domingos, 1991; Carmouze et al., 1991). A variação de maré para as lagoas está entre 0,01 e 0,04m. O canal de entrada das lagoas atua como um filtro dinâmico para mudanças no nível de água. As passagens das frentes frias induzem mudanças drásticas no nível de água de lagoas externas (Domingos, 1991; Knoppers & Moreira, 1988).
- A Lagoa de Guarapina, no Rio de Janeiro, experimenta três regimes hidrológicos distintos: (1) períodos de constante fluxo de saída de água, persistindo por uma ou duas semanas, quando o nível de água é alto, ocorrência substancial de escoamento, a salinidade é muito baixa e decresce vagarosamente até uma taxa linear, oscilação de temperatura de 3°C ocorrem entre o período dia-noite e não existe variabilidade de maré; (2) períodos de forte variabilidade de maré, usualmente associado com marés de primavera e elevadas ondas oceânicas de longo período, com

durabilidade de aproximadamente uma semana. Águas marinhas entram na lagoa no pico de cheia da maré e saem do sistema na maré vazante. O nível do mar agindo dentro da lagoa usualmente muda rapidamente durante este período; (3) períodos de quiescência, mais comum durante períodos de maré com bom tempo, durando aproximadamente uma semana, está associado à salinidade e nível da água constante, forte oscilação diurna de temperatura, e forças de maré semanais (Kjerfve et al., 1990).

- A lagoa Itapeva apresenta oscilações dos níveis principalmente em função do vento, contudo, foi bastante semelhante para as regiões central e sul sazonalmente. O ambiente de maior perturbação em razão do movimento da água foi o Sul, enquanto que, o Centro e Norte exibiram uma constância sazonal entre os mesmos. Como a lagoa é fortemente influenciada pelos ventos e estes tem um comportamento sazonal característico os efeitos hidrodinâmicos foram mais acentuados na região norte quando os ventos vinham do SO e OSO e na região sul com ventos NE e ENE. A turbidez, transparência Secchi, sólidos e nutrientes (nitrogênio e fósforo) foram as variáveis mais correlacionadas com a hidrodinâmica da lagoa exibindo um comportamento de efeito-resposta praticamente imediato (Cardoso, 2001).

b) Ventos

Outro fator é a frequência constante de ventos onde a variabilidade horizontal é mais importante que a estratificação vertical que ocorre ocasionalmente (Dokulil (1976, 1984) *apud* Dokulil & Padisák, 1994a). As lagoas costeiras são usualmente bem misturadas, mas podem exibir gradientes horizontais significativos, devido ao escoamento de água doce, e gradientes verticais, devido à radiação solar ou à superfície calma, isto é, a velocidade do vento é baixa fazendo com que a coluna de água não fique totalmente misturada (Kjerfve & Magill, 1989).

Vários autores acreditam que o vento possui grande importância na ressuspensão de partículas na coluna d'água em lagoas rasas e em zonas litorâneas (Carper e Branchman (1984), Gabrielson e Lukatelich (1976), Fréchette e Ourget (1985) *apud* Demmers et al., 1987). Associado a este processo de ressuspensão existe a troca de nutrientes entre a coluna d'água e os sedimentos (Mortimer (1941), Lam e Taquet (1976), Ryding e Forsberg (1977),

Bates e Neafus (1980) *apud* Demmers et al., 1987). Usualmente após estas alterações ocorre o crescimento do fitoplâncton (Walker e O'Donner (1981) *apud* Demmers et al., 1987).

Para as lagoas fluminenses, os ventos tipicamente têm velocidades na faixa de 3-4 m/s e contribuem para a mistura constante da coluna d'água. Em comparação, a mistura da coluna de água por intrusão de maré é de menor importância, por causa da eficiência de maré obstruída por canais de entrada (Kjerfve et al., 1990; Kjerfve & Knoppers, 1991).

O vento exerce forte influência sobre a hidrodinâmica interna das lagoas, podendo ser constatada visivelmente em Araruama - RJ pela formação de seiches sob o efeito das ondas e da deriva litoral. Em Guarapina e Maricá, ambas no Rio de Janeiro, estes efeitos ocorrem em escala bem menor. Este tipo de hidrodinâmica devido ao vento é certamente capaz de remeter em suspensão, o material de fundo que pode ser tão mais relevante quanto menor for a profundidade. O vento age decisivamente, em lagoas pouco profundas, do ponto de vista hidrodinâmico tanto na ressuspensão do material sedimentado quanto na distribuição do oxigênio dissolvido, perturbando nos dois casos os fenômenos fotossintéticos (Azevedo, 1984).

Sarkkula et al. (1991) concluíram que para se obter um efeito do vento mais realista sobre as águas superficiais de lagoas rasas deveria ser usado dados de vento não uniformes no espaço, para assim se conseguir valores quantitativos e qualitativos mais corretos. Arfi et al. (1993) consideraram para suas análises estatísticas duas classes de ventos: calma, ventos inferiores a 2 m/s e ventoso, ventos superiores a 2 m/s. A classificação dos ventos utilizada neste trabalho será discutida no item 5.1 do capítulo Resultados e Discussão.

Outra possibilidade de avaliar o efeito do vento pode ser feita através do cálculo em separado da altura de onda, pois apenas os níveis e velocidades d'água fornecidas pelo modelo hidrodinâmico podem não ser suficientes para encontrar uma correspondência com a variação de sólidos suspensos e turbidez da lagoa.

Este cálculo se baseia na velocidade e duração do vento, no comprimento do fetch efetivo para cada direção do vento. Com estas variáveis pode-se obter uma estimativa da altura de onda gerada. Para o cálculo do fetch efetivo há o método do "Beach Erosion Board" (US Army Corps of Engineers, 1984). O trabalho de Hakanson (1981) também é referência.

O modelo SWAN (Simulation Waves Nearshore) é um exemplo de modelo de ondas para regiões costeiras, este modelo foi apresentado, discutido e validado, obtendo resultados razoáveis para casos acadêmicos, mas eram necessários mais testes de campo (Booij et al., 1999).

Um dos problemas principais para avançar no conhecimento de como tratar modelos de ondas geradas pelos ventos em ambientes de águas rasas é a falta de dados medidos. Ao contrário do que acontece em águas profundas, a dinâmica das ondas em águas rasas é dominada pela interação com o fundo. O crescimento do vento, a propagação, as interações não-lineares, o decaimento de energia são todos fatores de como ocorre a interação das ondas com o fundo (Hernández et al., 2001).

A maioria dos estudos citados se referenciam aos fatores que influenciam os efeitos hidrodinâmicos e não a estes efeitos propriamente ditos, os próximos estudos citados se relacionam a estes efeitos sobre as comunidades aquáticas. Desta maneira tenta-se demonstrar a importância da compreensão das causas, dos efeitos e por sua vez como eles se relacionam com as variáveis ambientais, pois estas têm grande influência nas comunidades aquáticas.

2. Efeitos nas comunidades aquáticas

Alguns dos efeitos que podem ser citados são: mudanças nos tipos de comunidades fitoplanctônicas (sucessão ecológica) e alterações na biomassa.

a) Sucessão ecológica

Em corpos de água rasos e bem misturados, comunidades fitoplanctônicas necessariamente responderiam às componentes horizontais e verticais do movimento induzido pelo vento e suas interações com características batimétricas (Mackas et al. (1985) *apud* Millet & Cecchi, 1992).

Dependendo do regime hidrodinâmico, células fitoplanctônicas podem experimentar maiores flutuações em luz e nutrientes a escalas de tempo muito menores que um ciclo de 24h. A diversidade destas comunidades fitoplanctônica e zooplanctônica exibiu seus valores extremos (máximo e mínimo) de forma oposta sazonalmente. No seu trabalho as

taxas de sucessão diárias na comunidade fitoplanctônica estiveram fortemente vinculadas a ação hidrodinâmica (Cardoso, 2001).

Dokulil & Padisák (1994) encontraram resultado semelhante para períodos sazonais, pois a dinâmica sazonal do fitoplâncton em lagoas de águas rasas em geral é difícil de descrever, picos inesperados de aumento populacional da espécie dominante, bem como repentinas mudanças de espécies podem caracterizar o comportamento freqüente em períodos sazonais. Estas irregularidades podem ser originadas de diferentes fontes.

Estes distúrbios, que geralmente são originados por mudanças climáticas, quando excedem uma periodicidade maior que a duração de uma a duas gerações começam a predominar como controladores das comunidades, deixando de lado os processos normais. (Padisák (1993b) *apud* Dokulil & Padisák, 1994). Em teoria os conceitos de interferência e distúrbios são razoavelmente fáceis de distinguir (Reynolds (1984b, 1988)) *apud* Dokulil & Padisák, (1994). Já na natureza, a separação delas é bastante problemática (Orlik et al. (1993) *apud* Dokulil & Padisák, 1994).

Outros fatores que também podem influenciar a sucessão ecológica, mesmo que seja localmente, são os impactos das chuvas, desmoronamentos de terra, relâmpagos, agricultura. Se estes distúrbios se tornam freqüentes a comunidade pode vir a ser dominada por espécies capazes de se adaptar melhor a estas alterações (Cornell (1978) *apud* Reynolds, 1993). As variações na vazão e na intensidade do vento, podem causar turbulências induzidas que também podem produzir mudanças radicais no crescimento de fitoplâncton (Reynolds (1991) *apud* Reynolds, 1993).

Reynolds (1993) estudou o efeito de vários distúrbios, citados acima, com freqüências distintas no desenvolvimento das comunidades. Para tempos de retorno de 40 a 180 dias, pode ocorrer à alteração momentânea das espécies, mas seria necessária uma maior persistência desta nova situação para que várias gerações se sucedessem e ocorresse uma mudança de espécies dominantes. Porém, Reynolds & Lund (1988) *apud* Reynolds (1993) mostraram que eventos extremos podem sim, fazer drásticas alterações. Para tempos de retorno de 7 a 40 dias, vários autores verificaram que esta duração é suficiente para alterar a dinâmica das comunidades, como por exemplo, distúrbios na hidrografia ou na hidrologia, durante aproximadamente 10 dias (1 a 2 gerações), claramente podem impactar a quantidade de algas e a estrutura das comunidades planctônicas. Para tempos de retorno entre 1 a 7 dias,

que correspondem ao tempo de geração dos indivíduos desta comunidade, são estes os distúrbios que regem o comportamento destas comunidades, de maneira geral.

Padisák et al. (1990) concluíram em seu estudo que a continuidade ou as súbitas mudanças nas comunidades dependem fortemente da variação meteorológica, como: tormentas que ocorrem de 5 a 15 dias depois de um período de “águas calmas”.

b) Biomassa

Em lagoas rasas, várias condições morfométricas e climáticas interferem com a relação entre estado trófico e luz ambiente. Então, ventos freqüentes podem causar um decréscimo da transparência da água através da ressuspensão do sedimento e pela regeneração interna da quantidade de nutrientes. A dinâmica de detritos suspensos na água foi, principalmente explicada pela variação da biomassa fitoplanctônica (69%) e turbulência da água (24%). O limiar para turbulência máxima da água registrou um valor de aproximadamente 8%. A intensidade crítica de vento gerando esta turbulência variou no campo de 3,2 a 5,4 m/s para uma profundidade entre 1 e 3 metros. O efeito do vento no regime de transparência no Delta do Danúbio, na Alemanha, por exemplo, é importante devido ao fato de que, na maior parte do tempo (68 a 80% dos dias ao ano), o vento sopra neste limite (Cristofor et al., 1994).

A variação na intensidade do vento não descreve adequadamente tendências em longo prazo (>1-13 dias) na variabilidade da biomassa fitoplanctônica. Sobre períodos de tempo mais longos, outros fatores físicos, tais como, temperatura ou escoamento de água doce, são igualmente importantes na determinação do caminho da sucessão da dinâmica do fitoplâncton (Levasseur et al. (1984) *apud* Millet & Cecchi, 1992). Maiores aproximações fisiológicas relacionadas com proporção de pigmentos, produção primária e, mais importante, a dinâmica de assembléias de espécies, providenciarão futuras explicações nas conseqüências biológicas, em longo prazo, de fatores físicos ambientais (Millet & Cecchi, 1992).

A grande quantidade de matéria inorgânica em suspensão pode afetar a biomassa anual do fitoplâncton do lago Neusiedlersee, Áustria/Hungria (Dokulil & Padisák, 1994a).

Também é através do vento que se obtém a mistura vertical que já é reconhecida há muito tempo como um importante fator controlador do crescimento fitoplanctônico no ecossistema aquático. Na camada mais superficial da lâmina d'água a mistura vertical é usualmente associada com a grande turbulência gerada por processos como: variações de níveis, vento, correntologia e outros processos referentes à circulação (Demers et al., 1987).

A circulação de água é um dos três fatores principais nas alterações de biomassa do fitoplâncton. A variação dos níveis de água afeta o fitoplâncton em longo prazo, enquanto que a ressuspensão afeta em curto prazo ou até sazonalmente (Dokulil & Padisák, 1994).

Pode-se notar que todos os autores citados concordam nas grandes flutuações nas comunidades aquáticas e que estas são oriundas das características climáticas e de como estas interagem com as características físicas das lagoas. Desta maneira é balizada a justificativa para o trabalho, onde se procura relacionar os efeitos hidrodinâmicos e não somente suas causas nas variações de algumas variáveis ambientais, sólidos suspensos e turbidez.

3.2.3 SEICHE

Uma seiche é uma oscilação de uma superfície líquida e pode ter quase que qualquer período e amplitude. Idealmente cada bacia ou corpo d'água tem uma série natural (característica) de seiches longitudinais e transversais que são determinadas pela forma e dimensões das bacias (Rosauero, 1986).

As causas das seiches, todas elas associadas a seiches observadas, podem ser as seguintes (Wilson (1972) *apud* Rosauero, 1986):

1. Passagem de uma pequena flutuação barométrica de período aproximadamente igual ao período natural da bacia;
2. Mudança rápida de pressão atmosférica devida à passagem de uma rajada de vento;
3. Impactos de rajadas de vento na superfície da água, associados com variações da velocidade do vento e pressão;
4. Liberação de um desnível de superfície pela cessação súbita de vento;
5. Chuva forte, neve, ou chuva de pedra sobre uma porção do lago;

6. Desnívelamento do leito do lago resultante de oscilações sísmicas da terra durante grandes terremotos.

Rosauro (1986) salienta que os itens 1 e 4 são os mais importantes e que as outras causas são muito infreqüentes, caso do item 6, ou muito teóricas, caso do item 5.

Para a lagoa Itapeva que não tem uma grande área de espelho d'água é pouco provável que flutuações barométricas ocorram em parte da lagoa, causando uma seiche. Portanto, apenas o item 4 seria um item apreciado e os itens 2 e 3 poderiam ser também causas, porém de difícil constatação em função da não medição ou da dificuldade em se avaliar a variação de pressão.

O período da onda de oscilação em uma bacia retangular de comprimento L e profundidade uniforme h é dado por (Hutchinson (1957) *apud* Rosauro, 1986):

$$T_n = \frac{1}{n} \frac{2L}{\sqrt{g.h}}$$

onde:

T – período da seiche;

n – número de nós da seiche;

g – força de aceleração da gravidade (9,81m/s²).

Na lagoa Itapeva as seiches normalmente devem durar intervalos de tempo superiores a 120 minutos para serem significativas, assim pode-se estimar o comprimento da lagoa (fetch) na direção da seiche, a velocidade média do vento e o tempo que o vento necessita para percorrer esta distância. Este tempo seria o tempo mínimo para a ocorrência da seiche, ou seja, para o vento percorrer o fetch.

3.2.4 TURBIDEZ E SÓLIDOS SUSPENSOS

Os sólidos suspensos constituem uma variável de característica física da água decorrente da presença de substâncias em suspensão, ou seja, de sólidos suspensos finamente divididos ou em estado coloidal, e de organismos microscópicos. Podem ser usados também como uma medida de redução da transparência.

As partículas de sólidos suspensos correspondem às partículas $>1 \mu\text{m}$ ($> 0,001 \text{ mm}$), os coloidais variam de $1 \mu\text{m}$ a $0,001 \mu\text{m}$; enquanto que os sólidos dissolvidos são os menores que $0,001 \mu\text{m}$.

Uma propriedade fortemente seletiva do lago Neusiedlersee, Áustria/Hungria é a alta turbidez causada, principalmente por partículas inorgânicas que ressuspendem muito facilmente e sedimentam muito vagarosamente. Esta turbidez tem forte implicação para a luz subaquática ambiental que varia grandemente no tempo e espaço. Limitação de luz é, portanto, uma característica comum do lago (Dokulil & Padisák, 1994). Cardoso (2001) constatou também que para a lagoa Itapeva a turbidez que geralmente foi elevada, afetou a quantidade de luz incidente na coluna de água e fez com que grande parte da produção primária ficasse restringida às camadas superiores.

Quando a ressuspensão do sedimento ou carga drenada pela bacia aumenta significativamente a turbidez inorgânica (não-algal), não são atingidos potenciais de atenuação luminosa para uma alta produção. A energia disponível para o crescimento fitoplanctônico é fortemente regulada pela disponibilidade de luz subaquática, a qual depende da profundidade de mistura crítica, intensidades de flutuação luminosa e padrões de circulação algal. Taxas de produção mais elevadas em águas rasas são frequentemente compensadas por uma grande respiração algal, devido a temperaturas da água mais altas quando comparadas a lagos mais profundos. Altas concentrações de turbidez abiogênica podem limitar a luminosidade para a fotossíntese fitoplanctônica e, portanto, restringir o desenvolvimento da biomassa (Dokulil, 1994).

A mistura vertical e/ou os sólidos suspensos afetam significativamente a fotossíntese fitoplanctônica e a produtividade em ambientes aquáticos. Certos fatores que influenciam a produtividade do fitoplâncton são acentuados em águas turvas. Embora exista turbidez, sistemas de água doce bem misturados podem ter um potencial para alta produção, mas isto será irreal se a turbidez inorgânica (não-algal), através da ressuspensão do sedimento ou carga drenada pela bacia, aumentar significativamente a atenuação luminosa. Esta turbidez aumenta a proporção da zona de mistura da profundidade eufótica (Dokulil, 1994).

Além disso, a taxa de circulação fitoplanctônica através do gradiente luminoso e intensidades luminosas flutuantes podem aumentar a eficiência fotossintética. Grandes

aumentos na eficiência fotossintética com flutuações luminosas foram encontrados sob luz vermelha, a qual usualmente tem atenuação mais baixa em águas doces turvas. Contudo, a produção total integral diária de ambientes turbulentos e turvos pode ser um prognóstico de uma combinação de variáveis facilmente medidas, tais como, taxas fotossintéticas máximas, biomassa algal, irradiação superficial e alguma medida de atenuação luminosa subaquática. Tais sistemas turvos freqüentemente têm um alto potencial de status trófico devido à alta disponibilidade de nutrientes, mas sua capacidade de carregá-los não é atingida por causa da forte limitação luminosa (Dokulil, 1994).

A dinâmica do fitoplâncton é regulada por ciclos bio-geoquímicos de materiais suspensos em lagos, além do fato que a coluna d'água pode em muitos casos interagir prontamente com a camada superficial do sedimento, especialmente em lagos rasos que são suscetíveis a mudanças nos campos de luz devido a misturas de fundo. Nesses sistemas globalmente comuns, eventos de mistura podem produzir grandes aumentos na produção fitoplanctônica e mudanças na composição da comunidade. Contudo, não é claro se mudanças na biomassa fitoplanctônica estão associadas com pulsos de liberação de nutrientes do sedimento nas camadas superiores da água, durante eventos de ressuspensão, ou com inoculação direta de algas no fundo do lago (Carrick et al., 1993).

No estudo dos sedimentos em lagoas, principalmente no que se refere ao processo erosão-transporte-acumulação (ETA) da dinâmica do fundo das lagoas, há indicativo de que ele é afetado direta ou indiretamente por inúmeros processos climatológicos, geográficos, hidrológicos, sedimentológicos e morfológicos, tais como: freqüência, velocidade e duração dos ventos para cada direção, flutuações do nível da água, correntologia, fetch, nível da água, taxa de granulometria dos sedimentos, compressão do sedimento, rugosidade do fundo da lagoa, entre outros (Hakanson, 1976).

Segundo Hakanson (1976), e outros estudos preliminares publicados por "Beach Erosion Board" (US Army Corps of Engineers, 1984), e "Coastal Engineering Research Center" (US Army Corps of Engineers, 1984) evidenciam que o parâmetro que tem um impacto mais direto com as dinâmicas de fundo é o comprimento da onda, o qual controla a profundidade que a onda irá exercer uma influência efetiva. O comprimento da onda depende primeiramente do fetch efetivo, da velocidade do vento e de sua duração. O efeito dos diferentes comprimentos da onda no sedimento de fundo irá depender do nível de água.

Este estudo é importante, pois demonstra que o comprimento de onda, calculado a partir do fetch efetivo teve resultados coerentes com os dados coletados em campo (Hakanson, 1976).

Em lagoas rasas o atrito gerado no fundo, associados às correntes horizontais é, em geral, muito pequeno para influenciar a concentração de sólidos suspensos (Luettich et. All (1990) *apud* Bailey et al., 1996). Contudo, esta circulação horizontal pode ter grande importância para a ressuspensão de sólidos em função do efeito da onda (Bailey et al., 1996).

Segundo Hakanson et al. (2000), as partículas sólidas suspensas (PSS) têm papel fundamental em sistemas aquáticos. A fração de qualquer substância que esteja na fase dissolvida e a fração que esteja na fase sólida é diretamente relacionada com a concentração de partículas sólidas suspensas na água (Hakanson (1999) *apud* Hakanson et al., 2000). As PSS na coluna de água são também componentes metabolicamente ativas do ecossistema aquático. A quantidade de carbono contida nas PSS é crucial para níveis tróficos baixos como suprimento de energia para as bactérias, fitoplâncton e zooplâncton (Wetzel (1983); Jørgensen and Johnsen (1989) *apud* Hakanson et al., 2000). As PSS são importantes também em níveis tróficos altos, combinando comunidades bióticas e substratos, onde influenciam várias propriedades tróficas-metabólicas (Khailov (1974); Ostapenia (1989) *apud* Hakanson et al., 2000). Finalmente, as PSS estão diretamente relacionadas com diversas variáveis de uso geral na gestão de lagoas como indicadores de limpidez da água : profundidade Secchi e transparência da água. Estas variáveis refletem processos reguladores da produção primária, que por sua vez regula a produção secundária (ex.: produção de peixes). Portanto, os efeitos das PSS nos processos de reciclagem da matéria orgânica e de grande quantidade de nutrientes e poluentes determinam a significância ecológica das PSS em qualquer ambiente aquático.

Entender os mecanismos físicos que controlam a distribuição de partículas suspensas em lagoas diz respeito tanto à teoria quanto à prática, sendo que os processos físicos dão forma final aos ecossistemas aquáticos (Hakanson e Peters (1995) *apud* Hakanson et al., 2000). Processo físico desde circulação de larga escala até turbulências em pequena escala geralmente determinam a distribuição espacial de componentes químicos e biológicos em um determinado ecossistema aquático (Reynolds (1978) *apud* Hakanson et al., 2000).

O significado da existência da seiche para a ressuspensão de sedimentos de fundo foi determinado para lagoas de profundidade moderada (Chambers and Eadie (1981); Gloor et al. (1994); Weyhenmeyer (1996) *apud* Hakanson et al., 2000). Para o lago Kinneret, em Israel, lago relativamente profundo, as seiches internas aparentemente causam a ressuspensão de material de fundo para algumas áreas (Ostrovsky et al. (1996) *apud* Hakanson et al., 2000). Portanto, pode-se esperar que a heterogeneidade espacial em processos bioquímicos e sedimentológicos podem estar vinculadas com a turbulência gerada pelo clima nos lagos (Hakanson et al., 2000).

A partir disto, é evidente que PSS em lagoas podem vir de várias fontes e que há problemas de escala cruciais para todo o tipo de processos e mecanismos reguladores das PSS em lagoas (Hakanson et al., 2000).

Fluxo de sedimentos e ressuspensão de sedimentos são parâmetros importantes com respeito aos estudos de balanço de massa e transporte de substratos. Estes parâmetros para ambientes de águas doces foram avaliados (Eadie et al. (1984); Rosa (1985) *apud* Hansen et al., 1997).

Sedimentos podem ser ressuspensos ou por ventos que induzem ondas na superfície (Lesht et al. (1980); Aalderlink et al. (1984); Sanford (1994) *apud* Hansen et al., 1997), ondas internas (Cachione & Southard (1974) *apud* Hansen et al., 1997) e correntes (Kenney (1985); Sanford et al. (1991) *apud* Hansen et al., 1997).

Em ambientes de águas rasas, a ressuspensão de partículas pode induzir grandes efeitos ecológicos, e sobre certas condições de fetch, velocidade do vento, batimetria e rugosidade de fundo, esta ressuspensão é ocasionada pelo vento que gera ondas sobre a superfície destes ambientes (Arfi et al., 1993). Apenas ventos acima de 3 m/s causariam ressuspensão de partículas (Arfi et al., 1993).

Segundo Arfi et al. (1993), o efeito das ondas é um dos fatores principais que controlam a distribuição temporal e espacial de partículas em ambientes de águas rasas, como: regiões costeiras, estuários e lagoas (Van der Loeff (1981); Caper & Bachman (1984); Gabrielson & Lukatelich (1985); Monismith (1985); Bengtsson et al. (1985); Floderus & Pihl (1990); Luettich et al. (1990) *apud* Arfi et al., 1993). Em ecossistemas de águas rasas as ondas induziram controle sobre a produtividade planctônica através da turbulência (Bruton (1985);

Gabrielson & Lukatelich (1985); Wainright (1987); Frechette et al. (1988); Hellström (1991) *apud* Arfi et al., 1993); através do enriquecimento da coluna de água essencialmente por nutrientes originados dos sedimentos (Walker & O' Donnell (1981); Fanning et al.(1982); Wolaver et al. (1984); Ullman & Sandstrom (1987); Simon (1989) *apud* Arfi et al., 1993). Outra grande consequência ecológica da ressuspensão de partículas é a potencialidade do crescimento planctônico, em função das células serem periodicamente carregadas para a zona eufótica (Dokulil (1984); Garcia-Soto et al. (1990) *apud* Arfi et al., 1993). Em contrapartida, a ressuspensão pode reduzir o crescimento das algas pela atenuação da luz devido o aumento da turbidez (Arfi et al., 1993). Outros autores demonstraram várias consequências ecológicas provenientes de eventos de chuva, em ambientes que não eram muito afetadas por correntes (Fanning et al. (1982); Hopkinson (1987); Luettich et al. (1990) *apud* Arfi et al., 1993).

Schoellhamer (1996) cita outros trabalhos sobre a ressuspensão de sedimentos, são eles: ressuspensão de sedimentos pelas correntes marítimas o qual tem sido observado em vários estuários (Roman & Tenore (1978); Lavelle et al. (1984); Cloern et al. (1989); Hamblin (1989) *apud* Schoellhamer, 1996); ressuspensão de sedimentos de fundo por ondas geradas pelos ventos para águas com profundidades de 10 metros em Long Island Sound, EUA (Lavelle et al. (1978) *apud* Schoellhamer, 1996); em profundidades inferiores a 2 metros na baía Chesapeake, EUA (Ward et al. (1984) *apud* Schoellhamer, 1996); profundidades de 4 a 10 metros na baía Start, Inglaterra (Davies (1985) *apud* Schoellhamer, 1996); profundidades de 2 metros no estuário de Ho Bugt, Dinamarca (Perjup (1986) *apud* Schoellhamer, 1996), e; profundidades de 1,5 a 4 metros na baía de Old Tampa, EUA (Schoellhamer, 1995).

No delta de *Ebro*, na Espanha, foi analisada a ressuspensão de sedimentos para eventos de início de tempestade e foram associadas a ressuspensão de partículas ao aumento da atividade das ondas (Guillén et al., 2002).

No lago Carl Blackwell, EUA, a turbidez teve uma alta correlação com a velocidade de vento de dois dias antes da amostragem, e teve o maior valor de significância a relação inversa da turbidez com a profundidade média, considerada como a média de um círculo de 750 metros de raio (Howick et al., 1985)

A turbidez afeta as condições físicas, químicas e biológicas de lagoas variando a temperatura (Schiebe et al. (1975) *apud* Howick et al.,1985); a penetração da luz (Grobbelaar e P. Stegmann (1976); Walmsley et al. (1978) *apud* Howick et al.,1985); a concentração de

nutrientes dissolvidos, metais pesados e contaminantes orgânicos (Green et al. (1978); De Groot et al. (1977); Armstrong (1972) *apud* Howick et al.,1985); a biomassa e a produtividade do fitoplâncton (Hergenrader e Hammer (1973); Schwartzkopf e G.L. Hergenrader (1978) *apud* Howick et al.,1985).

Através do cálculo do fetch efetivo para as direções de vento predominantes na lagoa Itapeva e do cálculo da altura da onda produzida por este vento, pode-se avaliar o efeito dessa onda quando relacionada à dinâmica de fundo (ver Tabela 3.1). Na lagoa Itapeva, a menor onda já era capaz de ressuspender até a areia grossa, e inclusive seres vivos bentônicos pertencentes a esta classe de tamanho (Cardoso, 2001).

Tabela 3.1 Relação entre a altura de onda produzida e a dinâmica de fundo, em função da profundidade média entre os pontos de amostragem (1,5m) na lagoa Itapeva (Cardoso, 2001)

Onda	Tamanho das partículas
0,2	$\leq 0,5$ mm
0,3	≤ 1 mm
0,4	≤ 2 mm
0,6	≤ 4 mm
0,8	≤ 8 mm
1,0	≤ 20 mm
$\geq 1,8$	Breakers (ondas grandes)

O *fetch* efetivo (L_f) e a estimativa da altura da onda foram calculados para cada ponto de amostragem da lagoa Itapeva, conforme Tabela 3.2.

Foi através da altura da onda produzida (efeito fetch), mecanismo desencadeador da hidrodinâmica, que se evidenciou o efeito desta, na ressuspensão do material de fundo (Cardoso, 2001).

As concentrações de sólidos totais nas campanhas seguiram o mesmo comportamento sazonal evidenciado pela turbidez, ou seja, máximas nos invernos e mínimas no verão (Cardoso, 2001).

Tabela 3.2 Fetch efetivo para cada direção de vento predominante sazonalmente e a estimativa da altura de onda produzida (Cardoso, 2001)

Pontos	Lf (km)	Dir	Campanha	Vmed (m/s)	Vmax (m/s)	Altura da onda (m)	
						Vmed	Vmax
Sul	14	OSO				0.4 - 0.5	1.2 - 1.8
Sul	19.8	SO				0.5 - 0.65	1.4 - 2.2
Centro	5.7	OSO	mai/99	5.0 - 7.6	14.8 - 22.2	0.3 - 0.4	0.8 - 1.2
Centro	8.6	SO				0.4 - 0.45	0.9 - 1.4
Norte	19.6	SO				0.5 - 0.65	1.4 - 2.2
Sul	14	OSO				0.4 - 0.6	0.7 - 1.2
Sul	19.8	SO				0.55 - 0.8	0.9 - 1.5
Centro	5.7	OSO	ago/99	5.8 - 8.4	9.9 - 15.9	0.3 - 0.4	0.45 - 0.8
Centro	8.6	SO				0.4 - 0.6	0.65 - 1.05
Norte	19.6	SO				0.55 - 0.8	0.9 - 1.5
Norte	7.9	NNE				0.4	0.45 - 0.7
Norte	9.3	NE				0.4	0.45 - 0.7
Norte	10.8	ENE				0.4 - 0.45	0.5 - 0.75
Centro	10.6	NNE	mar/99	5.2 - 7.1	8.0 - 11.2	0.4 - 0.45	0.5 - 0.75
Centro	14.1	NE				0.4 - 0.5	0.5 - 0.85
Centro	15.6	ENE				0.4 - 0.5	0.5 - 0.85
Norte	12.4	NE				0.4 - 0.5	0.5 - 0.85
Norte	7.9	NNE				0.4 - 0.6	0.65 - 1.05
Norte	9.3	NE				0.4 - 0.6	0.65 - 1.05
Norte	10.8	ENE				0.4 - 0.5	0.65 - 1.1
Centro	10.6	NNE	ago/99	5.8 - 8.4	9.9 - 15.9	0.4 - 0.5	0.65 - 1.1
Centro	14.1	NE				0.4 - 0.6	0.7 - 1.2
Centro	15.6	ENE				0.4 - 0.6	0.7 - 1.2
Norte	12.4	NE				0.45 - 0.55	0.7 - 1.05

3.2.5 JUSTIFICATIVA

A compreensão exata do funcionamento de um ecossistema é o primeiro passo para o seu gerenciamento. Além disso, é de suma importância conhecer os potenciais inerentes ao mesmo, realizar uma avaliação da disponibilidade hídrica e estabelecer os usos a que serão destinados. Grande parte das reservas de água do planeta está sendo pesquisada com vistas ao consumo humano. Na última década a preocupação com a qualidade da água tem recebido especial destaque nos principais eventos científicos relacionados a questões ambientais. Um destes estudos foi feito pela ECOPLAN (1997) para o uso das lagoas para o abastecimento.

A importância do conhecimento da biodiversidade em um ecossistema é uma ferramenta básica para qualquer estudo ambiental. Esta possibilita interpretação do estado funcional do mesmo, indicando a importância ecológica das espécies em questão para a cadeia trófica. Em ecossistemas aquáticos onde os principais usos sejam recreação, pesca e/ou coleta de água para abastecimento público, é de suma importância o conhecimento da comunidade fitoplanctônica. Muitas algas têm especial interesse para a rede de abastecimento

público, tanto pelo tamanho de seus filamentos (que podem entupir o sistema) quanto pela toxicidade que algumas espécies desenvolvem. Muitas vezes o efeito da toxina pode ser cumulativo, atingindo populações que apenas alimentam-se dos peixes pescados neste ambiente, sem sequer ter ingerido a água ou se banhado na mesma (Cardoso, 1999).

Em estudos de ecologia muita atenção é dada para a relação entre fatores químicos e biológicos. Os fatores físicos parecem que são meros descritores do cenário. Entretanto, a importância de fatores físicos, como o vento, é determinante na dinâmica das comunidades planctônicas em lagoas rasas. Portanto, é indispensável que estudos que visam contemplar a junção entre estes fatores hidrodinâmicos do meio e os fatores bióticos sejam monitorados com uma frequência amostral que reflita a realidade deste ecossistema aquático. Desta forma, é mais satisfatório realizar amostragens sazonais por períodos de tempo mais longo (diversas horas do dia e dias consecutivos), buscando observar o tempo que o ambiente leva para responder a uma dada ação, do que simplesmente realizar amostras pontuais e mensais. Desta forma, fica nítida a importância de estudos de hidrodinâmica e seus efeitos potenciais em comunidades planctônicas como uma ferramenta de gestão ambiental em ecossistemas aquáticos (Cardoso, 1999).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Em linhas gerais, para o atendimento dos objetivos foram definidos os seguintes passos:

- Adaptação de um programa pré-existente de um modelo hidrodinâmico bidimensional horizontal à morfologia da lagoa e aos dados;
- Definição de um método adequado, envolvendo modelagem chuva-vazão e balanço hídrico para simulação dos aportes fluviais das bacias laterais;
- Formatação e consistência de dados físicos, hidrológicos, meteorológicos e ambientais;
- Desenvolvimento de rotinas computacionais específicas para melhor rodar os modelos e extrair suas informações numéricas e gráficas;
- Uso de modelo estatístico de correlação para analisar as variáveis hidrodinâmicas e ambientais.

Em síntese, buscou-se simular o regime hidrodinâmico (níveis e velocidades no plano horizontal) da lagoa Itapeva com base nas contribuições de vazão lateral e no efeito do vento. Depois, procurou-se correlacionar estes resultados com turbidez e sólidos suspensos.

Aspectos específicos destas atividades estão nos itens seguintes, sendo o de “Área de Estudo e Dados Disponíveis” equivalente aos “Materiais”, enquanto que os demais itens correspondem aos “Métodos”.

4.1 *ÁREA DE ESTUDO E DADOS DISPONÍVEIS*

Para melhor caracterizar a área de estudo e por conseguinte a modelagem falar-se-á sobre as seguintes características da área de estudo: localização, climatologia, geologia, geomorfologia, hidrogeologia, entre outros.

4.1.1 LOCALIZAÇÃO

A lagoa em estudo situa-se na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul (ver Figura 4.1), faz parte de um sistema que é composto por uma seqüência de lagoas paralelas à linha oceânica e interligadas entre si, embora ocorram pequenas lagoas isoladas. Estas interligações são em geral canais e rios naturais, em alguns casos canais artificiais e em alguns cursos de água houve retificação do traçado, com destaque para o rio Tramandaí.

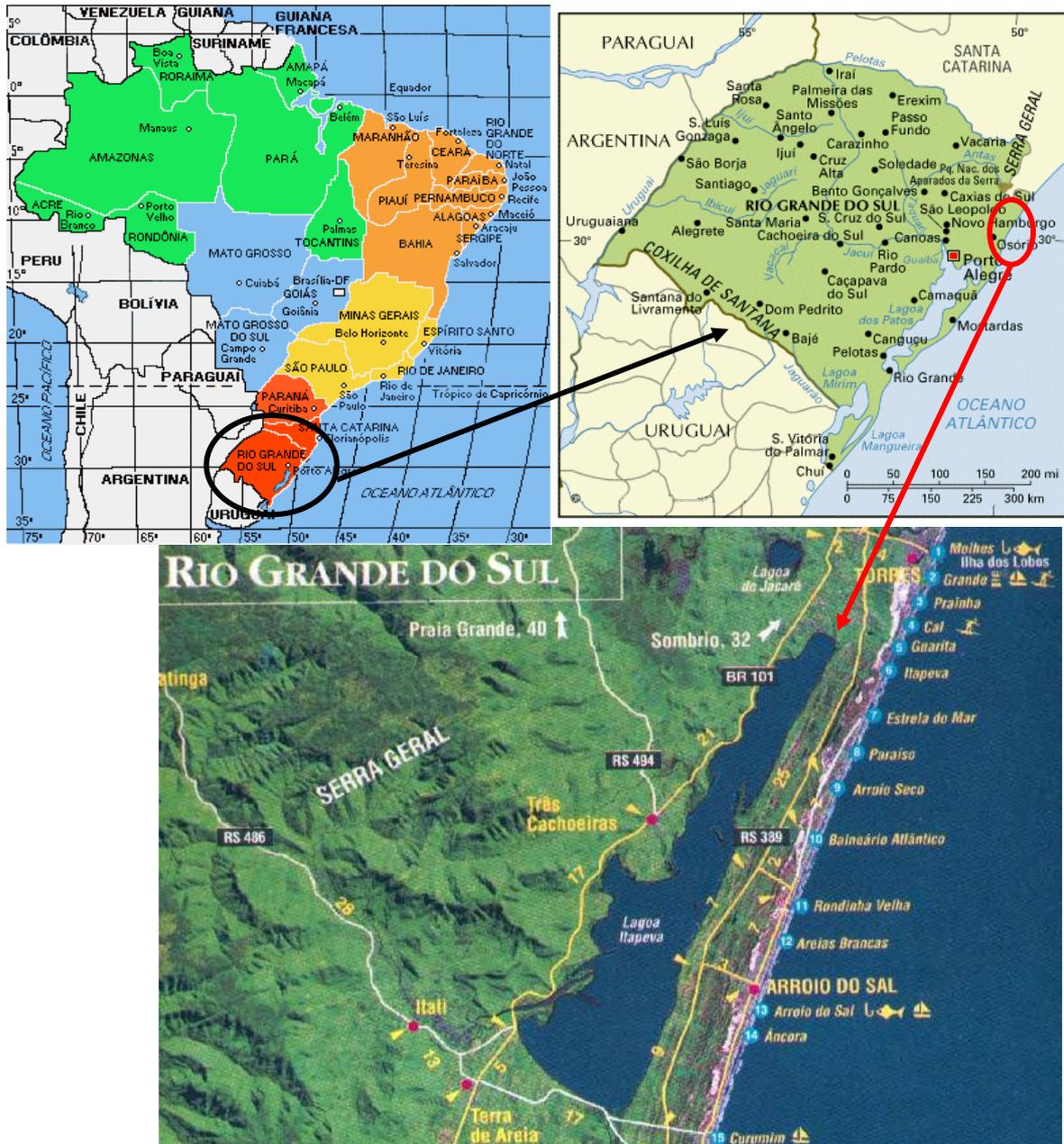


Figura 4.1 Mapa de localização (Fonte: Guia Quatro Rodas 2001)

Este sistema apresenta dois subsistemas: o norte, compreendido entre a lagoa de Itapeva e a lagoa de Tramandaí (ver Figura 4.2); e o sul, compreendido entre a lagoa da

Cerquinha e a lagoa de Tramandaí. A lagoa de Tramandaí interliga-se com o Oceano Atlântico através da barra do rio Tramandaí (ECOPLAN, 1997).

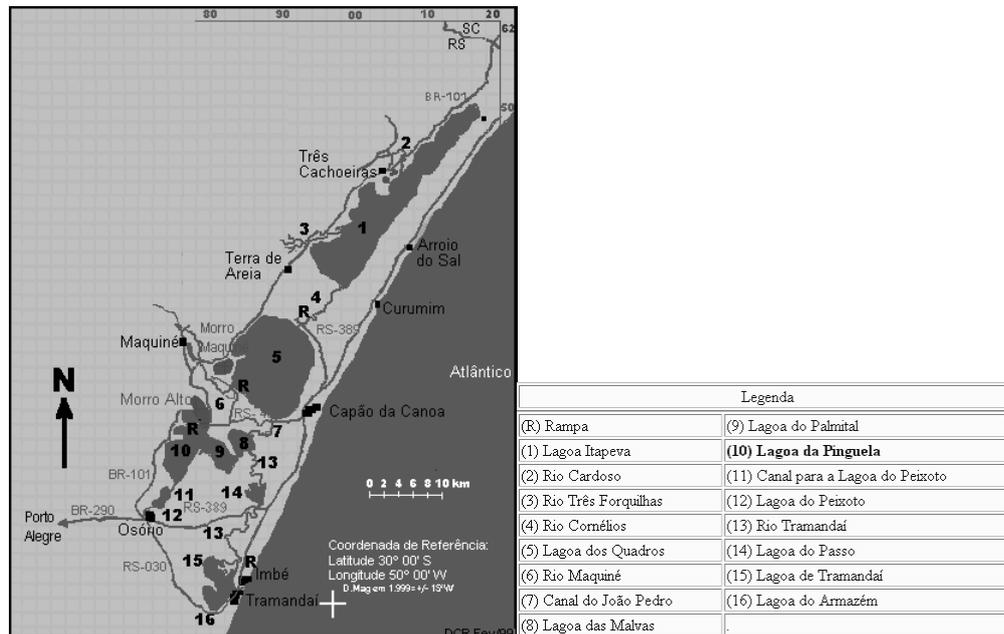


Figura 4.2 Subsistema Norte do sistema costeiro do litoral do Rio Grande do Sul

O subsistema norte inicia-se na lagoa de Itapeva e seus principais tributários são o rio Três Forquilhas e o rio Cardoso. A lagoa de Itapeva deságua na lagoa dos Quadros através do canal Cornélios. Este subsistema consiste na principal rede hídrica do litoral norte, sendo responsável por 87% da área do complexo lagunar da planície costeira que têm 2540 km². A lagoa de Itapeva tem uma área alagada de aproximadamente 124 km².

A lagoa de Itapeva se localiza em quatro municípios: Torres, Dom Pedro de Alcântara, Arroio do Sal, Três Cachoeiras (ver Figura 4.3).



Figura 4.3 Localização da lagoa Itapeva em relação aos municípios de Torres, São Pedro de Alcântara, Arroio do Sal e Três Cachoeiras.

A lagoa Itapeva tem formato alongado, com extensão no sentido do eixo maior (SO-NE) de 32 km, enquanto a largura média se aproxima de 2,5 km na porção NE e 5,5 km na porção SO.

O principal contribuinte do subsistema norte é o rio Três Forquilhas com área de drenagem de 524 km². Este têm sua nascente na Serra Geral, em altitudes superiores a 900 m e foz na planície costeira junto ao sistema lagunar (ver Figura 4.4).

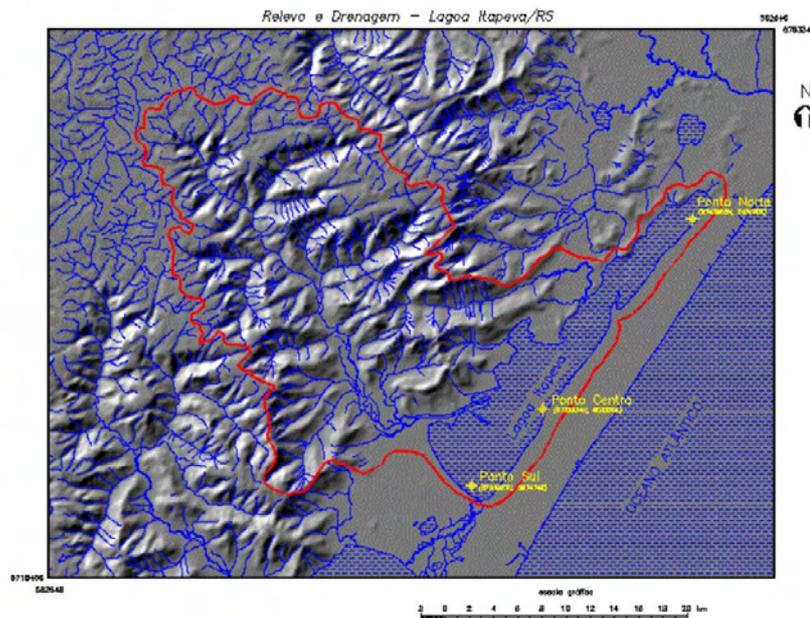


Figura 4.4 Mapa da bacia de drenagem e pontos de amostragem

4.1.2 CLIMATOLOGIA

A lagoa Itapeva pelas suas características hidrológicas regionais faz parte do complexo lagunar da planície costeira (Schwarzbald & Schäfer, 1984).

A ação dos ventos na região é muito importante, pois seus efeitos são sentidos em toda a planície (Schwarzbald & Schäfer, 1984). O sistema eólico é de enorme importância no contexto ambiental, e é controlado por um regime de ventos de alta energia e baixa variabilidade direcional (Medeiros, 1992). A direção predominante do vento na região costeira do RS é do quadrante nordeste (Schwarzbald & Schäfer, 1984; Medeiros (1992) *apud* Cardoso, 2001). Dados sobre velocidade e frequência de atuação de ventos na região costeira do Estado constam em Jost & Soliani Jr (1976) *apud* Cardoso (2001) e Godolphim (1976) *apud* Cardoso (2001).

Pela ação do vento de direção predominante NE, associado à direção de formação das barreiras arenosas múltiplas que originaram todo sistema lagunar costeiro, as lagoas apresentam um gradiente morfológico que vai desde as lagoas mais profundas isoladas, assimétricas, até as rasas, simétricas, de áreas de banhados (Schwarzbold & Schäfer, 1984).

As planícies litorâneas do Brasil Meridional são dominadas por uma variedade do clima subtropical, correspondente ao clima *Cfa*, da classificação de Koeppen (Moreno, 1961). As características de um clima *Cfa*, são: clima temperado chuvoso, com chuvas distribuídas regularmente ao longo de todo o ano e temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e a do mês mais frio superior a -3 °C. As isoietas médias anuais estão na Figura 4.5.

Com relação à variação da temperatura no litoral norte do Rio Grande do Sul, ela está na dependência da movimentação das massas de ar e da maritimidade. Na maior parte do ano predomina a massa tropical atlântica; durante o inverno tem-se a alternância no decorrer dos anos entre a massa polar atlântica e a massa tropical. Quando ambas ocorrem têm-se bruscas variações de temperatura. Durante o verão pode entrar a massa equatorial continental, enquanto que a maritimidade têm papel regulador da temperatura, diminuindo os contrastes térmicos. Em estudos feitos foi registrada a intrusão salina até no máximo à lagoa dos Quadros (ECOPLAN, 1997).

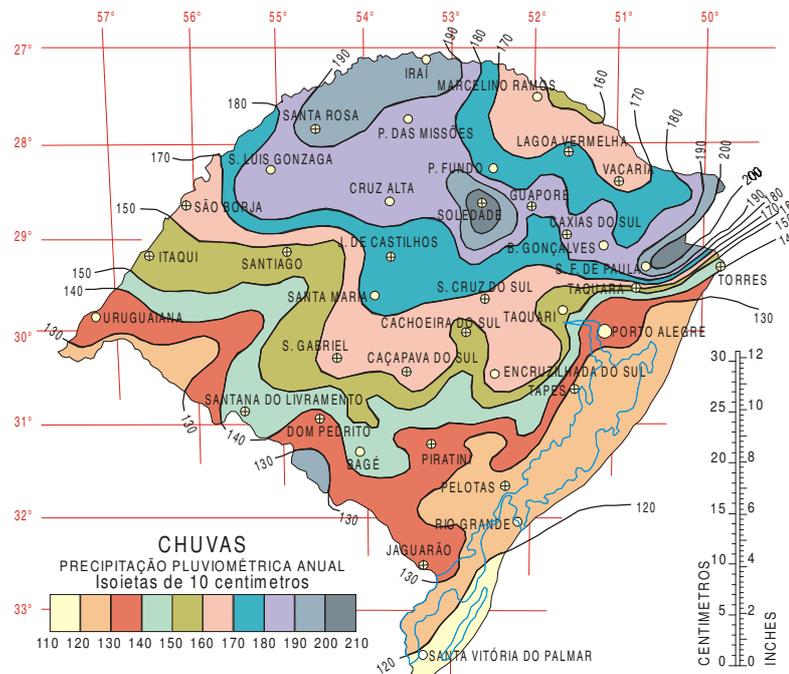


Figura 4.5 Precipitação pluviométrica anual no estado do RS (Moreno, 1961)

4.1.3 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

Para a área em estudo (bacias do rios afluentes e a planície onde se encontra a lagoa Itapeva) podem ser agrupadas em três grandes domínios (ECOPLAN, 1997):

- **Domínio das Rochas Vulcânicas:** Posicionada na porção oeste da região, provoca uma geomorfologia caracterizada por um relevo muito acidentado, freqüentemente escarpado, correspondendo aos divisores de bacias hidrográficas.

O limite oeste é dominado por rochas vulcânicas efusivas predominantemente basálticas. Pode-se dividi-las em dois tipos em função dos eventos vulcânicos: o centro dos derrames, onde o esfriamento foi mais lento resultando material de origem menos intemperizável; e os patamares topográficos, onde o esfriamento foi muito rápido, originando solos mais profundos e podem ocorrer fraturas de esfriamento nas rochas. Estes são os lugares mais propícios para o aparecimento do escoamento superficial.

Todos os cursos de água que desembocam na planície costeira têm suas nascentes inseridas neste domínio.

- **Domínio do Arenito Botucatu:** Por baixo das rochas vulcânicas ocorrem arenitos finos homogêneos, ocupando a base do relevo montanhoso, na transição para a planície costeira.

Na maioria das ocorrências elas aparecem cobertas por sedimentação costeira mais recente. Em função de sua composição, 90% de quartzo, resulta em solos arenosos permeáveis com pequena capacidade de retenção de água na zona não saturada.

A grande permeabilidade intergranular do Arenito Botucatu o caracteriza como importante aquífero de dimensões regionais e provoca um comportamento diferenciado nos cursos de água, cujas nascentes ocorrem em rochas basálticas, ocorrendo significativas alterações do leito, e constituem áreas de recarga do aquífero.

- **Domínio dos Sedimentos Costeiros:** Define um relevo plano a suavemente ondulado, incluindo diversas lagoas e alguns cursos de água. Constitui superfície de elevada permeabilidade, facilitando a recarga de aquíferos

livres, e formam basicamente dois tipos de formação: terraços marinhos e lagunares.

Os terraços marinhos essencialmente arenosos incluem horizontes de conchas calcárias que influenciam na composição química da água subterrânea, definindo incidências de carbonato de cálcio; enquanto que os terraços lagunares costeiros arenosos freqüentemente estão sobrepostos aos marinhos, dos quais estão separados por camadas e horizontes argilosos de espessura variável.

A lagoa Itapeva pertence ao domínio dos sedimentos costeiros, cuja superfície tem elevada permeabilidade, o que facilita a recarga dos aquíferos livres. O sedimento é essencialmente arenoso e inclui horizontes de conchas calcárias.

4.1.4 HIDROGEOLOGIA

Apesar dos levantamentos e estudos desenvolvidos pela CPRM, FEPAM, UFRGS não foi possível caracterizar de forma adequada a distribuição dos recursos hídricos subterrâneos do litoral Norte do Rio Grande do Sul (ECOPLAN, 1997).

Através da análise dos piezômetros foi constatado que o comportamento do freático em diferentes épocas do ano forma um domo de água, onde o divisor de águas encontra-se próximo à Estrada do Mar. O divisor de águas marca a divisão entre os escoamentos em direção ao mar e em direção à lagoa. A partir dos dados obtidos nos piezômetros, colocados ao sul da lagoa Itapeva, entre ela e a cidade de Curumim foi possível estimar a contribuição de água subterrânea para a lagoa, os dados revelam a presença do aquífero livre até profundidades em torno de 22 metros (ECOPLAN, 1997).

No estudo desenvolvido foi estudada apenas a parte leste da lagoa, entre o mar e a lagoa. No lado oeste predomina rochas vulcânicas e pode-se considerar que a recarga do lado esquerdo é de aproximadamente 80% daquele da margem direita. As fronteiras norte e sul foram consideradas impermeáveis, pois o fluxo ocorre preferencialmente na sentido leste-oeste para a faixa compreendida entre a Estrada do Mar e a lagoa, e no sentido oeste-leste entre a Estrada do Mar e o oceano (ECOPLAN, 1997).

Há a necessidade de se enfatizar que existe uma forte ligação entre as lagoas e o aquífero livre, o que estabelece relações de causa e efeito entre estes dois componentes.

4.1.5 DADOS COLETADOS

Os dados utilizados fazem parte do projeto denominado “*Comportamento hidrodinâmico da Lagoa Itapeva (Litoral Norte do RS) e seu efeito potencial sobre comunidades planctônicas*” conduzido pelo IPH.

Parte dos dados foi coletada em torres de observação implantadas nas lagoas. Utilizou-se um perfil de coleta de 72 horas em cada estação do ano. Foram realizadas cinco campanhas com duração de uma semana e ocorreram nos seguintes meses: ago/98; dez/98; mar/99; mai/99 e ago/99 (Cardoso, 2001).

As torres de coletas estavam situadas nos pontos indicados na Tabela 4.1 e Figura 4.6.

Tabela 4.1 Coordenadas dos pontos de coleta

Lagoa	Local	Coordenadas (UTM)
Norte	Sítio Costa da Lagoa	615690 E 6747815 N
Centro	Pousada da Lagoa/Hotel Recreio	603350 E 6732254 N
Sul	Condomínio Itapeva	597474 E 6725967 N

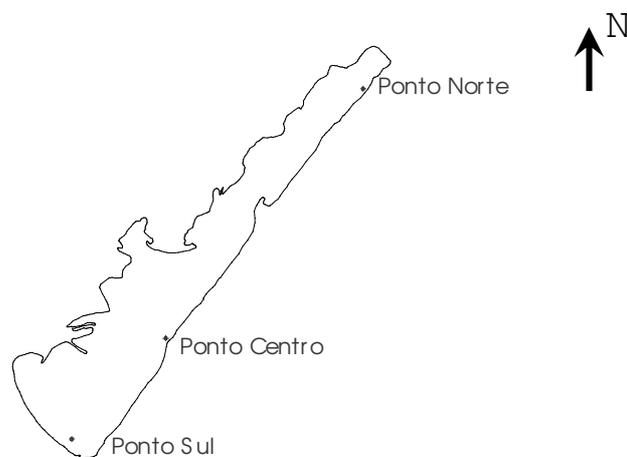


Figura 4.6 Localização das torres de coleta na lagoa Itapeva

Em cada torre foram instalados os seguintes instrumentos: linígrafo (A. OTT, com datalogger IPH), régua linimétrica, estação meteorológica (DAVIS, Weather Wizard III, Weather Link) e multiprobe YSI (Yellow Spring Instruments 6000 upg3).

As réguas linimétricas foram instaladas para aferição dos linígrafos. Estas réguas tiveram seus *zeros* nivelados com uma cota verdadeira obtida de um marco topográfico junto à lagoa.

Nestas torres (Figura 4.7) foram coletados dados hidrometeorológicos de nível d'água, temperatura do ar, precipitação, velocidade e direção do vento, turbidez. A frequência de amostragem foi de trinta minutos para os dados da estação meteorológica e de quinze minutos para o linígrafo no período que compreende o início de 1999 até o final do período estudado, enquanto que para os sólidos (totais, dissolvidos e suspensos) a frequência foi de quatro horas, nos seguintes horários: 6h, 10h, 14h 18h, durante cada campanha.



Figura 4.7 Torres de coleta

Além das torres, foi feita uma pesquisa em várias entidades a fim de conseguir outros dados necessários para o estudo. Na Tabela 4.2 têm-se as entidades visitadas e os dados requeridos de cada uma delas.

Com relação à curva-chave conseguida na CEEE para o Posto Itati, que corresponde ao rio Três Forquilhas, a mesma não pôde ser usada, em razão da construção de uma ponte próxima ao local de medição que modificou o controle, fazendo com que as leituras da régua não estivessem mais de acordo com a curva-chave feita. A curva-chave tem validade apenas até 1985.

Tabela 4.2 Dados requeridos

Entidades	Nome da Estação	Tipo	Dados requeridos	Período
INMET – 8° DISME	Torres	Diário	Temperatura, umidade relativa, precipitação, evaporação, radiação solar.	1986 a 1999
CEEE	Rio dos Carvalhos (RC)	Diário	Precipitação.	1960 a 1998
	Serra do Pinto (SP)	Diário	Precipitação.	1960 a 1998
	Itati	Diário	Altura linimétrica, curva chave.	1962 a 1998
DNAEE (atual ANA)	Maquiné	Diário	Descargas médias.	1981 a 1986
FEPAGRO	Osório	Diário	Temperatura, umidade relativa, precipitação. Evaporação.	1998 a 1999
	Taquari	Diário		1997 a 1999

Além destes dados coletados ao longo de um ano foram feitas também campanhas com o intuito de estudar a comunidade aquática da lagoa. Estes dados foram analisados por Cardoso (2001). São eles: pigmentos, fitoplâncton, zooplâncton, produção primária, nutrientes (nitrato e fosfato), sulfato, cloreto, fluoreto, pH, coliformes, potencial Redox, condutividade, temperatura, oxigênio dissolvido, turbidez, profundidade Secchi e os dados hidrometeorológicos.

4.2 SIMULAÇÃO CHUVA-VAZÃO E BALANÇO HÍDRICO

Para determinação das vazões afluentes e realização do balanço hídrico na lagoa Itapeva no período de interesse a metodologia básica definida foi a de uma abordagem convencional com simulações chuva-vazão. Conforme seus resultados haveria a alternativa de obtenção destas vazões por cálculo reverso do balanço hídrico apenas no corpo da lagoa.

Para a simulação chuva-vazão, em função da falta de dados confiáveis no rio Três Forquilhas, principal afluente da lagoa Itapeva, utilizou-se do método da transposição de parâmetros. O método da transposição é utilizado quando num local não existem dados de vazões, e numa bacia vizinha com características semelhantes há a disponibilidade destes

dados. A bacia vizinha utilizada foi a do rio Maquiné, contribuinte da lagoa dos Quadros, onde há postos de monitoramento hidrometeorológico e vazões observadas.

Com a caracterização do balanço hídrico, onde se consideram a precipitação, evapotranspiração, as vazões de entrada e saída e a contribuição subterrânea, pode-se analisar e verificar se os dados de entrada da simulação estão coerentes.

Através de um modelo de chuva-vazão previu-se estimar a vazão do rio Maquiné e através de proporcionalidade de áreas obter-se a vazão do rio Três Forquilhas. Para a avaliação da precipitação neste estudo foi utilizado o modelo IPH II que foi desenvolvido pelo IPH com o objetivo de permitir seu uso em bacias urbanas e rurais.

4.2.1 MODELO CHUVA-VAZÃO: IPH II

Os modelos servem para simular e estudar os comportamentos de determinados sistemas hidrológicos, como também reconstituir séries hidrológicas. Os modelos chuva-vazão procuram simular a vazão na seção principal a partir da precipitação e da evapotranspiração na bacia hidrográfica.

O modelo IPH II é simples, possui poucos parâmetros e é baseado em metodologias conhecidas. Esta versão é utilizada para bacias que não necessitem propagação no leito do rio ou que este efeito não seja importante para o processo, já que a propagação levada em conta no modelo se refere somente ao escoamento na superfície da bacia (Tucci, 1987).

O modelo representa os principais fenômenos do processo precipitação-vazão na bacia, isto é, perdas por interceptação (vegetação e depressões), evaporação, infiltração e escoamento superficial e subterrâneo. Permite o início da simulação sem grandes erros, após um período sem chuvas superior ao tempo de concentração da bacia (Tucci, 1987).

A desvantagem principal do modelo é o empirismo dos parâmetros, encontrado na maioria dos modelos hidrológicos (Tucci, 1987).

Utilizou-se o programa IPHiiSL para gerar as vazões e o procedimento utilizado está abaixo descrito.

Para a calibração do rio Maquiné utilizou-se de dois postos para o estudo: os postos de Maquiné e Taquari. Para ambas as calibrações foram utilizados os dados de precipitação de Ribeirão dos Carvalhos (RC) e de Serra do Pinto (SP) e vazões observadas do Rio Maquiné, diferindo apenas nos períodos utilizados em razão dos dados adquiridos em cada posto. Para o posto de Maquiné foram utilizados dados de 1993 a 1996; enquanto que para o de Taquari de 1981 a 1989.

No total foram 4 hipóteses para a calibração. São eles:

1. Precipitação: RC, evaporação: Maquiné e vazões observadas 93-96;
2. Precipitação: SP, evaporação: Maquiné e vazões observadas 93-96;
3. Precipitação: RC, evaporação: Taquari e vazões observadas 81-85;
4. Precipitação: SP, evaporação: Taquari e vazões observadas 81-85.

Após gerar as vazões e corrigi-las para a bacia do Rio Três Forquilhas a seqüência metodológica é a utilização do MOBALI (modelo de balanço hídrico) para gerar as vazões do Canal Cornélios (exutório da lagoa Itapeva).

4.2.2 MODELO DE BALANÇO HÍDRICO - MOBALI

O modelo nada mais é que o balanço entre o volume que chove, que evapora que entra e que sai da lagoa. Foi desenvolvido para efetuar a simulação do comportamento hidrológico de um sistema de lagoas interligadas no projeto da ECOPLAN em 1997.

O modelo foi desenvolvido para a identificação de períodos críticos para a disponibilidade hídrica do litoral norte do Rio Grande do Sul. Através da utilização de um modelo de balanço hídrico o objetivo era a simulação do comportamento hidrológico de um sistema de lagoas interligadas, incluindo a lagoa Itapeva.

O modelo utilizado representa o sistema como um conjunto de lagoas interligadas por canais. Cada lagoa pode receber água de sua bacia de contribuição ou de cursos de água, além da contribuição direta da precipitação sobre a área da lagoa.

Pelo modelo ter apresentado resultados satisfatórios na simulação feita pelo estudo da ECOPLAN (1997) propôs-se sua aplicação para a definição da vazão de saída da Lagoa Itapeva.

No modelo são adotadas algumas simplificações:

- Nas lagoas despreza-se o efeito do vento e o nível de água é tomado como horizontal;
- Uma ou mais bacias podem contribuir para uma lagoa;
- Os canais de interligação são tratados como trechos únicos, onde as diferenças de cota entre as lagoas representam a declividade da linha de água.

O sistema discretizado leva em conta cinco lagoas e cinco canais, que são: Lagoa Itapeva; canal Cornélios; lagoa dos Quadros; rio João Pedro; lagoas das Malvas, Palmital, Pinguela e Peixoto; rio dos Postes; lagoas do Passo, Lessa e Caiera; rio Tramandaí; lagoas de Tramandaí e Armazém; rio Tramandaí; e mar.

Os valores utilizados nas simulações da ECOPLAN foram mantidos os mesmos, com exceção dos dados referentes à lagoa Itapeva e à lagoa dos Quadros que influenciavam diretamente o estudo. Os dados de entrada do modelo encontram-se citados abaixo.

Para as lagoas:

- vazões de contribuição de cada bacia;
- precipitação;
- evaporação;
- demandas (irrigação, consumo de água, etc);
- curvas cota-área e cota-volume de cada lagoa.

Para os canais:

- áreas e raios hidráulicos das seções transversais;
- coeficiente de rugosidade de Manning.

As vazões de contribuição a cada lagoa foram calculadas utilizando as vazões calculadas para o rio Três Forquilhas, corrigidas proporcionalmente às áreas das respectivas bacias.

Para definir os dados de precipitação e evaporação foram estudadas 3 hipóteses, são elas:

1. Precipitação e evaporação (calculada pelo método de Penman) da lagoa Itapeva;
2. Precipitação e evaporação do posto Maquiné;
3. Precipitação do posto Maquiné e evaporação do posto Taquari.

Para verificar qual hipótese foi a melhor compararam-se os níveis médios gerados pelo modelo com os níveis médios reais da lagoa.

Para a primeira hipótese foi utilizado o método de Penman para calcular a evaporação na lagoa. Este método baseia-se no balanço de energia e nas características aerodinâmicas do processo, sendo que algumas das simplificações são: desprezar a variação da energia da massa de água e a entrada e saída de energia do volume de controle.

4.2.3 MÉTODO DE PENMAN – EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evaporação e a evapotranspiração ocorrem quando a água líquida é convertida para vapor de água e transferida, neste caso, para a atmosfera. O processo somente poderá ocorrer naturalmente se houver ingresso de energia no sistema, proveniente do sol, da atmosfera, ou de ambos e, será controlado pela taxa de energia, na forma de vapor de água que se propaga da superfície da Terra (Tucci et al., 1993).

O método de Penman se baseia no balanço de energia e nas características aerodinâmicas do processo. Este método possui algumas simplificações, tais como desprezar a variação de energia na massa de água e a entrada e saída de energia do volume de controle.

Para a aplicação deste método são necessários os seguintes dados:

- Temperatura média (°C);

- Umidade relativa do ar (%);
- Radiação solar (W/m^2);
- Número de horas de incidência solar real;
- Velocidade do vento a 2 metros de altura (km/dia).

A radiação solar foi calculada pela fórmula abaixo:

$$G = Rt.(\alpha + \beta.p)$$

onde:

G – radiação incidente de onda curta;

Rt – radiação no topo da atmosfera;

α, β – parâmetros que dependem do local;

p – proporção entre o número efetivo de horas de brilho solar e o máximo possível.

4.2.4 BALANÇO HÍDRICO INVERTIDO (MÉTODO ALTERNATIVO)

Em razão de inúmeras incertezas que poderiam ser geradas durante as diversas fases do procedimento anterior, preparou-se uma metodologia alternativa simplificada em que se obteria, através dos níveis reais da lagoa, as suas vazões de saída e de entrada.

Esta metodologia baseia na aplicação inversa do conhecido método de Puls.

O método de Puls usa como base a equação da continuidade, conforme equação abaixo. Considera também que a vazão de saída é apenas função do volume armazenado, levando em conta que a vazão de entrada é bastante pequena a ponto de poder ser desprezada.

$$I(t) - O(t) = \frac{dS(t)}{dt}$$

onde:

$I(t)$ – hidrograma de entrada no tempo t ;

$O(t)$ – hidrograma de saída no tempo t ;
 $dS(t)$ – volume armazenado no tempo t .

Discretizando a equação acima para uma duração Δt entre os intervalos de tempo i e $i+1$ e separando os termos obtêm-se a seguinte equação:

$$\frac{I_i + I_{i+1}}{2} - \frac{O_i}{2} + \frac{S_i}{\Delta t} = \frac{S_{i+1}}{\Delta t} + \frac{O_{i+1}}{2}$$

Para este intervalo são conhecidos:

- Hidrograma de entrada I_i, I_{i+1} ;
- Volume (S_i) no primeiro intervalo;
- Vazão de saída no primeiro intervalo ($O_i=0$).

Se for conhecida a lei que relaciona a vazão de saída e o volume armazenado é possível resolver esta equação.

No método invertido as vazões de saída são conhecidas e se deseja saber a vazão de entrada.

Para a estimativa da vazão de saída da lagoa (canal Cornélios) estipulou-se a hipótese de que num período de estiagem da lagoa pode-se negligenciar a vazão de entrada por ser muito pequena e que a variação de volume de água na lagoa em um intervalo de tempo (ver Figura 5.8) corresponde à vazão de saída da lagoa.

Para a vazão de saída admitiu-se a validade de uma equação polinomial ao decaimento de nível da lagoa, tendo como condição limite uma vazão mínima constante.

$$Q_{saída} = a + b.h + c.h^2 + d.h^3$$

onde:

$Q_{saída}$ – vazão de saída (m^3/s);

a, b, c, d – parâmetros;

h_i – nível na lagoa (m).

4.2.5 CONTRIBUIÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Com a equação de Darcy foram estimados os valores de recarga da lagoa pela contribuição do domo de água tanto do lado direito (Estrada do Mar) como do lado esquerdo (Serra Geral).

A equação de Darcy é a seguinte:

$$Q_c = -K.h.\frac{dh}{dl}$$

onde:

Q_c – recarga do aquífero (m³/dia.m);

K – condutividade hidráulica (m/dia);

dh – diferença das alturas piezométricas (m);

dl – distância entre leituras piezométricas (m).

4.3 MODELO HIDRODINÂMICO

Antes de se definir a utilização de um modelo hidrodinâmico, deve-se inicialmente avaliar as características de um corpo hídrico. A seguir pretende-se justificar a escolha do modelo hidrodinâmico bidimensional. Abordam-se cinco tópicos: caracterização do corpo hídrico, equações que regem o escoamento, definição do modelo hidrodinâmico, modelo hidrodinâmico bidimensional horizontal e significado dos vários termos das equações para águas rasas.

4.3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CORPO HÍDRICO (WEIYAN, 1992)

A caracterização da geometria dos corpos em estudo se baseia nos seguintes itens:

1. Superfície livre;

2. Baixa inclinação (a) do fundo, tal que $\operatorname{tg} a \cong \operatorname{sen} a$ e que não ocorra grandes mudanças na topografia sob a água;
3. A altura (h) da lamina de água é bem inferior ao comprimento (L) do corpo de água ($h \ll L$).

O comportamento do escoamento para o modelo utilizado tem as seguintes características:

1. Escoamento não uniforme;
2. Em razão da pouca profundidade, a velocidade no plano horizontal é relativamente uniforme em relação à vertical, por isso consegue-se justificar a integração na vertical;
3. O fluxo é em geral rotacional, onde produção, transporte, difusão e dissipação de vórtices acontecem continuamente e simultaneamente. No plano horizontal as velocidades são bem maiores que no plano vertical;
4. Temperatura é frequentemente considerada constante, dado que o calor produzido pela dissipação da fricção e a transferência de calor são negligenciáveis. Se existe uma diferença na temperatura não se considera a variação da densidade, da viscosidade e da condutividade térmica.

As forças externas podem ser as seguintes:

1. **Força de Gravidade:** A componente mais importante corresponde ao campo gravitacional terrestre, caracterizado pela aceleração constante a que se submete qualquer corpo, em movimento ou não, com sentido apontado para o centro do planeta, em qualquer ponto da superfície;
2. **Força de Coriolis:** Resultante da aceleração geostrófica da Terra, de caráter intrinsecamente inercial. O fato de a Terra girar em torno do seu eixo N-S no sentido O-E condiciona o escoamento de grandes massas fluidas. Se um corpo qualquer se desloca horizontalmente na superfície terrestre estará sujeito a uma componente da força de Coriolis perpendicular a sua trajetória. No hemisfério Sul o desvio acontece para a esquerda, enquanto para o hemisfério norte é para a direita;

3. **Forças exercidas pela lua e o sol:** Outra componente que contribui é a atração de outros corpos celestes. Os mais importantes são a Lua e o Sol e seu efeito principal da atração é a maré oceânica;
4. **Viscosidade turbulenta:** Foi introduzida por Boussinesq e se constitui na primeira tentativa de tratar a turbulência. Esta hipótese parte da analogia entre os fenômenos de viscosidade e turbulência. A diferença fundamental consiste em que a viscosidade ocorre a nível molecular, enquanto que a turbulência depende também do escoamento.;
5. **Tensão causada pela velocidade do vento** sobre a superfície de água;
6. **Gradiente de pressão** gerada pela pressão atmosférica sobre a superfície de água.

Os valores dos três primeiros dependem da profundidade da água e dos três últimos dependem da área superficial.

4.3.2 EQUAÇÕES QUE REGEM O ESCOAMENTO

O movimento do fluido é basicamente regido pelos princípios físicos fundamentais de conservação de massa, quantidade de movimento e energia.

A conservação da massa estabelece que não há ganho nem perda de massa por parte do fluido, durante o escoamento, enquanto que as conservações da quantidade de movimento e energia são conseqüências diretas, respectivamente, da segunda lei de Newton e da primeira lei da termodinâmica.

1. Lei da conservação da massa:

$$\frac{d}{dt} m = 0$$

onde:

m – massa do fluido em questão.

A equação que representa a conservação da massa, uma grandeza escalar, é conhecida por Equação da continuidade; as equações que traduzem a conservação da quantidade de movimento, uma grandeza vetorial, são chamadas de Equações Dinâmicas; e a conservação da energia, grandeza escalar como a massa, é descrita pela equação denominada de Equação de Energia. O detalhamento destas equações pode ser visto no trabalho de Silveira (1986).

2. Lei da conservação do momento (2ª Lei de Newton):

$$\frac{d}{dt}(mV) = F$$

onde:

V – vetor velocidade;

F – força externa.

Esta lei determina que a força de inércia – força que traduz a tendência natural de um corpo material de resistir a mudanças no seu estado de movimento – será, em cada ponto, igual à resultante das forças aplicadas no fluido, no decorrer do tempo. Estas forças aplicadas têm origem, principalmente, na gravidade, na rotação terrestre, na pressão e na viscosidade do fluido. Em geral, as forças com origem em gradientes térmicos, de concentração de solutos e de manifestações de campos eletromagnéticos e da radiação são desprezíveis.

As equações utilizadas neste estudo serão advindas do método de Euler, este método procura descrever o escoamento em coordenadas fixas do espaço. Num espaço de coordenadas cartesianas, o sistema de equações básicas do escoamento descreve um movimento tridimensional. Desta forma, além das equações de massa e energia (grandezas escalares), haverá três equações dinâmicas, uma para cada direção ortogonal do espaço.

4.3.3 DEFINIÇÃO DO TIPO DE MODELO HIDRODINÂMICO

Para o estudo de lagos, estuários e marés é necessário o desenvolvimento de modelos mais complexos do que unidimensional.

Os modelos bidimensionais reproduzem velocidades com duas componentes em um plano do espaço. Estes modelos necessitam da integração no espaço, a integração ocorre no eixo menos importante e são feitas algumas simplificações físicas neste eixo.

Estes modelos podem ser horizontais ou verticais, nos horizontais a integração é feita na vertical segundo o eixo da aceleração da gravidade, desprezando os termos de inércia e atrito neste eixo.

O método numérico utilizado neste trabalho é o das diferenças finitas. Este método aproxima as derivadas parciais das equações diferenciais por quocientes de diferenças finitas de valores das variáveis tomados em pontos discretos do espaço tempo de cálculo.

O esquema numérico pode ser explícito, e as variáveis incógnitas têm seus valores definidos em cada ponto no espaço, em função de valores conhecidos dos intervalos de tempo anteriores; enquanto que no implícito, as variáveis incógnitas são resolvidas simultaneamente a cada intervalo de tempo, geralmente em linha do espaço com condições de contorno definidas.

Em função do método de diferenças finitas estar sendo utilizado a mais tempo, ele possui o aspecto positivo de ter metodologias de análise numérica – avaliação da estabilidade e precisão do esquema – pesquisados em profundidade, ainda que somente para as equações diferenciais lineares ou linearizadas.

Na prática, a formulação por diferenças finitas do escoamento bidimensional é realizada com a divisão do intervalo de tempo em duas partes iguais, sendo resolvido em cada uma delas um sistema composto pela equação da continuidade e por uma equação dinâmica. Este método é denominado (ADI) de semi-implícito.

Na realização da integração é admitido um plano de referência (PR) arbitrário, abaixo do qual estão colocadas profundidades fixas (h) – que representam a superfície irregular do fundo – e acima, os níveis de água (ζ) variáveis de acordo com o escoamento (ver Figura 4.8).

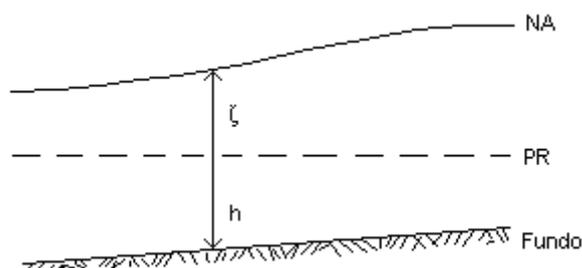


Figura 4.8 Plano de referência, profundidades fixa e variável

4.3.4 MODELO HIDRODINÂMICO BIDIMENSIONAL HORIZONTAL

Para os modelos hidrodinâmicos bidimensionais horizontais é referência clássica o trabalho de Leendertse (1967), que apresenta ampla e completa análise numérica e prática, demonstrando a eficiência da esquematização utilizada. É o método numérico do programa IPH-A (Borche, 1986).

O modelo hidrodinâmico utilizado para estudar o comportamento do escoamento é do tipo determinístico e busca sintetizar velocidades e níveis na lagoa através de condições de contorno do sistema em questão. Um modelo determinístico é aquele que busca através de determinadas leis estabelecer os padrões de comportamento, deixando de lado a probabilidade.

O esquema numérico concebido por Leendertse (1967) é um esquema em diferenças finitas que se vale da malha de cálculo defasada de Platzman e de uma adaptação ao plano horizontal do método implícito de integração por caminhos alternados (ADI – sigla em inglês). Este esquema contribui para apresentar maior estabilidade e precisão numérica (Platzman (1959) *apud* Silveira, 1986).

Na avaliação do esquema numérico, Leendertse realizou uma análise de estabilidade baseada no método de Von Neuman e apresentou uma original análise de dissipação e deformação de ondas. Através destas análises foram balizados critérios de estabilidade e precisão em função da discretização numérica e de características do escoamento (Silveira, 1986).

O modelo hidrodinâmico utiliza as equações de Navier-Stokes integradas na vertical. A justificativa da integração na vertical vem em razão das águas serem rasas, isto é,

existe uma relativa uniformidade entre a distribuição no plano horizontal das velocidades ao se analisar várias profundidades.

Para descrever o escoamento em águas rasas, utiliza-se as equações abaixo para o caso bidimensional.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - \Omega V + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gU \sqrt{U^2 + V^2}}{C_h H} - \frac{\tau_{sx}}{H} - v_t \Delta U &= 0 \\
 \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - \Omega U + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gV \sqrt{U^2 + V^2}}{C_h H} - \frac{\tau_{sy}}{H} - v_t \Delta V &= 0 \\
 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

onde:

U, V – componentes do vetor velocidade nas direções x e y ;

ζ - nível medido a partir de um plano de referência fixo;

h – profundidade referida a este plano;

H – profundidade total ($H = h + \zeta$);

Ω - Aceleração de Coriolis;

τ_{sx}, τ_{sy} – componentes da tensão de cisalhamento na superfície;

C_h – coeficiente de Chezy;

v_t – coeficiente de dissipação turbulenta.

Abaixo, serão detalhados os vários termos das equações para águas rasas.

1. **Aceleração local** – Como por exemplo du/dt , representa a taxa de troca de velocidade em um determinado intervalo de tempo em qualquer ponto fixo e são os únicos termos que mostram que o escoamento não é permanente.
2. **Aceleração convectiva** – Como por exemplo udu/dx , representa o efeito do gradiente espacial da velocidade sendo transportado junto com a corrente. São estes termos que governam a produção e o transporte dos vórtices.
3. **Inclinação da superfície** – Termos como gdz/dz , representam a ação gravitacional. Para um escoamento livre, estes termos geralmente

correspondem às principais forças induzidas, por isso as ondas associadas em um canal aberto são chamadas de ondas gravitacionais.

4. **Gradiente da pressão atmosférica** – A pressão do campo atmosférico é representada por termos como $\frac{1}{\rho} \frac{dp_a}{dx}$. No caso do modelo utilizado este

termo é considerado constante.

Uma análise concluiu que para casos onde a profundidade é menor que 50 metros e a variação de pressão atmosférica é pequena e este termo pode ser negligenciado (Weiyan, 1992).

5. **Tensão causada pelo vento na superfície da água** – A tensão causada pelo vento é representada por ex. por $\frac{\tau_{ax}}{\rho h}$ que corresponde a força de

arraste do vento na superfície da água. Existe uma turbulência na interface água-ar que é inversamente proporcional à profundidade, portanto ela é muito importante para escoamento de águas rasas.

6. **Atrito de fundo** – É representado por termos, tal como $\frac{\tau_{bx}}{h}$ e tem um efeito não linear no retardamento do escoamento.

7. **Força de Coriolis (Ω)** – Deriva da rotação diária da Terra. No hemisfério sul aumenta no sentido anti-horário o escoamento rotacional.

8. **Viscosidade turbulenta** – É descrita por termos, tal como $\nu_t \nabla^2 u$, que representam a troca de momento e dissipação de energia resultantes da difusão molecular, difusão turbulenta, variação vertical da velocidade horizontal e da não uniformidade da distribuição no plano horizontal das velocidades.

O coeficiente de dissipação turbulenta é um tensor assimétrico de 2ª ordem composto de nove elementos, cujos valores são sujeitos a grandes variações de acordo com o comportamento do fluido. Este coeficiente deveria ser uma função no espaço e no tempo e também dependeria da magnitude do escoamento, porém para a resolução numérica, onde os vórtices são reproduzidos por malhas, o que implica numa limitação de tamanho, ν_t é frequentemente considerado como constante em razão das simplificações por ele trazidas no cálculo. Os valores adotados para o coeficiente de dissipação turbulenta são da ordem de $1 - 103 \text{ m}^2/\text{s}$, sendo que os mais frequentes são de $5 - 100 \text{ m}^2/\text{s}$ (Weiyan, 1992).

Algumas características destes modelos, como: consistência, viscosidade numérica e estabilidade estão descritas no trabalho de Silveira, 1986.

4.3.5 PROGRAMA IPH-A:

O programa IPH-A utiliza-se da formulação básica de Leendertse. A resolução numérica das equações que definem o escoamento é baseada na técnica de diferenças finitas, semi-implícita de direções alternadas (ADI).

As equações da continuidade e dinâmica estão integradas na vertical, levando em consideração a perda de carga junto ao fundo, a ação do vento na superfície, a força de Coriolis e um coeficiente de difusão turbulenta. O sistema é aplicável ao estudo de corpos de água em que as dimensões horizontais são predominantes e não possuem estratificação vertical.

Inicialmente para cada direção é calculado o campo de velocidades e em seguida é resolvida a equação de advecção-difusão. Para cada intervalo de tempo o cálculo é feito em duas etapas: em cada linha através da resolução de um sistema tridiagonal pelo método da dupla varredura são calculados o nível, a componente U da velocidade e as concentrações. Na segunda etapa são calculadas, para cada coluna, as componentes de velocidade V, dos níveis e das concentrações (Borche, 1986).

Os dados a seguir foram utilizados como dados de entrada para o modelo IPH-A. São eles:

- Contorno da lagoa e batimetria;
- Critério do número de Courant e dimensão da malha de cálculo;
- Parâmetros de calibração: coeficiente de Chezy, coeficiente de atrito do vento e coeficiente de dissipação turbulenta;
- Vazões afluentes e efluentes para a lagoa;
- Velocidade e direção do vento;
- Condições de contorno.

O contorno da lagoa e as curvas batimétricas foram retiradas do relatório da ECOPLAN (1997).

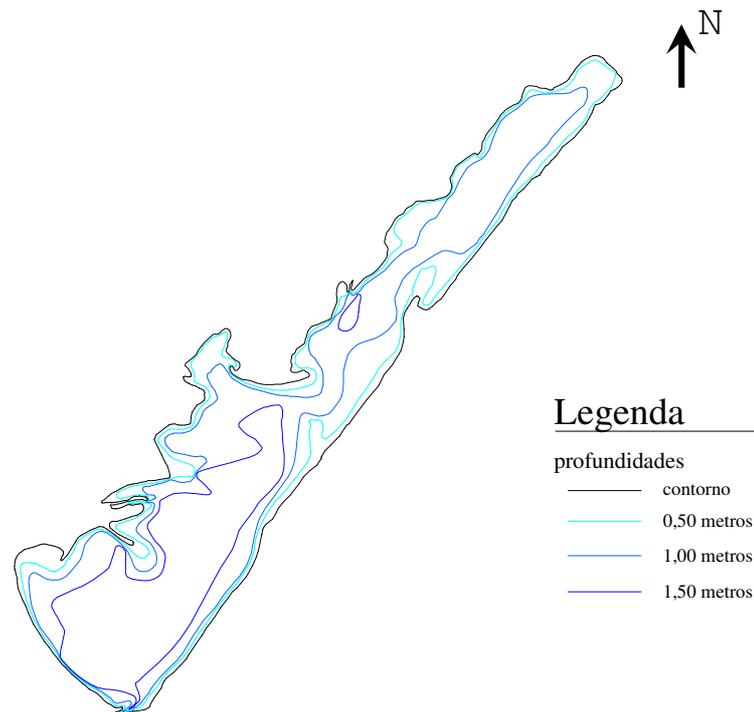


Figura 4.9 Contorno e profundidades da Lagoa de Itapeva

Para a escolha do Δt usou-se o critério do número de Courant que para uma estimativa inicial será utilizada a dos modelos unidimensionais, onde assume-se que o número de Courant é igual à unidade encontrando assim, a seguinte relação:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{u}$$

Para modelos bidimensionais que usam o modelo de direções alternadas (ADI), a seguinte equação para o número de Courant foi proposta (Benqué et al. (1982) *apud* Silveira, 1986).

$$C = \Delta t \sqrt{g \cdot h_m} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}$$

onde:

h_m – profundidade média;

$\Delta x, \Delta y$ – tamanho da malha.

Em razão de o modelo utilizar malhas quadradas a equação de Courant fica:

$$C = \sqrt{2g \cdot h_m} \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

Para valores de C maiores que 5-10 não são bem simulados por modelos do tipo ADI, pois geram instabilidades numéricas (Benqué et al. (1982) *apud* Silveira, 1986).

Para este estudo serão feitas simulações com a malha de 500 m (ver Figura 4.8), pois está foi a menor malha que se conseguiu rodar no modelo IPH-A em função provavelmente da falta de memória.

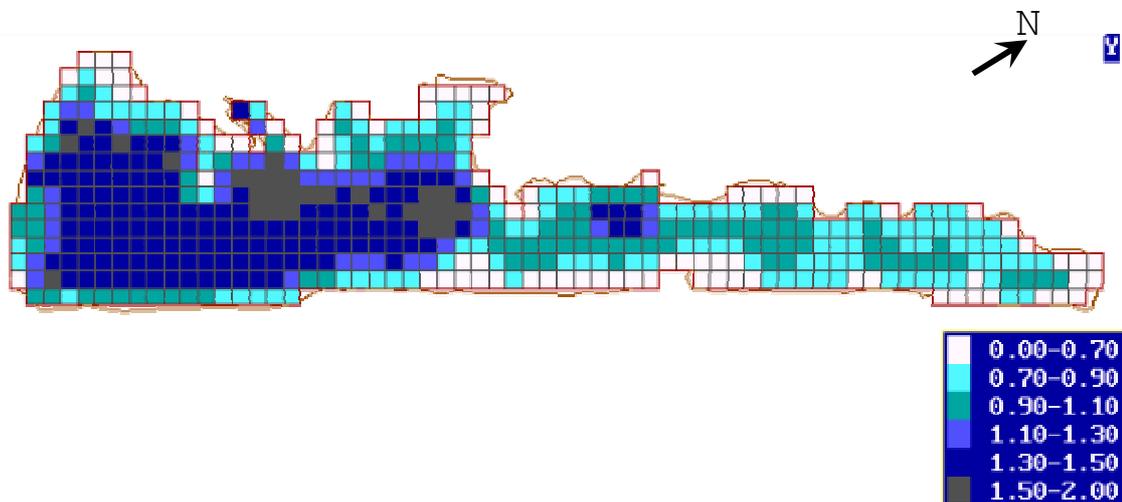


Figura 4.10 Batimetria para uma malha de 500 metros

Considerando o número de Courant igual a um, a profundidade média da lagoa de dois metros encontrou-se Δt de 1,5 min para a malha de quinhentos metros.

Além da definição da malha deve-se levar em conta a batimetria, pois quanto menor for o tamanho da malha melhor será a representação da batimetria, ou seja, o canal Cornélios tem largura de 50 metros e profundidade de 5 metros, trabalhando com uma malha de 500 metros a entrada do rio deveria ter uma altura de 0,5 metro para assim manter a mesma vazão do rio e não causar discrepância na variação da velocidade.

Os dados utilizados para a calibração do modelo serão os níveis de água medidos na lagoa durante o período de estudo. Através dos parâmetros abaixo se ajustaram os níveis simulados com os medidos. O modelo foi ajustado através de três parâmetros:

1. Coeficiente de Chezy, corresponde à perda e carga junto ao fundo;

$$C_h = \frac{H^{1/6}}{n} \quad \text{ou} \quad C_h = \frac{\sqrt{g}}{k} \left[\ln\left(\frac{H}{z_0}\right) - 1 \right]$$

onde:

n – coeficiente de Manning;

k – constante de Von Karman;

z_0 – rugosidade do fundo.

2. Coeficiente que relaciona a tensão de cisalhamento na superfície livre com o quadrado da velocidade do vento;

$$\tau_{sx} = C_v \cdot W_x \cdot \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

$$\tau_{sy} = C_v \cdot W_y \cdot \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

onde:

W_x, W_y – componentes da velocidade do vento;

C_v – coeficiente de ajuste.

3. Coeficiente de dissipação turbulenta.

As vazões afluentes e efluentes foram calculadas para os rios citados abaixo. Já os dados de vento foram retirados de torres meteorológicas instaladas na lagoa.

- Vazões afluentes (Rio Três Forquilhas e Rio Cardoso) e efluentes (Canal Cornélios);
- Velocidade e direção do vento.

Para a simulação inicial utilizou-se o IPH-A sem influência do vento. Assim poder-se-ia verificar se os níveis médios simulados correspondem aos níveis médios reais.

A partir desta verificação utilizaram-se também os dados de vento e nos períodos onde há falhas na coleta destes dados considerou-se o valor zero para o vento, para que não houvesse interrupção na simulação. Como a variação do vento é significativa optou-se por desprezar os valores da simulação para o período sem dados, já que qualquer valor calculado não seria representativo.

A simulação hidrodinâmica está baseada na solução numérica das equações bidimensionais de Navier-Stokes que permitem a reprodução do escoamento horizontal sob variadas condições de contorno, como ventos, vazões e níveis d'água.

As condições iniciais previstas foram as de nível igual a 1,19 metros em toda a lagoa e velocidade zero da água (repouso).

As condições de contorno são vazões de entrada em dois pontos (rio Três Forquilhas e rio Cardoso) e vazão de saída pelo canal Cornélios, considerando velocidade e direção de vento uniforme em toda a lagoa (mas variáveis no tempo).

4.3.6 ALTURA DE ONDA

Para o cálculo da onda gerada pelo vento utilizou-se o trabalho de Hakanson (1981) que vincula a altura de onda gerada com a velocidade do vento e o fetch efetivo. Na Tabela 4.3 tem-se este valores.

Tabela 4.3 Altura da onda (m) - Hakanson (1981)

Lf (km)	Vel (m/s)					
	6	9	12	15	18	21
0.5	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350
1	0.125	0.200	0.300	0.350	0.425	0.525
2	0.175	0.300	0.375	0.500	0.600	0.725
3	0.200	0.350	0.450	0.600	0.725	0.875
4	0.250	0.375	0.525	0.675	0.825	1.000
5	0.275	0.425	0.600	0.750	0.900	1.100
6	0.300	0.475	0.625	0.800	1.000	1.200
7	0.325	0.525	0.700	0.875	1.075	1.275
8	0.350	0.550	0.750	0.950	1.150	1.350
10	0.375	0.600	0.825	1.050	1.250	1.500
20	0.550	0.825	1.175	1.450	1.700	2.225
30	0.650	1.000	1.400	1.750	2.175	2.600
40	0.750	1.150	1.550	2.000	2.400	2.900

* Lf – fetch efetivo; Vel – velocidade do vento

Segundo Hakanson (1981) os passos da estimativa de fetch são (ver Figura 4.10):

1. Calcular o comprimento (x) desde o ponto de coleta até a margem da lagoa na direção de onde provém o vento (linha vermelha na Figura 4.10);
2. A partir desta direção, a cada 6° (α), nas duas direções, calcular os comprimentos do ponto de coleta até a margem da lagoa, o angula máximo é de 42° ;
3. Fetch efetivo corresponde a: $\Sigma x \cdot \cos(\alpha) / \Sigma \cos(\alpha)$.

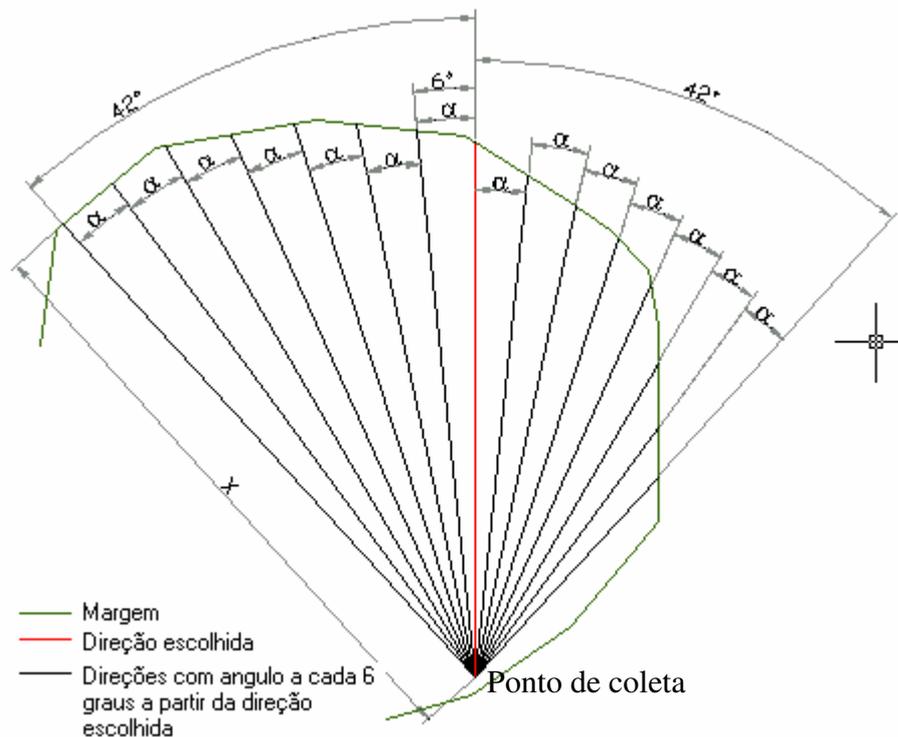


Figura 4.11 Esquema para cálculo do fetch

4.3.7 EXPLORAÇÃO DOS DADOS HIDRODINÂMICOS

Foram definidos quinze pontos pela lagoa para tratamento estatístico, visualização e quantificação das variáveis hidrodinâmicas simuladas e dos ventos medidos. Destes pontos três são os que foram utilizados para as campanhas, onde existem as torres de coleta. Os demais pontos foram divididos em três regiões com quatro pontos cada uma. Na Figura 4.12 estão localizados os pontos, sendo que aqueles em azul correspondem aos das torres.

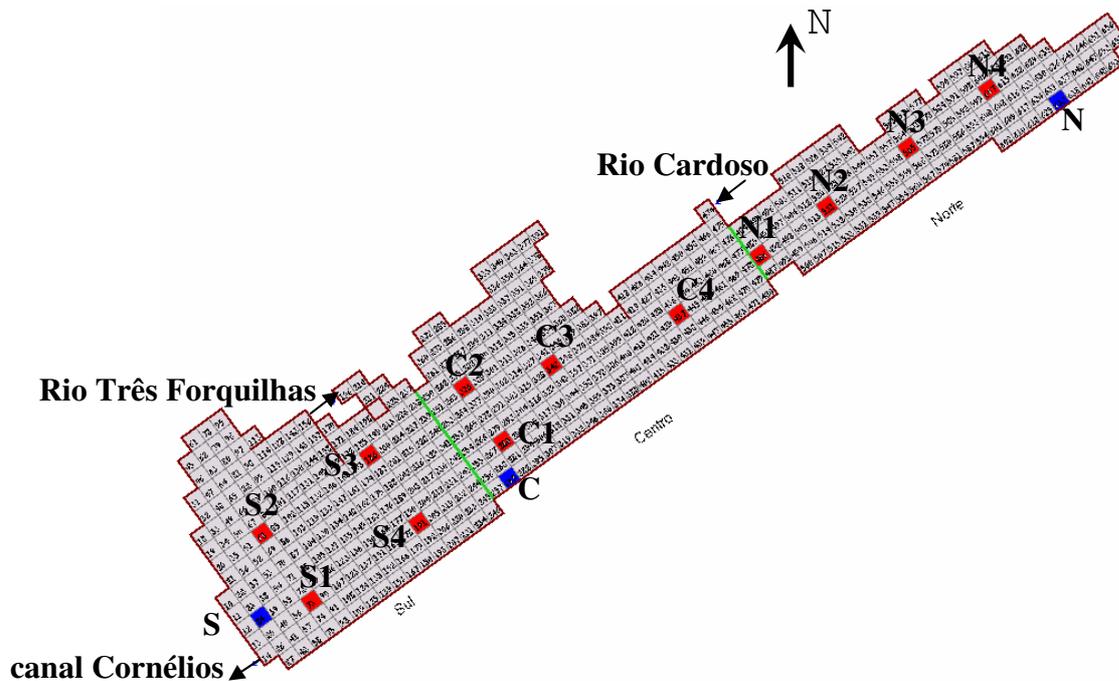


Figura 4.12 Localização dos pontos de estudo

4.3.8 METODOLOGIAS PARA ANÁLISE COM BÓIAS VIRTUAIS E OSCILAÇÕES DE SEICHES

Algumas ferramentas do programa IPH-A e outras desenvolvidas para melhor interpretar e analisar os dados de saída deste programa serão detalhadas a seguir.

- Para a determinação da correntologia no plano horizontal utilizou-se o lançamento de “bóias virtuais” para visualizar o fluxo do escoamento. Também através desta “bóias” previu-se investigar se existia ou não uma tendência de escoamento diferenciado em três divisões hipotéticas da lagoa;
- Com os níveis gerados pelo IPH-A e confrontando com os níveis reais, previu-se analisar as seiches em quatro cortes transversais e um longitudinal, para demonstrar o efeito dessas oscilações em sua amplitude, duração e frequência.

4.4 ESTUDO ESTATÍSTICO ENTRE VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS E AMBIENTAIS

Para o estudo da influência hidrodinâmica da lagoa sobre as variáveis ambientais, sólidos suspensos e turbidez a abordagem concebida foi a de detectar correlações lineares, e, se possível, obter equações de regressão múltipla.

As variáveis hidrodinâmicas consideradas são as extraídas do modelo hidrodinâmico: níveis e velocidade da água, assim como a altura da onda gerada pelo vento calculada à parte, para potencialmente melhorar a significância das variáveis hidrodinâmicas sobre as variáveis ambientais.

4.4.1 REGRESSÕES MÚLTIPLAS

O modelo estatístico de uma regressão múltipla, sendo Y a variável dependente, $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$, as variáveis independentes e k ($k > 1$) o número de variáveis independentes, será dado por:

$$Y_j = \alpha + \beta_1 X_{1j} + \beta_2 X_{2j} + \dots + \beta_3 X_{3j} + \varepsilon_j \quad \text{Eq. 5.5.1}$$

Onde:

j – as amostragens;

α, β – coeficientes;

ε – erro.

O coeficiente de correlação linear múltipla possibilita determinar quantitativamente o grau de relação linear entre as variáveis envolvidas. Esse coeficiente é denotado por R e varia de 0 a 1. Este valor representa quanta da variação é explicada pela variabilidade das variáveis independentes. O restante ($1-R$) fará parte da variação residual.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão mostrados em primeiro lugar os resultados da caracterização de ventos e ondas e em seguida o estudo da contribuição hídrica (balanço hídrico – precipitação, evaporação, escoamento superficial afluente e efluente, contribuição subterrânea) necessária para simular a variação hidrodinâmica ao longo do ano de 1999. Será mostrado que o modelo hidrodinâmico utilizado com as condições e simplificações impostas obtiveram uma resposta razoável sobre o período em estudo. Com seus resultados de níveis e velocidades da água foram realizadas análises sobre suas influências nas variações de sólidos suspensos e turbidez. Quando necessário foi utilizada a geração de ondas pelo vento em adição a estes dois parâmetros hidrodinâmicos para obter um grau de significância aceitável nas análises estatísticas que visaram correlacionar as variáveis hidrodinâmicas e as ambientais.

5.1 VENTOS E ONDAS

Como foi visto anteriormente a ação dos ventos na região litorânea do RS é muito importante. Para a classificação dos ventos do ano de 1999 (Figura 5.1) foi utilizada como base a Escala de Beaufort. Ela está dividida em 12 categorias conforme a Tabela 5.1.

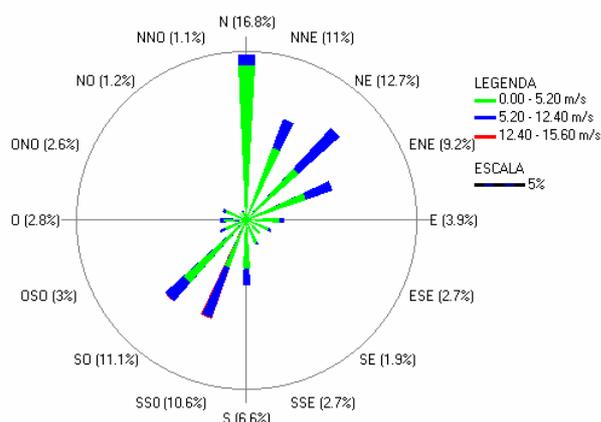


Figura 5.1 Rosa dos ventos na lagoa Itapeva para o ano de 1999

Para este estudo a classificação dos ventos foi dividida em três níveis: fraco, moderado e forte. O vento fraco corresponde do 0 ao 3 da Escala de Beaufort, o moderado de 4 a 6 e o forte de 7 para cima.

Tabela 5.1 Escala de Beaufort – Intensidade do vento

ESCALA BEAUFORT				
Força	Designação	m/seg	km/h	Aspecto do Mar
0	CALMÁRIA	0 a 0,5	0 a 1	Espelhado.
1	BAFAGEM	0,6 a 1,7	2 a 6	Mar encrespado em pequenas rugas, com aparência de escamas.
2	ARAGEM	1,8 a 3,3	7 a 12	Ligeiras ondulações de 30 cm (1 pé), com cristas, mas sem arrebentação.
3	FRACO	3,4 a 5,2	13 a 18	Grandes ondulações de 60 cm com princípio de arrebentação. Alguns "carneiros".
4	MODERADO	5,3 a 7,4	19 a 26	Pequenas vagas, mais longas, de 1,5 m, com frequentes "carneiros".
5	FRESCO	7,5 a 9,8	27 a 35	Vagas moderadas de forma longa e uns 2,4 m. Muitos "carneiros". Possibilidade de alguns borrifos.
6	MUITO FRESCO	9,9 a 12,4	36 a 44	Grandes vagas de até 3,6 m. muitas cristas brancas. Probabilidade de borrifos.
7	FORTE	12,5 a 15,2	45 a 54	Mar grosso. Vagas de até 4,8 m de altura. Espuma branca de arrebentação; o vento arranca laivos de espuma.
8	MUITO FORTE	15,3 a 18,2	55 a 65	Vagalhões regulares de 6 a 7,5 m de altura, com faixas de espuma branca e franca arrebentação.
9	DURO	18,3 a 21,5	66 a 77	Vagalhões de 7,5 m com faixas de espuma densa. O mar rola. O borrifo começa a afetar a visibilidade.
10	MUITO DURO	21,6 a 25,1	78 a 90	Grandes vagalhões de 9 a 12 m. O vento arranca as faixas de espuma; a superfície do mar fica toda branca. A visibilidade é afetada.
11	TEMPESTUOSO	26,2 a 29	91 a 104	Vagalhões excepcionalmente grandes, de até 13,5 m. A visibilidade é muito afetada. Navios de tamanho médio somem no cavado das vagas.
12	FURACÃO	30 a ...	105 a ...	Mar todo de espuma. Espuma e respingos saturam o ar. A visibilidade é seriamente afetada.

Abaixo, na Figura 5.2, está a evolução do vento em função do tempo, da torre norte utilizada neste estudo, e estão marcados com elipses os períodos onde houve falha na coleta dos dados de vento ou dúvida na validade dos dados.

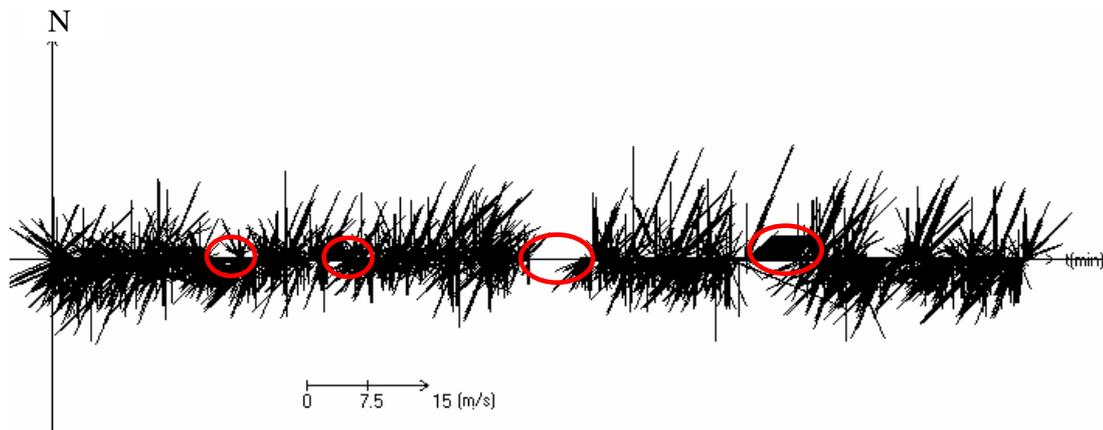


Figura 5.2 Ventos x tempo para a lagoa Itapeva para o ano de 1999. Em vermelho – Falhas na coleta dos dados

A torre norte foi utilizada por ter respondido melhor quando usada no modelo hidrodinâmico na representação dos níveis.

Para o estudo foram considerados quatro períodos, os mesmos a que vão se referir as análises hidrodinâmicas. Eles correspondem aos períodos sazonais em que as campanhas foram realizadas, que são: 04/01/1999 a 22/03/1999 (verão), 22/03/1999 a 21/06/1999 (outono), 21/06/1999 a 22/09/1999 (inverno) e 22/09/1999 a 11/12/1999 (primavera).

Para cada um destes intervalos serão mostradas as respectivas rosas dos ventos, a evolução do vento no tempo, como também as trajetórias mais significativas para o estudo da caracterização do funcionamento da lagoa em três regiões distintas (sul, centro e norte) e as velocidades da água em determinadas células, conforme a Figura 4.12 mostrada anteriormente.

Nas Figura 5.3 e Figura 5.44 respectivamente têm-se a evolução do vento e as rosas dos ventos para os 4 períodos citados acima. Deve-se ainda, lembrar a convenção na rosa dos ventos que determina, por exemplo, que o vento norte é o vento que vem da direção norte e vai para a direção sul.

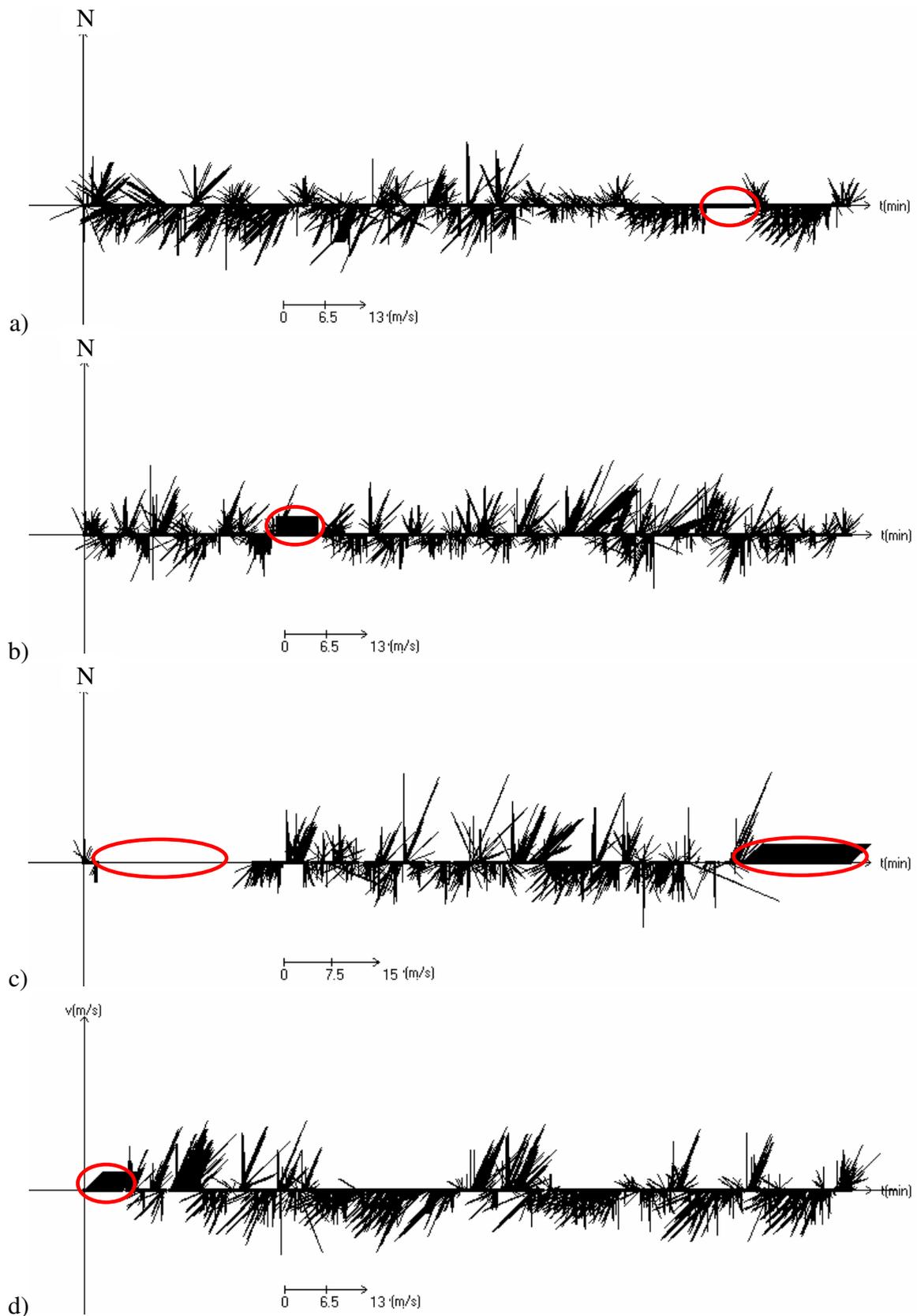


Figura 5.3 Vento x tempo para a lagoa Itapeva para os 4 períodos, sendo a) 04/01/1999 - 21/03/1999 (verão), b) 22/03/1999 - 21/06/1999 (outono), c) 22/06/1999 - 22/09/1999 (inverno) e d) 23/09/1999 - 31/12/1999 (primavera). Em vermelho - Falhas na coleta dos dados

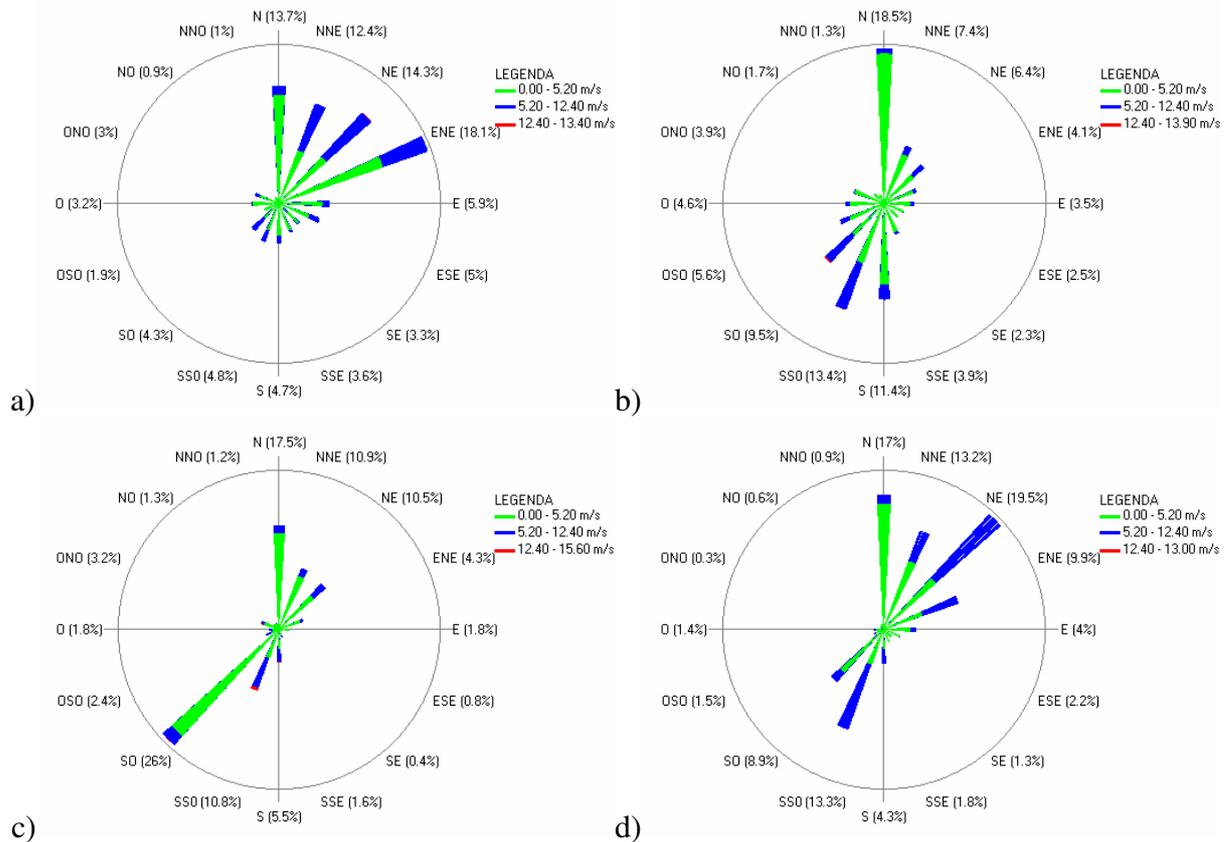


Figura 5.4 Rosa dos ventos para a lagoa Itapeva para os 4 períodos, sendo a) 04/01/1999 - 21/03/1999 (verão), b) 22/03/1999 - 21/06/1999 (outono), c) 22/06/1999 - 22/09/1999 (inverno) e d) 23/09/1999 - 31/12/1999 (primavera)

As ondas, conforme referido na metodologia, dependem de estimativa a partir da caracterização morfológica a qual condiciona o fetch. O fetch efetivo foi utilizado para o cálculo da estimativa da altura de onda gerada pelo vento. Para cada ponto de coleta na lagoa foi calculado o fetch efetivo em cada direção do vento, estando na Tabela 5.2 estes valores. O fetch efetivo é calculado conforme detalhado anteriormente.

Tabela 5.2 Fetch efetivo (km) para a lagoa Itapeva

	Norte	Centro	Sul
N	2.1	7.48	8.49
NNE	1.94	6.21	9.8
NE	1.47	4.25	8.89
ENE	0.82	3.04	6.19
E	0.37	0.44	2.78
ESE	0.29	0.31	1.9
SE	0.28	0.31	1.5
SSE	0.35	0.74	1.2
S	2.18	2.65	0.94
SSO	3.36	5.07	0.78
SO	4.86	7.1	0.78
OSO	6.07	7.55	0.98
O	4.21	6.46	1.69
ONO	2.57	5.47	2.99
NO	2.12	5.21	4.27
NNO	2.09	5.72	5.9

Os valores ressaltados na Tabela 5.2 representam comprimentos críticos, ou seja, quando ocorrerem ventos provenientes destas direções, o efeito do vento através da geração de ondas e das seiches será mais acentuado. Também se pode identificar que para o verão o vento do quadrante NE é predominante, portanto as regiões mais afetadas serão as regiões Centro e Sul, enquanto que para o outono o vento foi do quadrante SO e as regiões mais afetadas serão o Centro e o Norte da lagoa.

Cabe ainda destacar que as diferenças (ver Figura 5.5) entre o fetch calculado neste trabalho e o calculado por Cardoso (2001) demonstrado na Tabela 3.2 está no fato de que Cardoso considera o efeito do fetch sendo a influência de um ponto de coleta até a margem na direção do vento (linha vermelha na Figura 5.5), por exemplo: o fetch de Norte com vento NE corresponde a 9,3 Km. Enquanto neste estudo o efeito do fetch corresponde à distância entre a margem da lagoa e o ponto de amostragem na direção do vento (linha azul na Figura 5.5), por exemplo: o fetch de Norte corresponde a 1,47 Km. Considerando o fetch desta maneira ocasiona que as alturas de onda para os pontos de amostragem serão diferentes do que os calculados por Cardoso (2001) e que neste caso para um fetch baixo poder-se-á encontrar a altura de onda, a velocidade da água e o nível de água baixos.

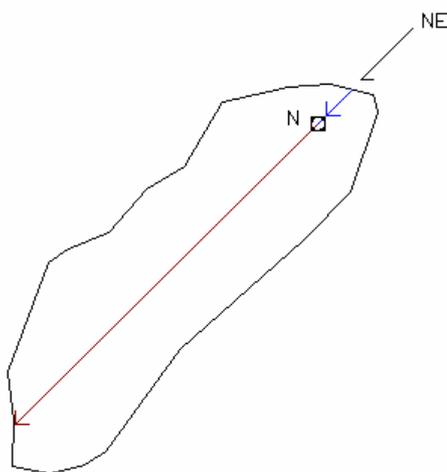


Figura 5.5 Diferenças no cálculo de fetch entre este estudo e Cardoso (2001)

Para o cálculo da onda foram considerados o fetch, a duração do vento, a intensidade do vento e a profundidade da lagoa. De acordo com a literatura pode-se considerar que o vento pode variar até 45° da direção principal e que a variação da intensidade deste não seja superior ao desvio padrão para que ele gere a onda.

Apresenta-se sob forma de tabela, um resumo da altura média de onda gerada para cada campanha, em cada estação de coleta e em cada direção do vento (Tabela 5.3) para as campanhas onde se tinham dados de níveis.

Tabela 5.3 Altura média da onda (m) para cada campanha na lagoa Itapeva*

	1ª campanha			2ª campanha			3ª campanha		
	02/03 a 07/03			21/05 a 26/05			14/08 a 19/08		
	<i>Sul</i>	<i>Centro</i>	<i>Norte</i>	<i>Sul</i>	<i>Centro</i>	<i>Norte</i>	<i>Sul</i>	<i>Centro</i>	<i>Norte</i>
<i>N</i>	0.179	0.165	0.09	0.147	0.135	0.074	0.167	0.153	0.084
<i>NNE</i>	0.209	0.15	0.088	0.152	0.11	0.064	0.139	0.1	0.059
<i>NE</i>	0.254	0.182	0.108	0.18	0.13	0.076	0.231	0.165	0.098
<i>ENE</i>	0.264	0.187	0.101	0.208	0.146	0.08	0.156	0.11	0.06
<i>E</i>	0.146	0.01	0.061	0.106	0.007	0.044	0.093	0.006	0.039
<i>ESE</i>	0.066	0.02	0.03	-	-	-	0.104	0.031	0.048
<i>SE</i>	-	-	-	0.035	0.01	0.014	-	-	-
<i>SSE</i>	-	-	-	0.075	0.055	0.036	0.065	0.048	0.032
<i>S</i>	-	-	-	0.042	0.072	0.073	0.063	0.11	0.111
<i>SSO</i>	-	-	-	0.086	0.227	0.182	0.098	0.259	0.205
<i>SO</i>	-	-	-	0.146	0.462	0.378	0.138	0.438	0.355
<i>OSO</i>	-	-	-	0.02	0.065	0.06	0.102	0.334	0.309
<i>O</i>	-	-	-	0.05	0.113	0.095	0.107	0.243	0.205
<i>ONO</i>	-	-	-	0.043	0.068	0.046	-	-	-
<i>NO</i>	-	-	-	0.029	0.032	0.02	-	-	-
<i>NNO</i>	0.138	0.139	0.088	0.012	0.012	0.008	-	-	-

* Onde se tem um traço na tabela corresponde à falta de vento nesta direção

Os valores em negrito na Tabela 5.3 representam as alturas de onda nas direções com comprimentos de fetch maiores para cada ponto de coleta e que por sua vez também tiveram ventos com duração e intensidade elevados.

5.2 BALANÇO HÍDRICO

Após consistir os dados coletados e adquirir outros dados necessários utilizou-se o modelo chuva-vazão, o IPH II, para estimar a vazão do Rio Três Forquilhas. Foram feitas quatro hipóteses de estudo e para validação utilizaram-se períodos diferentes de tempo dependendo do posto, conforme descrito na metodologia. Os valores do ajuste estão demonstrados na Tabela 5.4.

Após a calibração foi verificada que a hipótese 1 obteve melhor correlação, mas apesar do valor ser baixo, prosseguiu-se com os cálculos.

Após a validação, foram definidos os parâmetros do modelo a serem usados no período deste estudo que corresponde ao intervalo entre janeiro e dezembro de 1999. Os valores encontrados estão de acordo com a literatura.

Tabela 5.4 Coeficiente de Determinação (R^2) para as 4 hipóteses

	Hipótese 1	Hipótese 2
1993	0.43	0.49
1994	0.72	0.62
1995	0.24	0.32
1996	0.49	0.40
R^2	0.437	0.388

	Hipótese 3	Hipótese 4
1982	0.43	0.43
1983	-0.58	-0.65
1984	-0.39	-0.41
1985	0.46	0.30
1986	0.53	0.51
1987	0.47	0.38
1988	0.67	0.64
1989	0.07	0.10
1990	-0.22	-0.21
R^2	0.223	0.213

Apesar dos cálculos serem feitos com os postos RC e SP, estes dados iam até o ano de 1998, por isso optou-se por fazer uma correlação de dados entre estes postos e os demais postos que realmente tinham dados até o final de 1999.

Obtiveram-se os seguintes coeficientes de determinação (R^2) das precipitações entre as estações.

- Maquiné e RC: 0,7364;
- Maquiné e SP: 0,7072;
- Torres e RC: 0,5976;
- Torres e Taquari: 0,2997;
- Torres e Maquiné: 0,6278;
- Maquiné e Taquari: 0,3241.

Com relação à umidade relativa encontraram-se os seguintes valores para os coeficientes de determinação:

- Torres e Taquari: 0,5007;
- Torres e Maquiné: 0,4048;
- Maquiné e Taquari: 0,4949.

Através das correlações acima se verifica que o posto Maquiné tem melhor correlação com os postos Ribeirão dos Carvalhos (RC) e Serra do Pinto (SP). Enquanto que a umidade relativa tem baixa correlação entre os postos devido à proximidade de Torres ao mar.

Deve-se ainda salientar que apesar de Maquiné apresentar melhor correlação, esta ainda é baixa para os padrões de pluviometria. Mesmo assim, utilizaram-se os dados de precipitação deste posto no modelo de chuva-vazão.

Na Figura 5.6 se observam os valores gerados pelo programa chuva-vazão. As vazões já estão convertidas através da proporcionalidade de áreas. O fator utilizado foi 0,91.

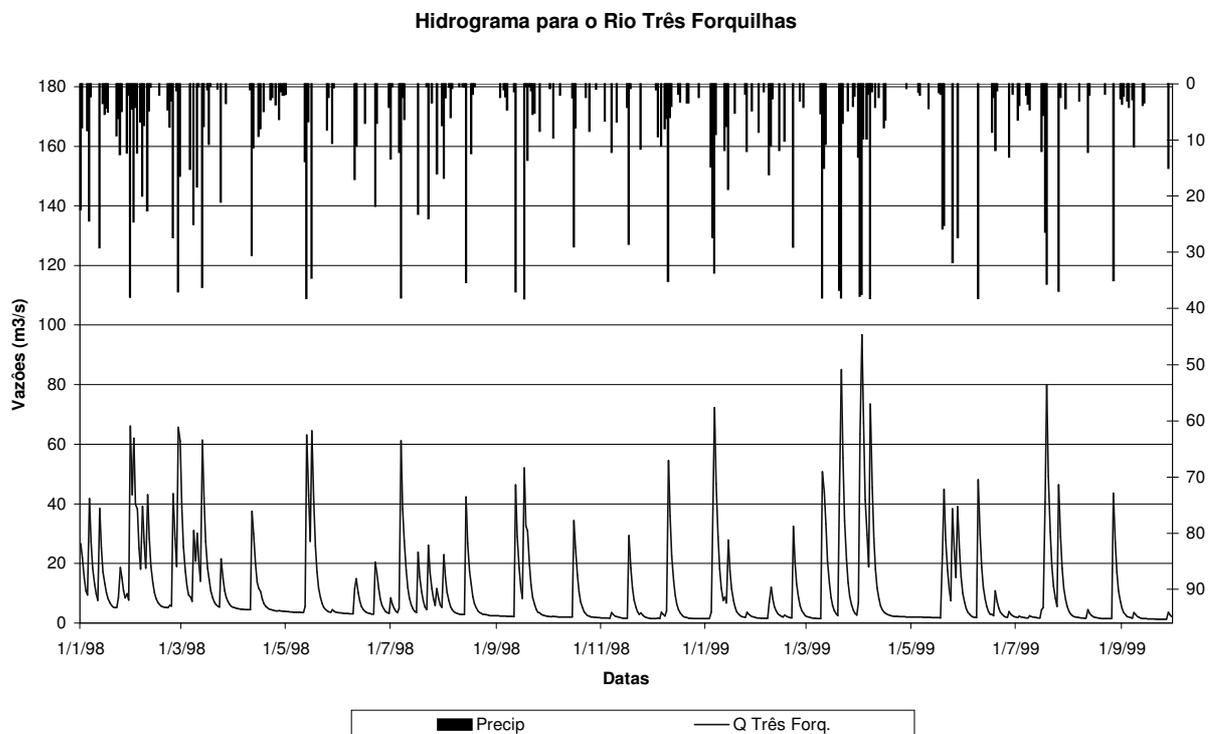


Figura 5.6 Vazões geradas para o Rio Três Forquilhas para o ano de 1999

Logo após a geração das vazões no modelo chuva-vazão foi utilizado o programa MOBALI para a geração da vazão de saída da lagoa, canal Cornélio, e para validação dos dados, isto em razão da lagoa Itapeva funcionar com um controle.

Foi utilizada uma média móvel de seis dias nos níveis observados para tirar o efeito do vento e assim retratar a variação de nível devido à variação de vazão. A média móvel foi calculada como o valor médio correspondente desde três dias, antes do evento até três dias depois, ou seja, calculou-se uma média móvel central. O valor de seis dias foi encontrado

através da análise visual dos níveis, sempre buscando o desaparecimento das oscilações causadas pelo vento e sem desconfigurar o comportamento dos níveis.

Também foi levado em conta no modelo a precipitação e a evaporação que ocorre diretamente na lagoa. Estes dados são inseridos no programa com valores mensais e depois transformados em valores diários. A precipitação e os níveis foram considerados os coletados pela estação de pluviometria e o linímetro da lagoa e o cálculo da evaporação foi feito pelo método de Penman.

A Figura 5.7 demonstra a variação de nível gerada pelo programa e a variação real para dois cenários.

A curva vermelha representa os valores reais de nível na lagoa, enquanto as cores verde e azul escuros representaram as duas hipóteses de estudo. A curva azul claro representa as vazões calculadas pelo IPHiiSL, descritas acima, e utilizadas no MOBALI para se encontrar os níveis de cor azul escuro. Enquanto que a curva verde claro corresponde a uma outra alternativa e os níveis correspondentes têm cor verde escuro.

Na cor azul utilizaram-se as vazões calculadas, enquanto para a cor verde procuraram-se representar melhor os picos, mas para isso elevou-se a vazão média de 8,62 m³/s para 9,92 m³/s. Observando a Figura 5.7 percebe-se que a diferença entre as curvas nada mais é que a diferença entre as vazões médias e não o melhor ajuste e representatividade dos picos.

Pode-se ainda verificar que a intensidade dos picos das vazões deveria ser maior e que ocorrem também em tempo diferentes do que acontece realmente. Com isso pode-se dizer que os postos de chuva utilizados não são eficazes na reprodução do comportamento da lagoa. O mais importante dos fatos citados não é a intensidade da chuva, pois esta poderia ser corrigida a fim de encontrar um valor proporcional ao original que resultasse em bons resultados, e sim a diferença temporal que faz com que a lagoa tenha variação de volume diferente do real.

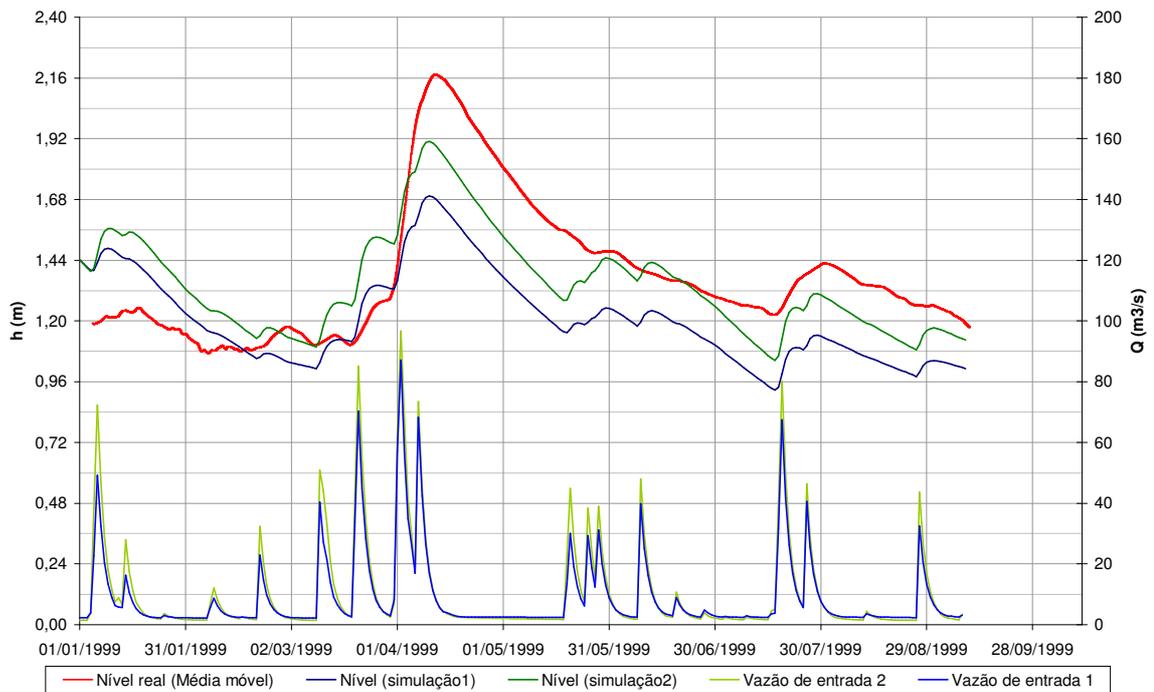


Figura 5.7 Hidrograma gerado pelo programa MOBALI

A partir destes resultados houve a necessidade de se usar o método alternativo para a geração das vazões e para isso foi usado o método de Puls invertido, ou seja, foi estimada uma lei de vazão de saída da lagoa e com os níveis observados foi gerada a vazão de entrada. Esta vazão de entrada foi utilizada no modelo MOBALI para confirmação

Para o ajuste da equação foi utilizado um período de estiagem na qual a vazão de entrada é muito baixa, podendo ser desprezada. Isto faz com que a variação de volume na lagoa dV/dt corresponda aproximadamente à vazão de saída.

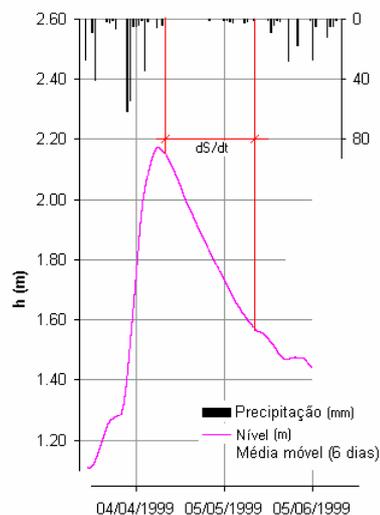


Figura 5.8 Estimativa da Vazão de saída

Ou seja, tendo-se a uma equação ajustável da vazão de saída e os dados observados de precipitação e nível, mais os dados estimados de evaporação, calcularam-se as vazões de entrada na lagoa para todo o período.

Após o cálculo da vazão de entrada pelo método de Puls invertido utilizou-se para comprovação o método de Puls para gerar os níveis com as vazões encontradas.

A equação de saída utilizada teve a seguinte expressão:

$$Q_{saída} = a + b.h + c.h^2 + d.h^3$$

Os resultados para os parâmetros a , b , c , d foram:

$$a = -331.91$$

$$b = 497.28$$

$$c = -243.62$$

$$d = 43.66$$

Também foi necessário ajustar uma vazão mínima para o bom desempenho da nova metodologia. A vazão mínima encontrada foi de 16,7 m³/s.

Na Figura 5.9 encontra-se o hidrograma gerado pelo programa, onde o azul corresponde à vazão de entrada e o magenta à vazão de saída da lagoa. Na figura ocorre uma instabilidade ocasionada pelo intervalo de tempo utilizado no método de Puls invertido, que corresponde a um dia. Para suavizar o hidrograma fez-se necessário diminuir o intervalo de tempo, porém tem-se a limitação de precisão nos dados de níveis que é da ordem de um centímetro. A variação deste centímetro corresponde a uma variação de volume de 1.245.000 m³. Se o intervalo de tempo for de 12 horas (metade do original), a vazão máxima de entrada praticamente duplicaria, por isso o intervalo de tempo não foi modificado, finalmente.

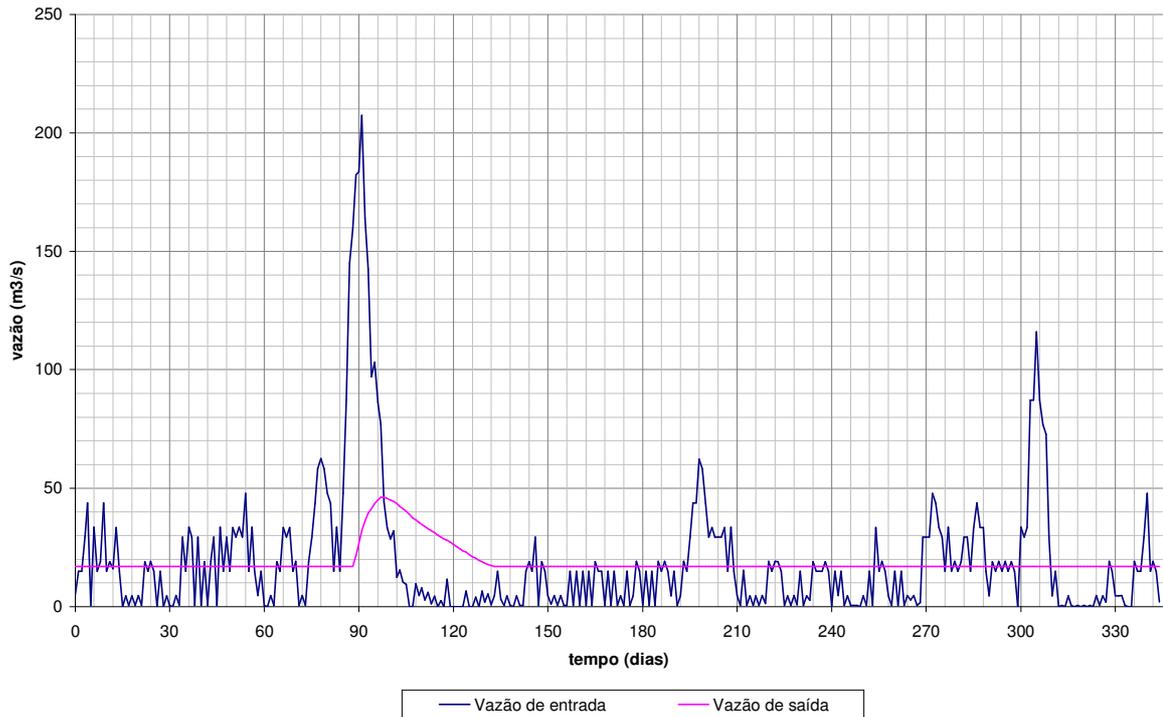


Figura 5.9 Vazões de entrada e saída para o ano de 1999 pelo Método de Puls Invertido

As vazões resultantes já incluem o efeito da evaporação, precipitação e contribuição subterrânea. Na Figura 5.10 está o gráfico estimado dos níveis na lagoa com o ajuste deste método alternativo. A curva verde representa os níveis reais e a curva vermelha os níveis simulados. A aderência ($R^2 = 99,7\%$) foi considerada boa, assim as condições de contorno da Figura 5.8 foram definidas para atuar junto com o vento nas simulações hidrodinâmicas com o modelo bidimensional.

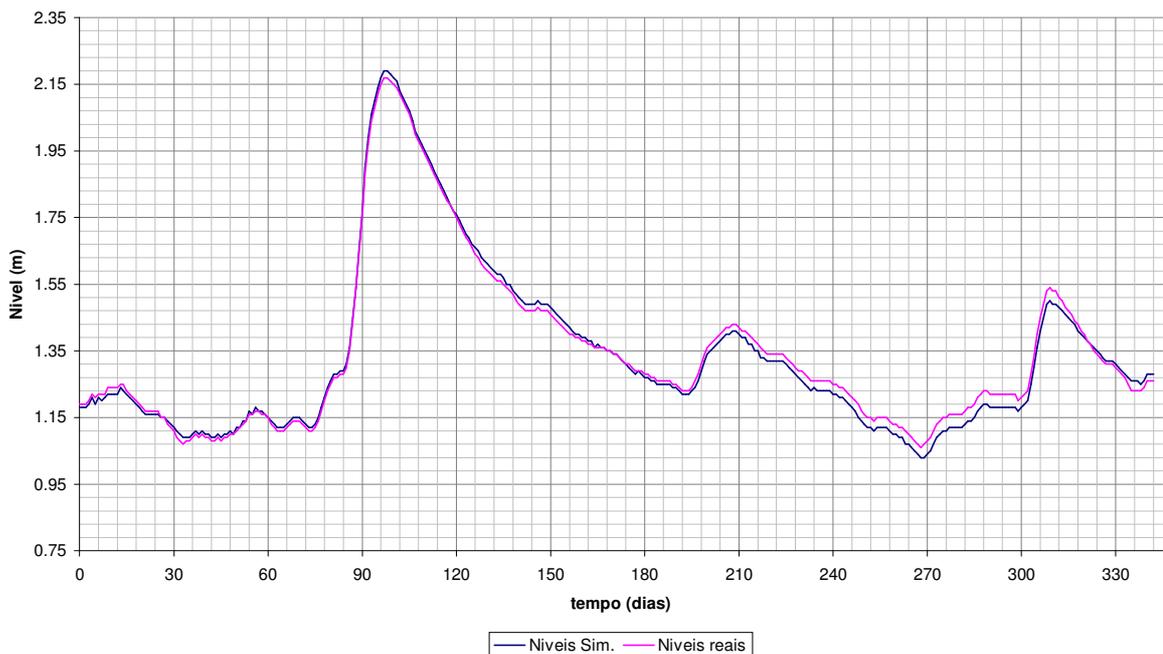


Figura 5.10 Níveis reais e simulados para o ano de 1999 através do Método de Puls Invertido

Depois de definida a vazão de entrada, estudou-se também o efeito da água subterrânea no comportamento da hidrodinâmica da lagoa, que será explicado logo em seguida. Para isso foram utilizadas de dados coletados para o estudo da ECOPLAN (1997).

Através da equação de Darcy encontrou-se um valor de recarga total de $0,58 \text{ m}^3/\text{s}$ que corresponde a aproximadamente 3% da vazão média de entrada encontrada. A baixa recarga deve-se ao fato de que próximo à lagoa o tipo de solo é principalmente composto de argila.

Os valores da condutividade hidráulica, K , foram fixados através de testes de bombeamento feitos em campo no estudo da ECOPLAN (1997). Na Tabela 5.5 têm-se os valores medidos em campo.

Tabela 5.5 Valores de altura do lençol freático e condutividade hidráulica coletados em campo (fonte: ECOPLAN, 1997)

Pontos	K (m/dia)	dx	24/07/1996	06/08/1996	15/08/1996	22/08/1996	30/09/1996	31/10/1996
			H (m)					
P0	5.6	0	1.16	1.09	1.12	1.92	2.01	2.22
P1	5.6	48	1.32	1.08	1.48	1.32	1.95	2.24
P2	5.6	531	1.38	1.29	1.63	1.41	2	2.19
P3	5.6	1305	3.37	3.26	3.46	3.36	3.58	3.52
P4	3.6	1791	5.35	5.27	5.55	5.41	5.68	5.61
P5	3.6	2443	6.73	6.61	6.98	6.81	7.04	6.69
P6	3.6	3247	7.49	7.36	7.74	7.55	7.91	7.79

O ponto P0 corresponde à lagoa, enquanto que P6 corresponde ao cume do domo de água conforme Figura 5.11.

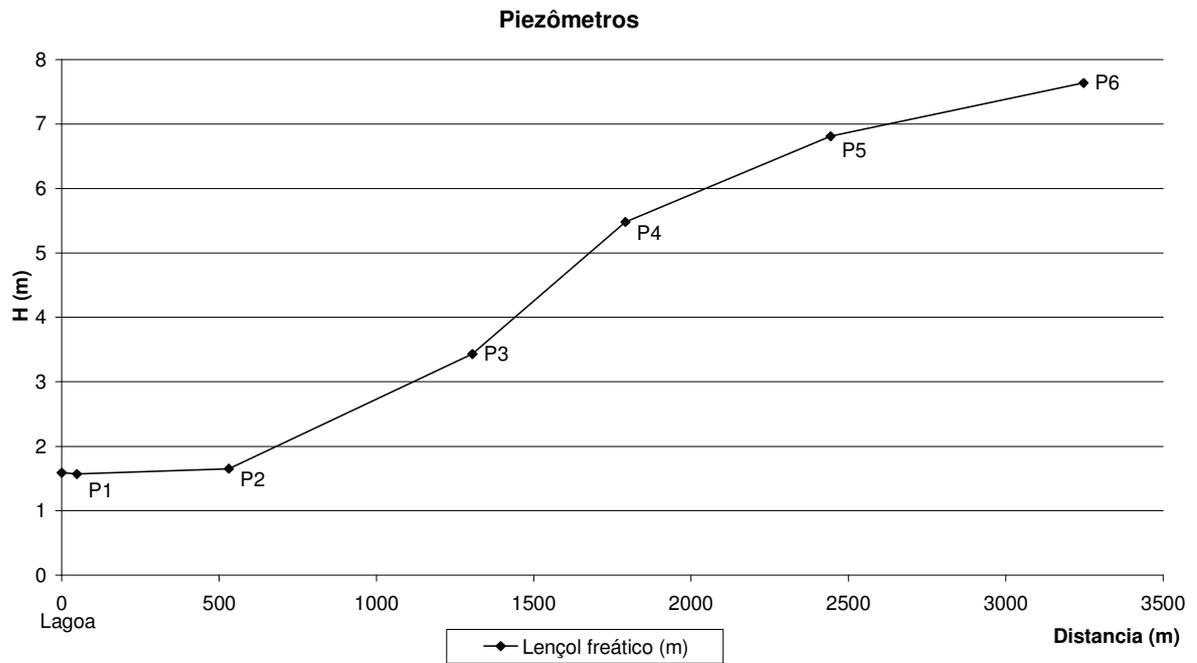


Figura 5.11 Pontos de coleta para quantificação da recarga

Com as vazões definidas rodou-se o modelo hidrodinâmico. Ainda há que ressaltar que a vazão de entrada foi separada proporcionalmente entre os rios de entrada e correspondem respectivamente a 90% e 10% para os rios Três Forquilhas e rio Cardoso, em função de suas áreas.

5.3 SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS

Após a calibração foram definidos os seguintes parâmetros :

1. Coeficiente de Chezy constante e igual a 60 ($L^{1/2}T^{-1}$);
2. Coeficiente de ajuste do vento igual a 4,2E-06 (adimensional);
3. Coeficiente de dissipação turbulenta igual a 10 (L^2T^{-1}).

O coeficiente de Chezy foi adotado como constante por falta de dados reais que comprovem o tipo de fundo e como ele varia na lagoa, dada a dificuldade de encontrar na bibliografia valores de rugosidades referentes a lagoas. O valor utilizado é um valor médio e que corresponde a um coeficiente de Manning de aproximadamente 0,020 ($L^{1/3}T$).

O coeficiente de ajuste do vento varia de 1,5E-06 a 4E-06 e o coeficiente de dissipação turbulenta varia de 0 a 20, segundo Borche (1986).

Foram feitas duas simulações, sendo que a diferença entre elas foi o ponto de observação do vento, ou seja, para uma simulação foi considerado o vento da torre central e na outra da torre norte. As correlações da torre norte foram melhores e os gráficos referentes a esta torre são apresentadas nas Figura 5.12, Figura 5.13, Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16.

Para a torre central os valores de correlação foram de 97,41%; 98,45%; 91,91%; 98,51% e 99,15% respectivamente para o sul, centro, norte, média e média móvel. Enquanto que para a torre norte os valores foram de 97,75%; 98,47%; 93,15%; 98,58% e 99,2%. Portanto, a torre norte apresentou resultados semelhantes ao da torre central. Apesar dessas pequenas diferenças optou-se pela torre norte por apresentar menor quantidade de falhas.

5.3.1 NÍVEIS SIMULADOS

Para todas as figuras foi utilizado o desvio padrão (cor verde) para assinalar os erros entre níveis observados e calculados. A cor azul representa o valor calculado e a cor magenta representa os valores simulados.

A Figura 5.12 representa os valores médios dos níveis simulados e a média móvel dos níveis reais (média horizontal das três torres) e suas diferenças. Demonstra a precisão do balanço hídrico feito pelo modelo hidrodinâmico, confirmando sua capacidade de bem reproduzir variações volumétricas no interior da lagoa Itapeva.

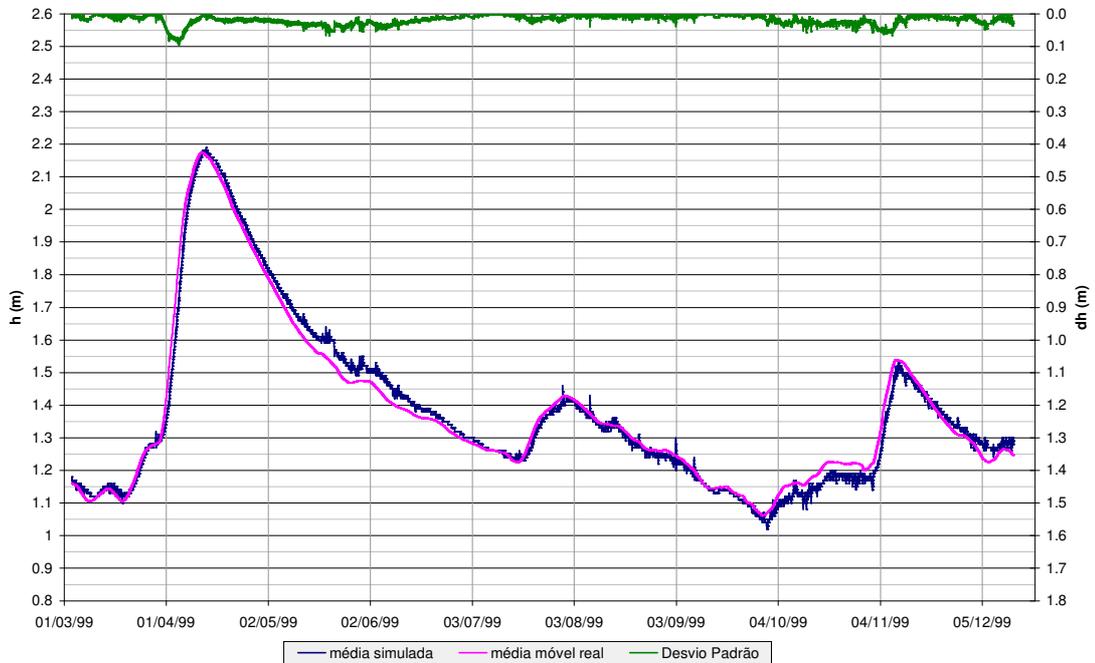


Figura 5.12 Níveis médios simulados e média móvel real para a lagoa Itapeva durante o ano de 1999

A correlação (R^2) entre a média móvel real e a média calculada foi de 99,20%. O desvio padrão médio tem valor de 1,7 cm.

A Figura 5.13 representa os valores médios dos níveis, tanto o real (média horizontal das três torres) como o simulado e sua diferença. Nota-se já oscilações devido ao vento, mas como representam médias de toda extensão da lagoa, há amortecimentos significativos. De qualquer forma mostra uma boa aderência entre o calculado e o observado.

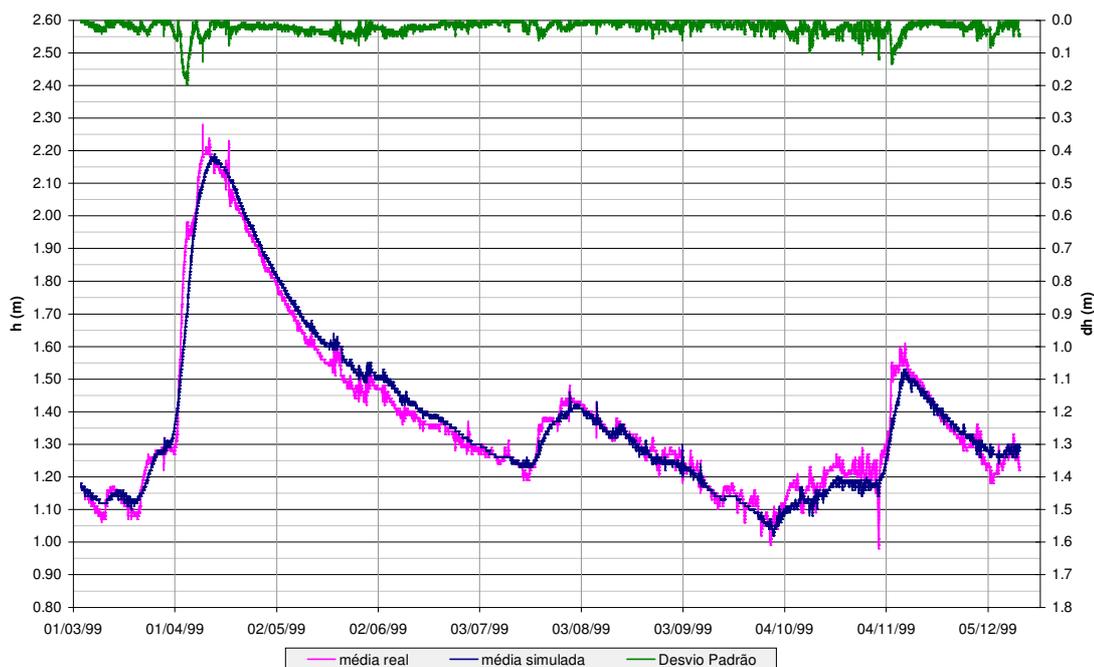


Figura 5.13 Níveis médios simulados e reais para a lagoa Itapeva durante 1999

A correlação (R^2) entre os níveis médios reais e níveis médios calculados foi de 98,58%. O desvio padrão médio teve valor de 2,2 cm.

Nas Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16 se encontram as comparações entre os níveis reais e os simulados para as torres norte, centro e sul na lagoa. Descontando-se os períodos de lacuna e mau funcionamento dos aparelhos (por exemplo, note período de setembro e outubro do linígrafo da torre norte), é visível que o modelo hidrodinâmico consegue reproduzir bem a variação de níveis. Reproduz com boa fidelidade o caráter oscilatório impulsionado pelo vento, além do balanço hídrico. Há episódios bem claros, especialmente no contraste da Figura 5.14 (torre norte) com a Figura 5.16 (torres sul) de oscilações com elevação de níveis ao norte e abaixamento concomitante ao sul, que o modelo simula com realismo.

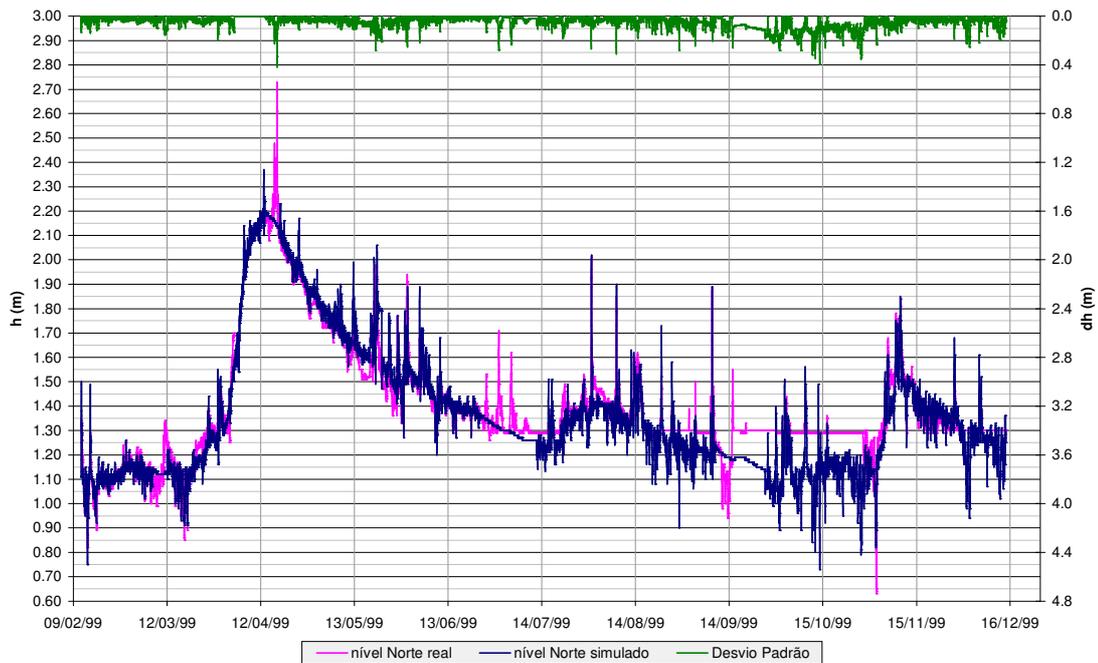


Figura 5.14 Gráfico da região Norte da lagoa Itapeva durante o ano de 1999

A correlação (R^2) encontrada entre os níveis reais e medidos para a região norte (Figura 5.14) foi de 93,15%. O desvio padrão médio tem valor de 4,9 cm.

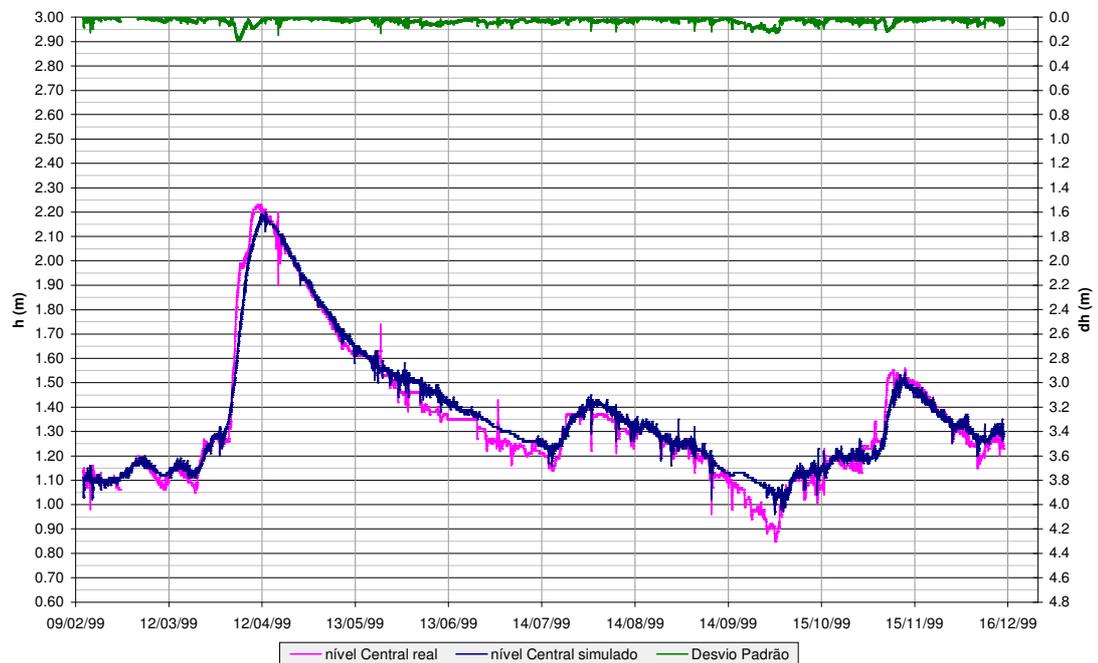


Figura 5.15 Gráfico da região Central da lagoa Itapeva durante o ano de 1999

A correlação (R^2) encontrada entre os níveis reais e medidos para a região central (Figura 5.15) foi de 98,47%. O desvio padrão médio tem valor de 2,9 cm.

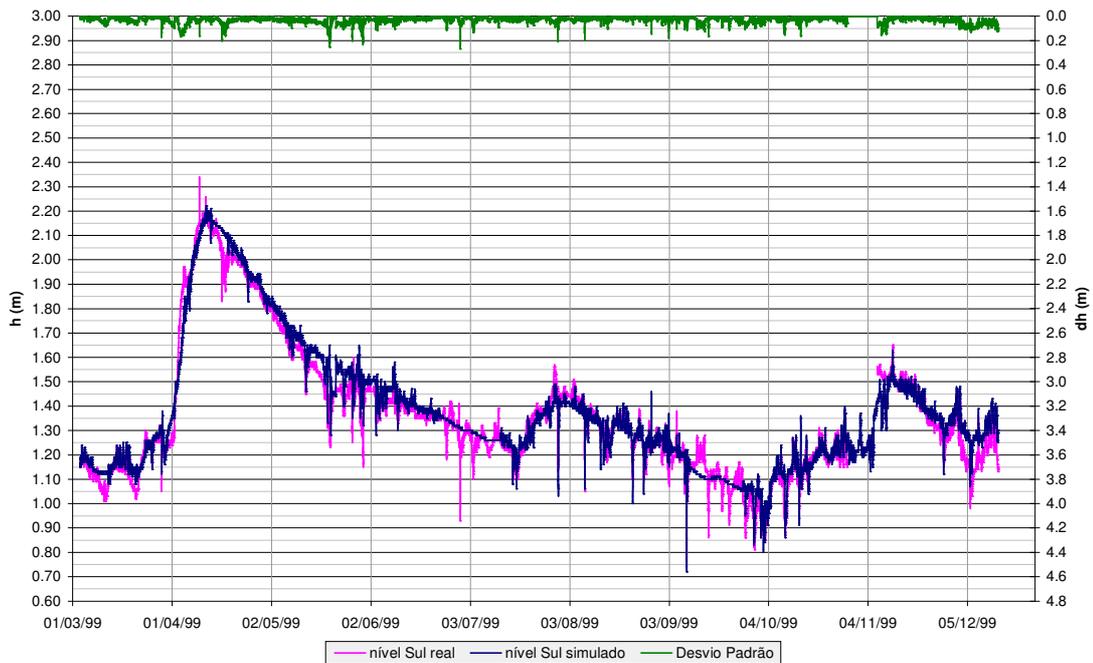


Figura 5.16 Gráfico da região Sul da lagoa Itapeva durante o ano de 1999

A correlação (R^2) encontrada entre os níveis reais e medidos para a região sul (Figura 5.16) foi de 97,74%. O desvio padrão médio tem valor de 3,1 cm.

Estas correlações demonstram o bom comportamento do programa IPH-A para a simulação dos níveis na lagoa Itapeva. Uma confirmação adicional é feita com a análise das seiches observadas e calculadas pelo modelo, conforme item seguinte.

Na Figura 5.17 estão marcadas as campanhas de coleta em função da variação do nível, de modo a mostrar sua representatividade na variação do nível durante o ano de 1999. A primeira campanha está posicionada no nível mais baixo da lagoa durante este ano e com ventos moderados quando comparadas as demais campanhas, a segunda campanha aparece na depleção dos níveis após um período de chuvas intensas com rajadas de ventos mais fortes, a terceira campanha também aparece numa depleção e nesta campanha observam-se ventos fortes e mais constantes do que nas demais campanhas. Desta maneira verifica-se que nenhuma destas campanhas se posicionou na ascendente dos níveis o que pode implicar em não se saber se existe um comportamento distinto durante este período na influência da hidrodinâmica na variação dos sólidos suspensos e turbidez.

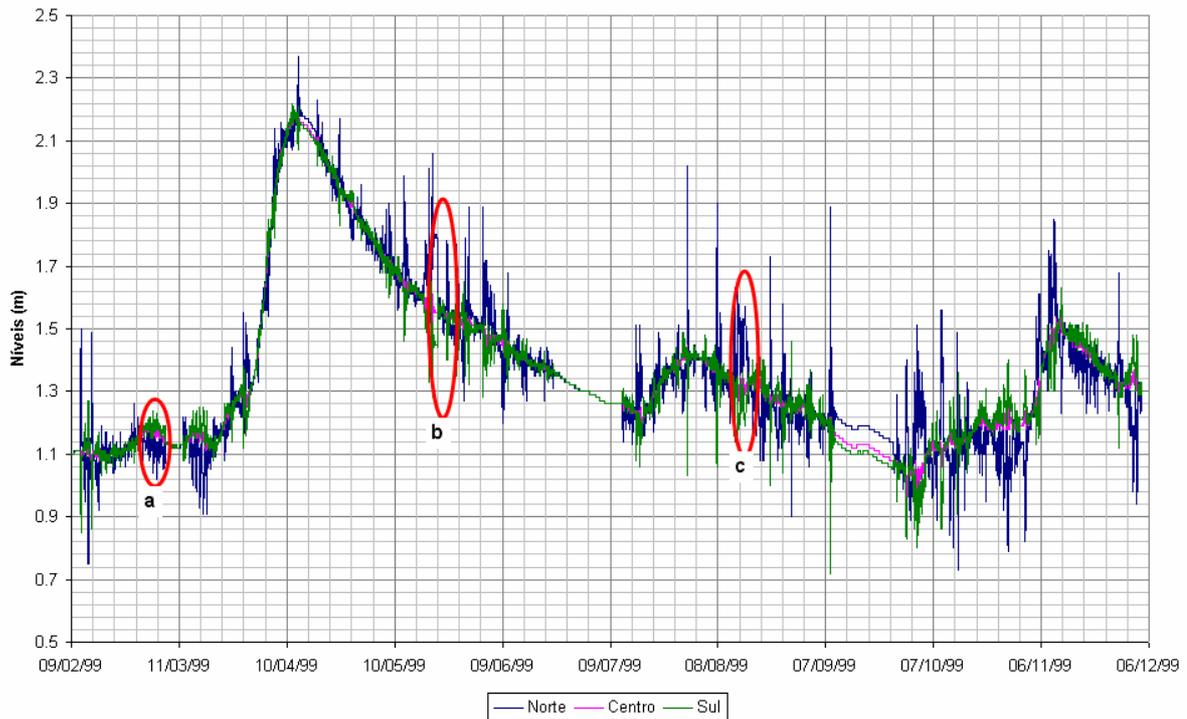


Figura 5.17 Posição das campanhas de amostragem durante a variação do nível da lagoa Itapeva no ano de 1999. a) 1ª Campanha – 02/03 a 07/03, b) 2ª Campanha – 21/05 a 26/05, c) 3ª Campanha – 14/08 a 19/08

5.3.2 SEICHES

Para o estudo das seiches na lagoa foram escolhidos quatro cortes (ver Figura 5.18), sendo um corte para cada região (sul, centro e norte) e um corte na direção de maior comprimento (eixo maior).

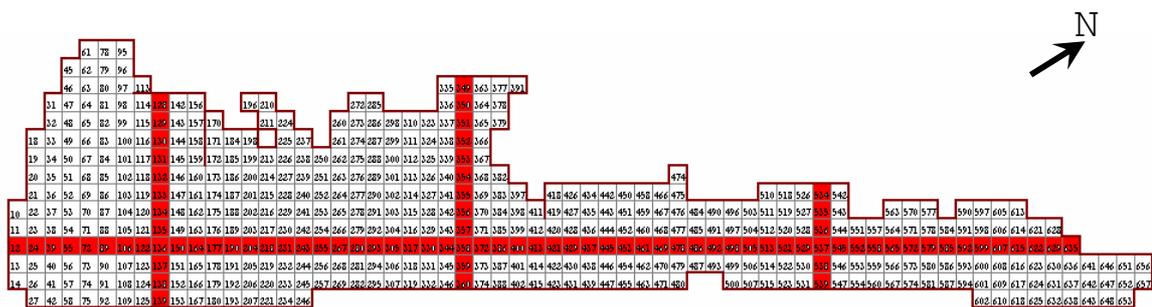


Figura 5.18 Cortes na lagoa Itapeva para estudo das seiches

Tanto nos corte transversais ou “verticais” (pela disposição da Figura 5.18), como no longitudinal ou “horizontal” foram verificadas a ocorrência das seiches, mesmo que pequenas. As Figura 5.19 a Figura 5.23 mostram estas variações, os lugares assinalados nos gráficos correspondendo a períodos com falhas de dados.

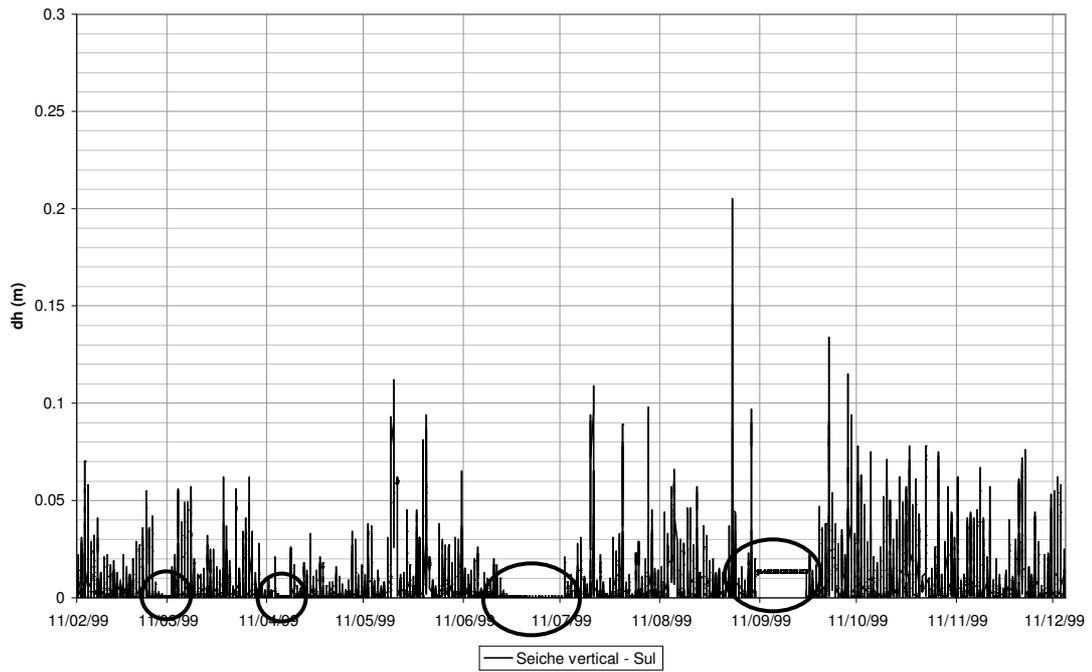


Figura 5.19 Diferença de nível na lagoa Itapeva da seiche transversal (vertical) calculada para o ponto Sul durante o ano de 1999. As elipses representam falhas nos dados de nível

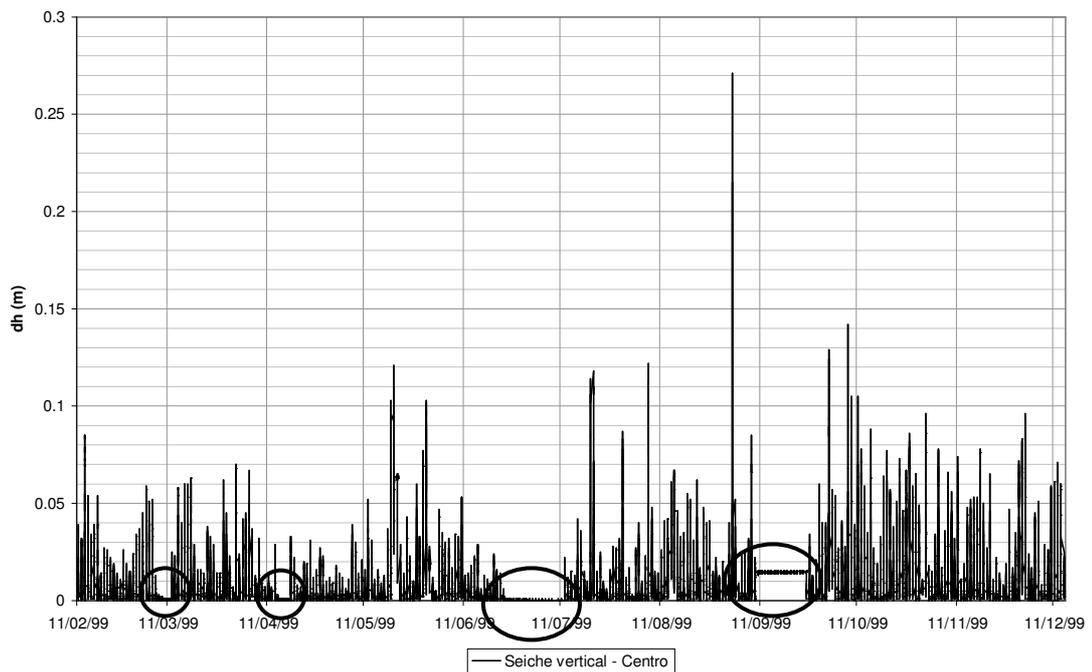


Figura 5.20 Diferença de nível na lagoa Itapeva da seiche transversal (vertical) calculada para o ponto Central durante o ano de 1999. As elipses representam falhas nos dados de nível

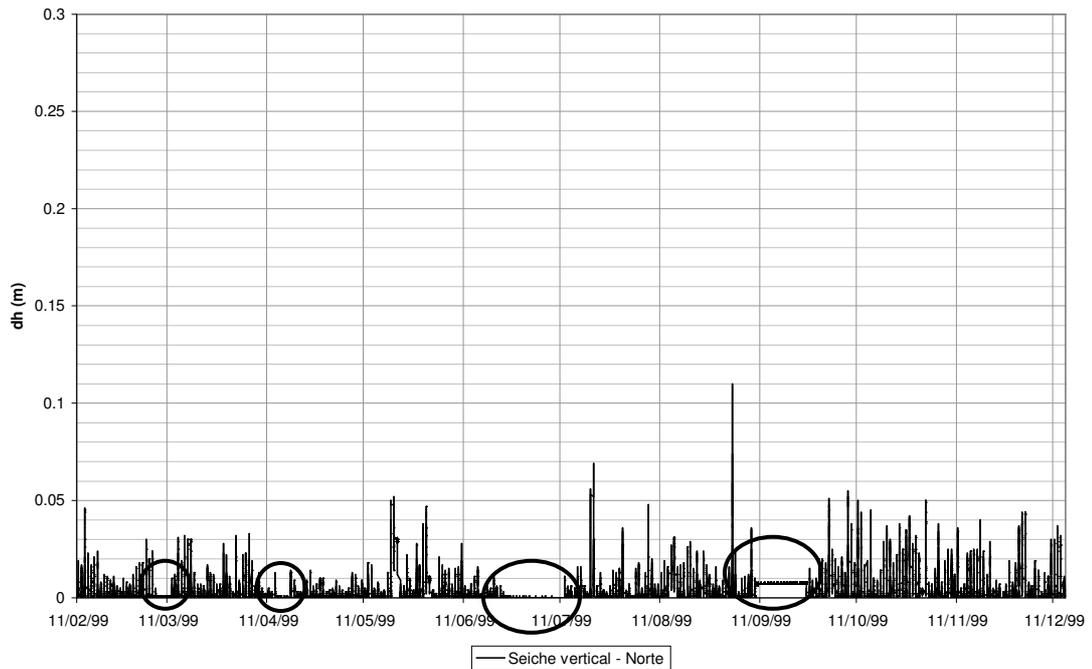


Figura 5.21 Diferença de nível na lagoa Itapeva da seiche transversal (vertical) calculada para o ponto Norte durante o ano de 1999. As elipses representam falhas nos dados de nível

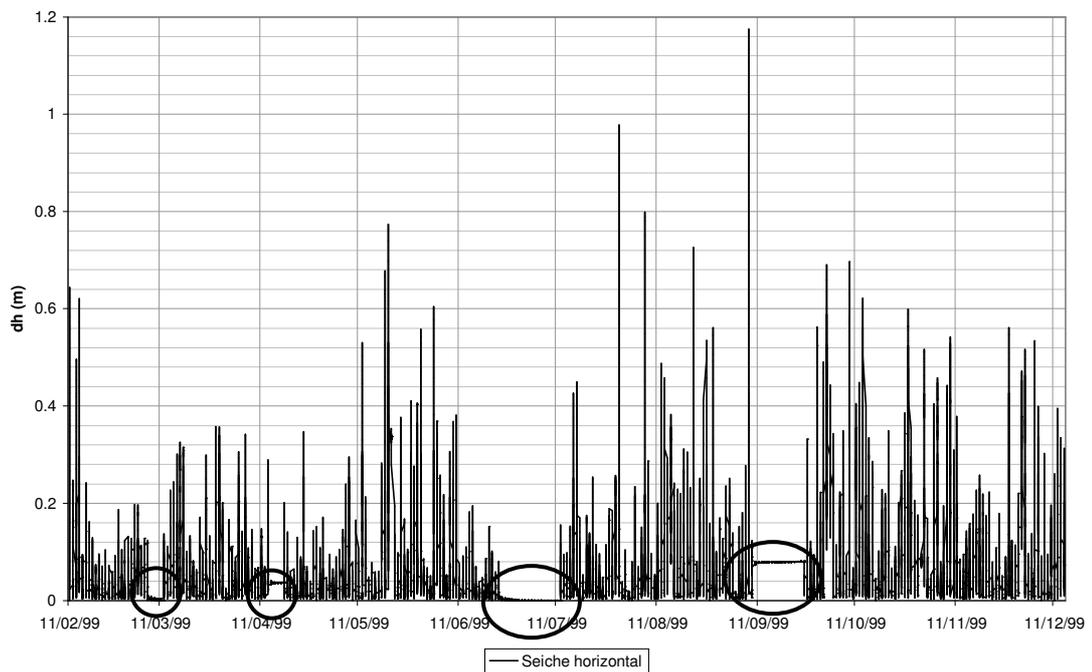


Figura 5.22 Diferença de nível na lagoa Itapeva da seiche longitudinal (horizontal) calculada durante o ano de 1999. As elipses representam falhas nos dados de nível

A seiche longitudinal simulada teve seu máximo em 08/09/1999 e seu valor foi de 1,175 metros, sendo que o nível mais baixo foi ao sul da lagoa e o mais alto no norte.

Através das medições de níveis nas torres foi também encontrada a ocorrência das seiches. A Figura 5.23 mostra a diferença de níveis com dados reais. Deve-se ainda ressaltar que estes pontos não estão alinhados, por isso se obtêm um valor aproximado. Todas as torres estão próximas à margem esquerda (leste) da lagoa e não se pôde verificar a ocorrência das seiches verticais reais.

Com os valores reais, sentido longitudinal, foram calculadas as seiches máximas entre cada ponto de coleta, a nomenclatura utilizada para as seiches foi: seiche N-S corresponde ao norte com o nível mais alto e sul com o mais baixo, que será diferente da seiche S-N, onde o ponto sul terá nível mais alto (Tabela 5.6). Observou-se que as seiches aumentam de magnitude de sul para norte.

Tabela 5.6 Desníveis máximos com dados reais entre os pontos de coleta na lagoa Itapeva

	N-S	S-N	N-C	C-N	C-S	S-C
Seiche (m)	1,12	0,38	0,85	0,31	0,40	0,20
Data	08/09/1999	17/03/1999	08/09/1999	17/03/1999	29/06/1999	05/09/1999

Apesar da predominância dos ventos entre os quadrantes NE e SO, e às vezes os ventos do quadrante NE serem predominantes, os ventos do quadrante SO são mais fortes. Este fato pode ser confirmado nas rosas dos ventos apresentadas e verifica-se na Tabela 5.6 diferenças nas seiches quando os ventos trocam de direção.

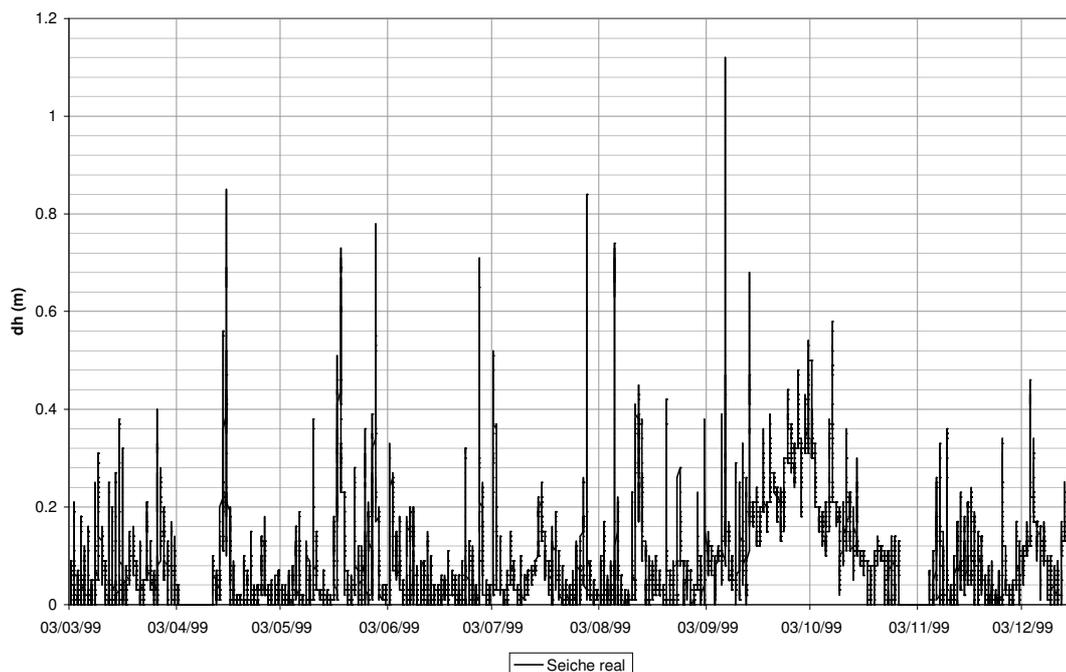


Figura 5.23 Diferença de nível na lagoa Itapeva da seiche real durante o ano de 1999

Comparando as duas últimas figuras obtêm-se a Figura 5.24 pode-se observar uma coerência entre as seiches reais e as calculadas pelo modelo hidrodinâmico.

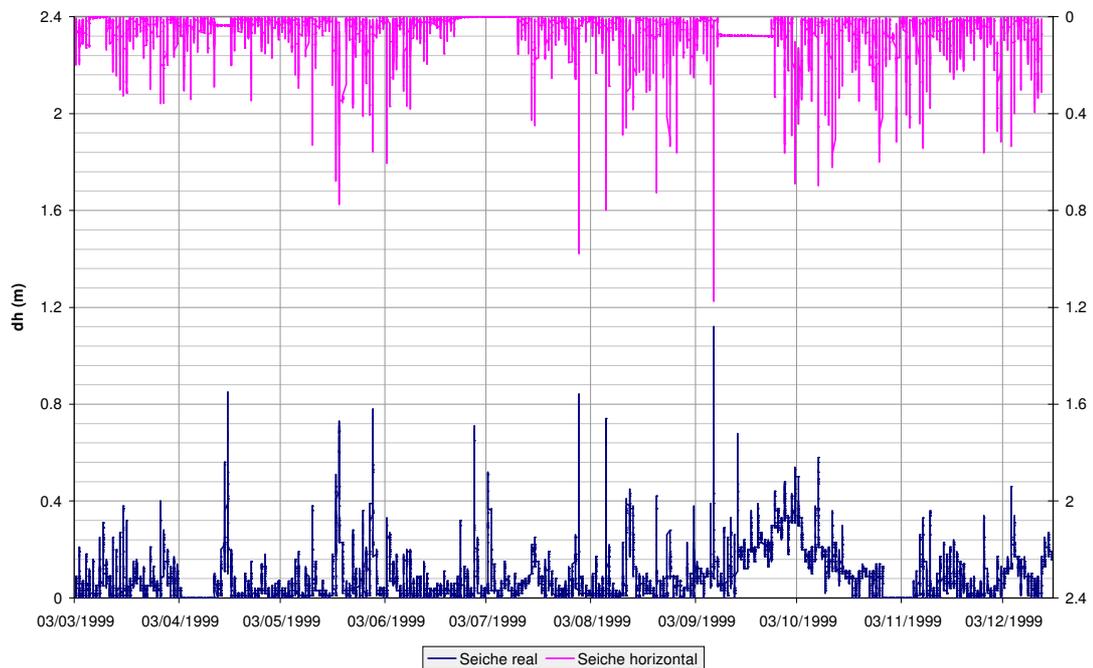


Figura 5.24 Comparação da diferença de nível na lagoa Itapeva causada pela seiche durante o ano de 1999

Focando-se o período da seiche longitudinal verificou-se também o desempenho do modelo hidrodinâmico frente aos valores de uma equação empírica, normalmente utilizada para avaliar esse tempo. O período calculado de forma empírica está baseado numa forma retangular de lago e corresponde a:

$$T_s = \frac{1}{no} \frac{2.L}{\sqrt{g.h_m}}$$

onde:

T_s – período da seiche (s);

no – número de nós (unimodal, bimodal, etc);

L – comprimento da lagoa (m);

g – gravidade ($9,81\text{m/s}^2$);

h_m – profundidade média (m).

Através de um dos programas criados visualizou-se a ocorrência da seiche e observou-se que ela é unimodal, portanto *no* equivale a um. Considerando L igual a 32 km e a profundidade média de 1,5 metros obteve-se um período de aproximadamente 4 horas e 38 minutos. Já o valor encontrado através da análise dos dados foi um período médio de 4 horas e 55 minutos, neste valor estão incluídos a frequência natural da lagoa e a atuação do vento.

Na Figura 5.25 pode-se verificar através da frequência acumulada que a simulação hidrodinâmica responde diferente para desníveis inferiores a 5 cm e entre 6 cm a 18 cm. Pela frequência acumulada a lagoa tem desnível inferior a 5 cm durante 165 dias (47,9%) dos 344 dias simulados para as medidas reais e 205 dias (59,5%) para as medidas calculadas. Enquanto que para o intervalo de 6 cm a 18 cm têm duração de 134 dias (39%) dos 344 dias simulados para os dados reais e 97 dias (28,1%) para os dados calculados. Ao calcular as diferenças de porcentagem entre os valores medidos e calculados pode-se dizer que os valores calculados permanecem 11,6% de tempo a mais que os valores reais para os desníveis inferiores a 5 cm e que para os desníveis entre 6 cm e 18 cm os valores reais permanecem 10,9% a mais de tempo que os valores medidos. Ao analisar estas diferenças de comportamento concluiu-se que o modelo hidrodinâmico responde mais rápido aos efeitos do vento do que realmente acontece (ver Figura 5.26) quando observado em escala de tempo diária.

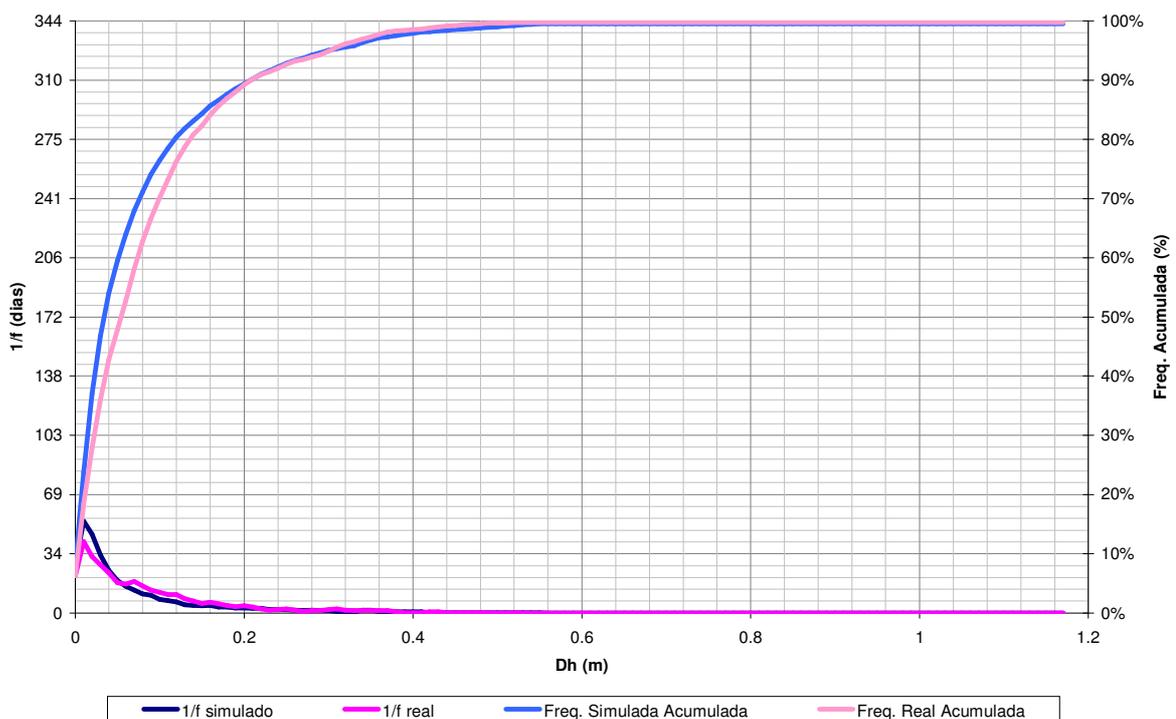


Figura 5.25 Frequência dos desníveis reais e simulados e sua frequência acumulada para a seiche longitudinal durante o ano de 1999 na lagoa Itapeva

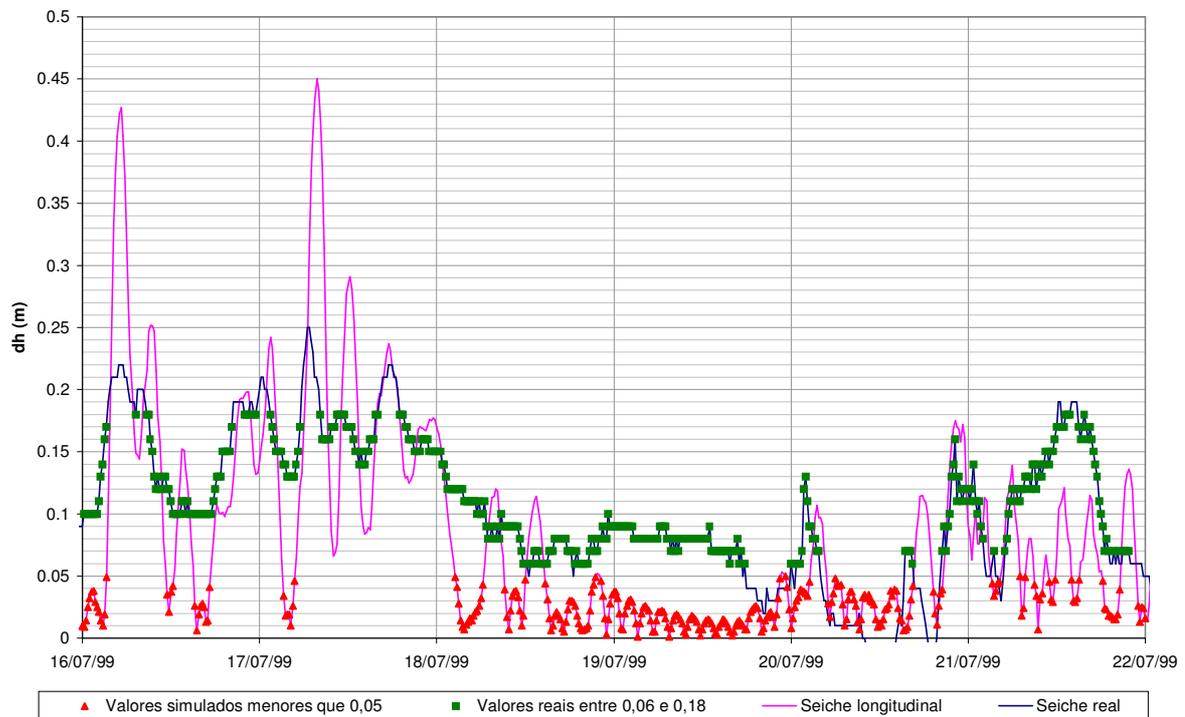


Figura 5.26 Comparação da resposta do modelo hidrodinâmico com os dados reais ao efeito do vento para a lagoa Itapeva

Na Figura 5.26 tem-se um período aleatório retirado da simulação e comparado com os dados reais medidos em campo. Esta figura mostra que a variação dos níveis de água da lagoa Itapeva é mais rápida na modelagem do que na realidade, ocasionando a diferenças de frequências comentadas acima.

Com isso, obteve-se uma espécie de comprovação da existência de uma seiche importante na lagoa Itapeva, e pode-se dizer que o vento amplifica ou reduz o efeito dessa seiche, além de ser uma das fontes principais na ocorrência das seiches nesta lagoa. Neste estudo não foi possível estimar quanto pode corresponder à seiche natural e quanto à seiche causada pelo vento.

É provável que a seiche, junto com os níveis e as ondas geradas pelo vento são fatores que favorecem a ressuspensão de partículas alterando de alguma maneira a concentração de sólidos suspensos e a turbidez.

5.3.3 CORRETOLOGIA

Uma vez considerado calibrado o modelo bidimensional torna-se capaz de gerar campos de velocidade média horizontal, sintetizadas a partir das forçantes de vento e vazão afluente. Para visualizar a correntologia que resulta, usou-se a estratégia de simular as trajetórias das bóias virtuais e fictícias “soltas” em células pré -selecionadas, para cada período sazonal. Na Figura 5.27 são mostrados os pontos (as células) de partida escolhidas para análise e representação da região correspondente, além da divisão (em verde) destas regiões (sul, centro e norte) da lagoa; e a localização dos rios afluentes (setas).

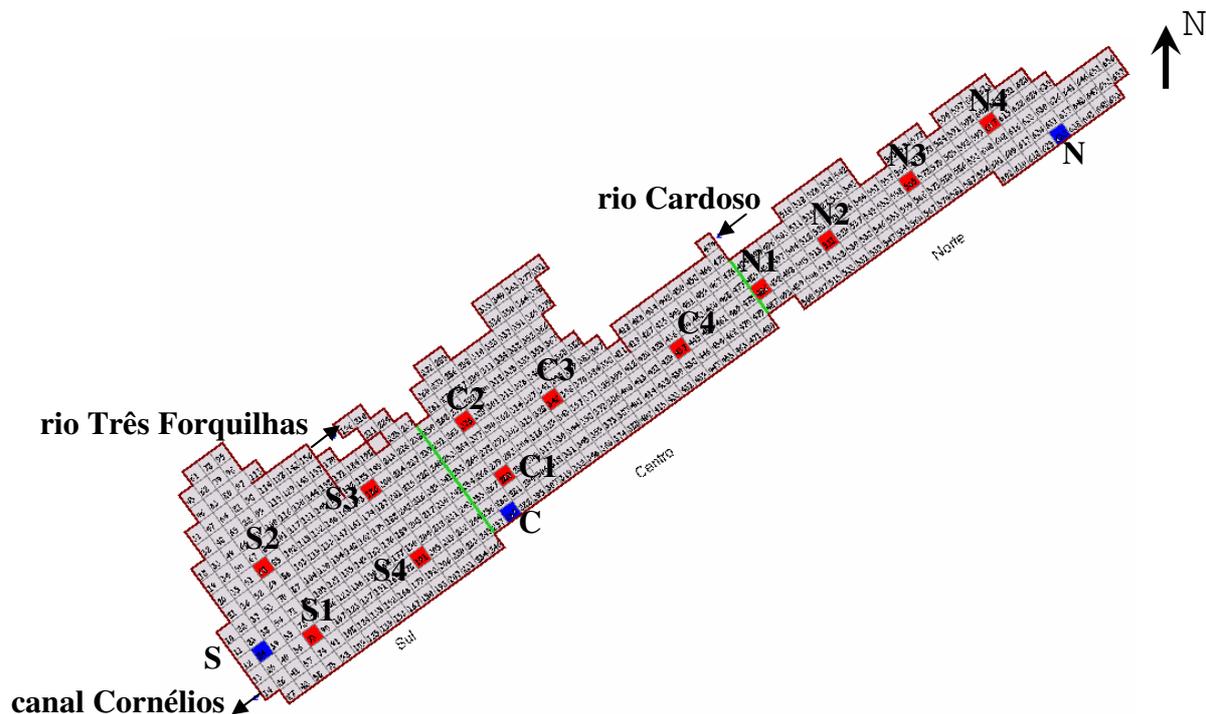


Figura 5.27 Localização dos pontos de estudo e divisão em regiões da lagoa Itapeva

A análise abrangeu cada período sazonal e região (sul, centro e norte). Em função das estações central e norte estarem muito próximas da margem o programa IPH-A faz com que nestes pontos a água apenas se desloque paralela à margem, portanto os valores de correntologia apresentam apenas direções paralelas à margem.

As figuras de correntologia (trajetórias das bóias virtuais) possuem a seguinte simbologia: o ponto verde representa o início da trajetória e o ponto vermelho o fim da trajetória. Sempre que a bóia fictícia chega próximo ao contorno da lagoa o traçado da trajetória termina, em razão disto algumas bóias não chegaram a demonstrar o comportamento da região em estudo e nestes casos as figuras correspondentes (a, b, c, d, e) foram suprimidas. No canto superior esquerdo está a localização dos pontos (i), em vermelhos os pontos

escolhidos e em azul os pontos das estações de coleta; na parte superior central está o gráfico do vento em função do tempo para a estação do ano selecionada (ii); e no canto superior direito está o rosa dos ventos para a estação do ano escolhida (iii). Os pontos das trajetórias (a, b, c, d, e) estão graficados com intervalos de 120 minutos e a malha da lagoa possui 500 metros, as setas indicam o sentido principal de deslocamento.

5.3.3.1 Verão – 04/01/1999 a 21/03/1999

Neste período o vento predominante foi ENE (18,1%), seguido de N, NNE e NE. O quadrante NE teve 58,5% dos ventos neste período, portanto a tendência natural é que ela leve a água para a região sul da lagoa. Os ventos mais fortes provêm de NNE e NE.

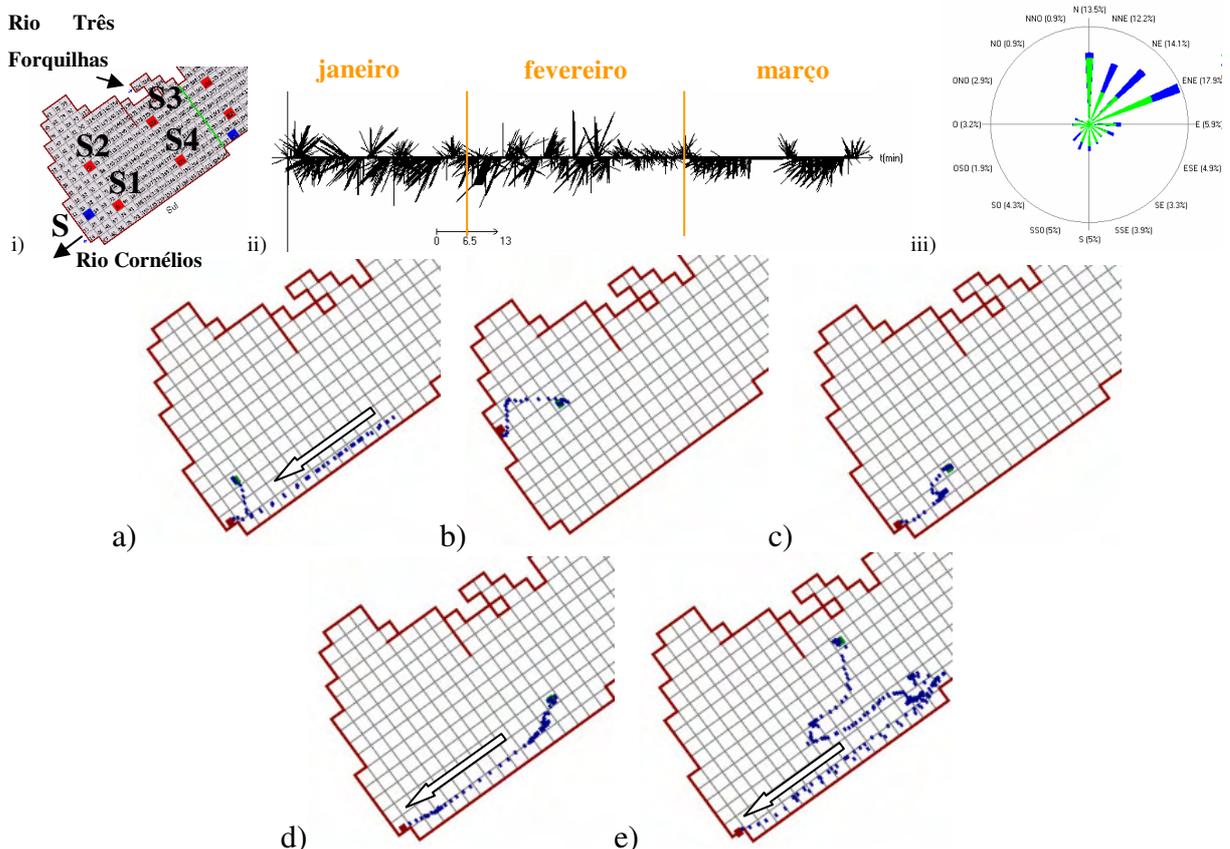


Figura 5.28 Correntologia da região Sul da lagoa Itapeva para o verão de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) S - 04/01 a 12/01, b) S1 - 04/01 a 09/01, c) S2 - 04/01 a 12/01, d) S3 - 04/01 a 14/01, e) S4 - 04/01 a 22/01

A tendência, como pode ser visto na Figura 5.28, é da água ir para o sul e ficar nesta região. A região central (ver Figura 5.29) se mistura com a região sul formando apenas

um bloco hidrodinâmico, com exceção da parte mais ao norte onde a lagoa começa a se estreitar.

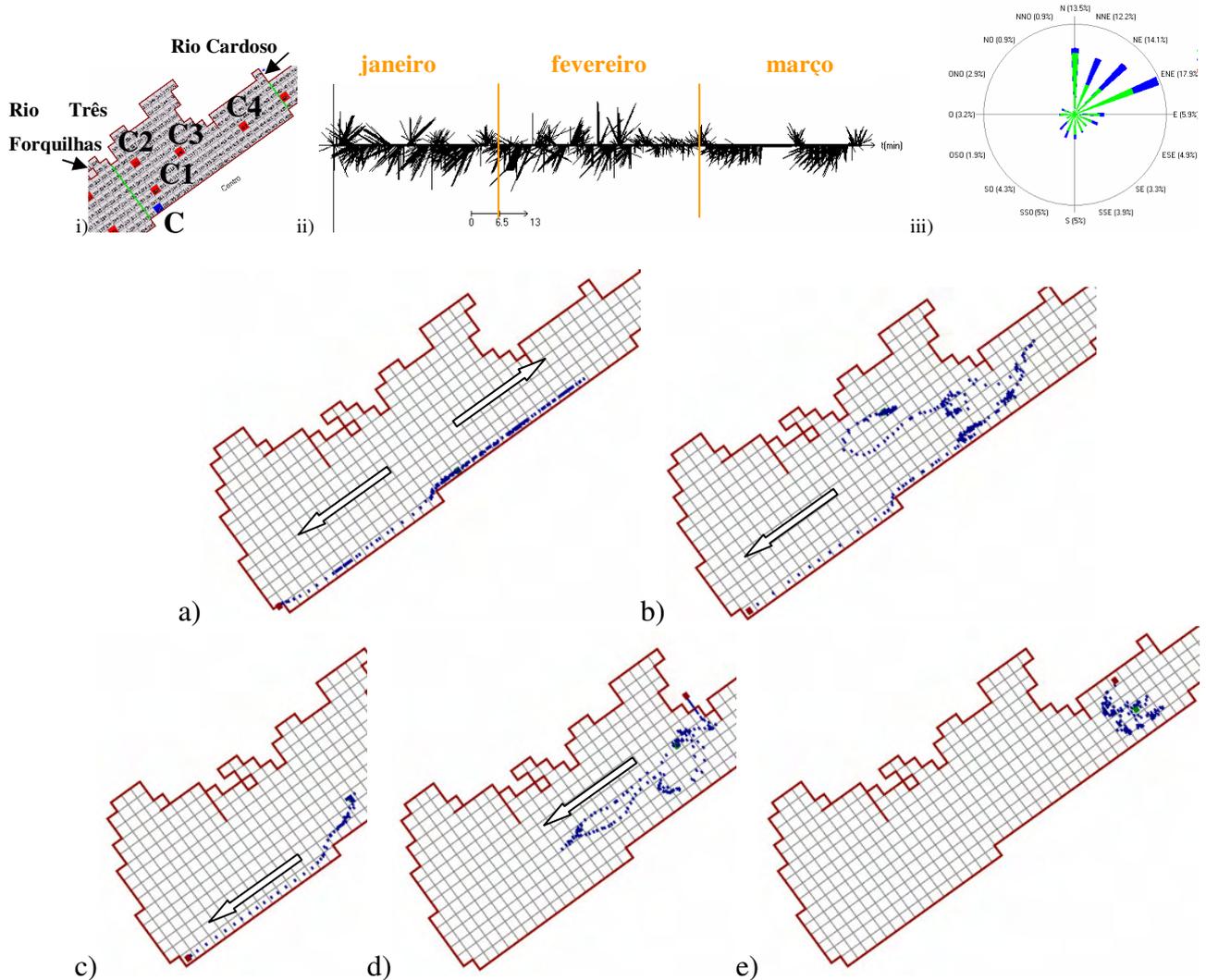


Figura 5.29 Correntologia da região Centro da lagoa Itapeva para o verão de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) C - 04/01 a 25/01, b) C1 - 04/01 a 27/01, c) C2 - 04/01 a 14/01, d) C3 - 04/01 a 22/01, e) C4 - 04/01 a 17/01

Na Figura 5.30 em c) têm-se a influência do vento que leva a água para a região central, mas em geral a tendência, como pode ser observado, é da água permanecer na região norte.

A tendência natural da região norte, por ela ser estreita, pela sua geomorfologia e não ter rios que aumentem ou modifiquem as correntes é da água se manter nesta região.

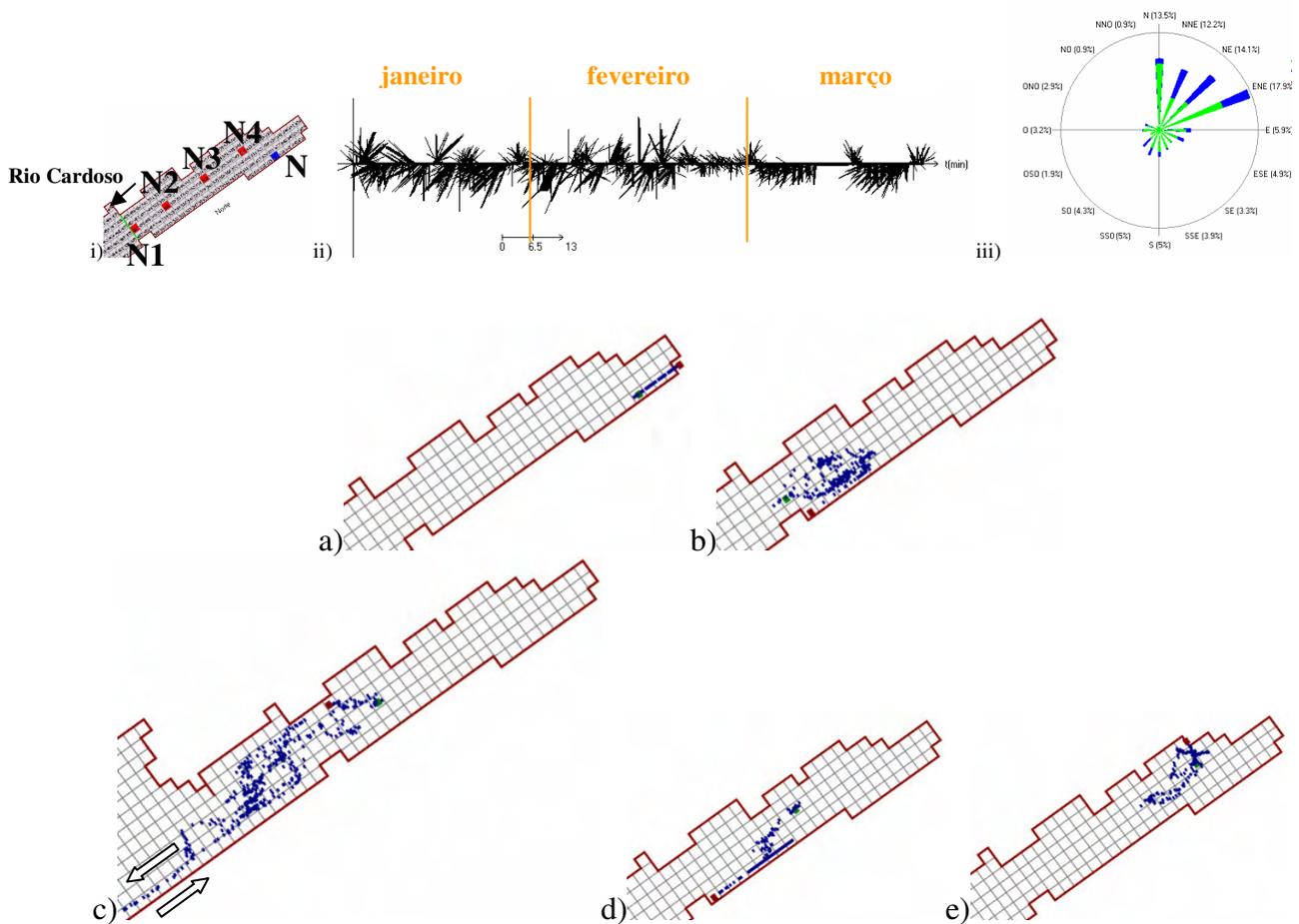


Figura 5.30 Correntologia da região Norte da lagoa Itapeva para o verão de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) N - 04/01 a 17/01, b) N1 - 04/01 a 27/01, c) N2 - 04/01 a 09/02, d) N3 - 04/01 a 25/01, e) N4 - 04/01 a 22/01

5.3.3.2 Outono – 22/03/1999 a 21/06/1999

Nesta época não existiu predominância de um vento e ocorreram as seguintes distribuições percentuais: N (18,5%), SSO (13,4%), S (11,4%), seguida de SO (9,5%). Entretanto, nesta mesma época houve grande quantidade de chuva que elevou o nível da lagoa em aproximadamente um metro. Com isso criou-se uma condição de fluxo de esvaziamento conforme a Figura 5.31. Apesar do vento norte ter tido maior persistência, foram os ventos do sul que tiveram maior intensidade.

Verificando-se as trajetórias na Figura 5.31, pode-se perceber que o percurso maior das trajetórias esteve no período do início do outono, final de março, e foi até meados de abril. Justamente nesta época os ventos não tiveram uma direção uniforme por um período longo, portanto as trajetórias não reproduziram os ventos mais fortes do quadrante SO.

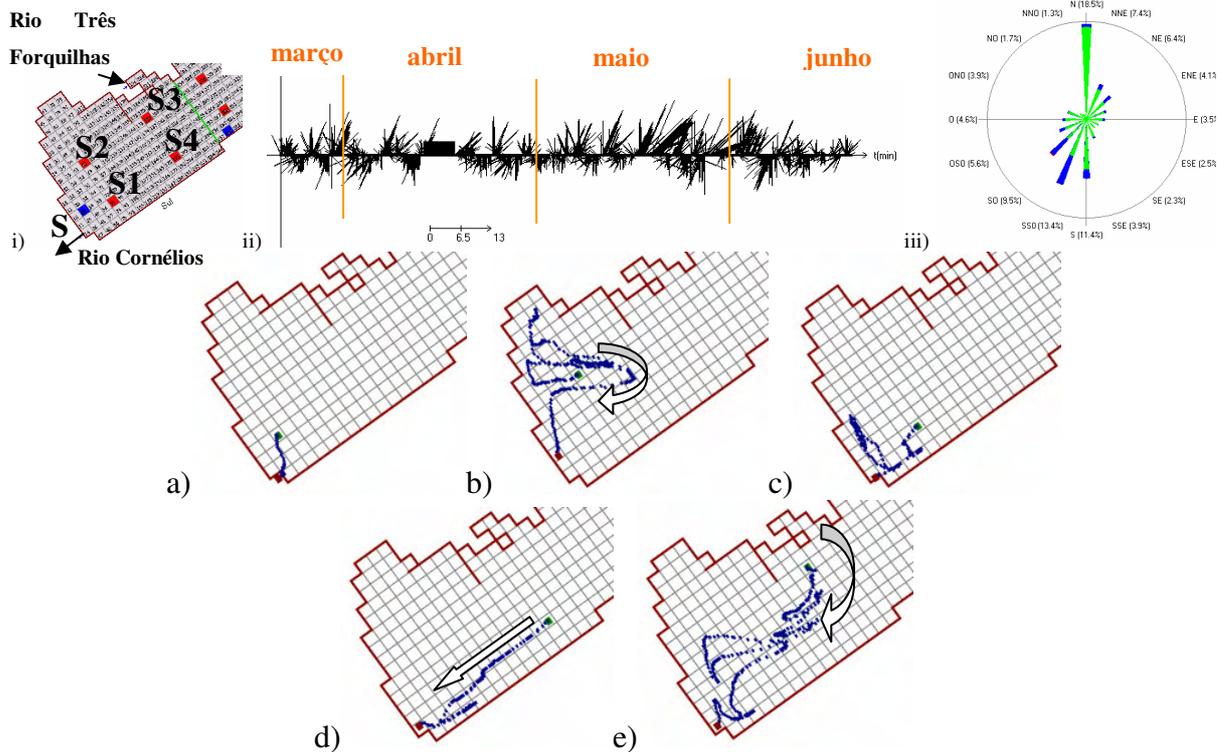


Figura 5.31 Correntologia da região Sul da lagoa Itapeva para o outono de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) S - 20/03 a 28/03, b) S1 - 20/03 a 15/04, c) S2 - 20/03 a 07/04, d) S3 - 20/03 a 02/04, e) S4 - 20/03 a 17/04

Conforme a Figura 5.32 b), d) e e) pode-se analisar o comportamento para quase todo o período do outono, onde não houve vento preponderante, portanto sem uma direção marcante como pôde-se ver no verão.

A região central, apesar de não ter uma direção preferencial, apresentou um escoamento mais rápido em direção ao norte da lagoa. Pode-se verificar através do distanciamento dos pontos graficados na Figura 5.32 principalmente nos itens b, d, e.

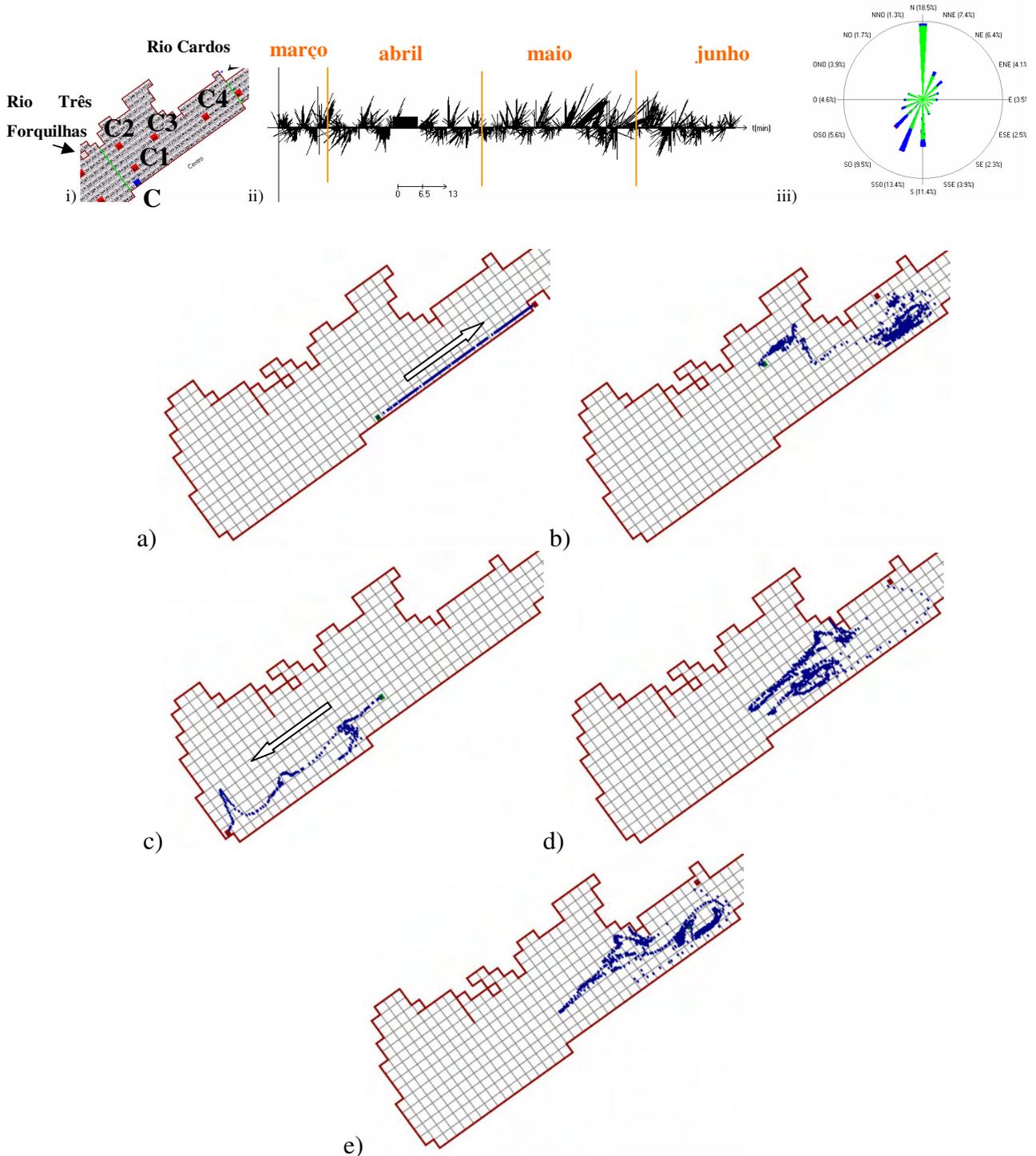


Figura 5.32 Correntologia da região Centro da lagoa Itapeva para o outono de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) C - 20/03 a 17/04, b) C1 - 20/03 a 03/06, d) C2 - 20/03 a 12/04, d) C3 - 20/03 a 26/05, e) C4 - 20/03 a 26/05

Na região norte (Figura 5.33), com exceção do ponto mais ao sul, independente da intensidade do vento e sua direção a tendência desta foi de manter-se nesta região. Talvez pelo ponto mais ao sul da região norte estar próximo ao exutório do rio Cardoso, este ponto esteja mais propenso a entrar em funcionamento com o restante da lagoa.

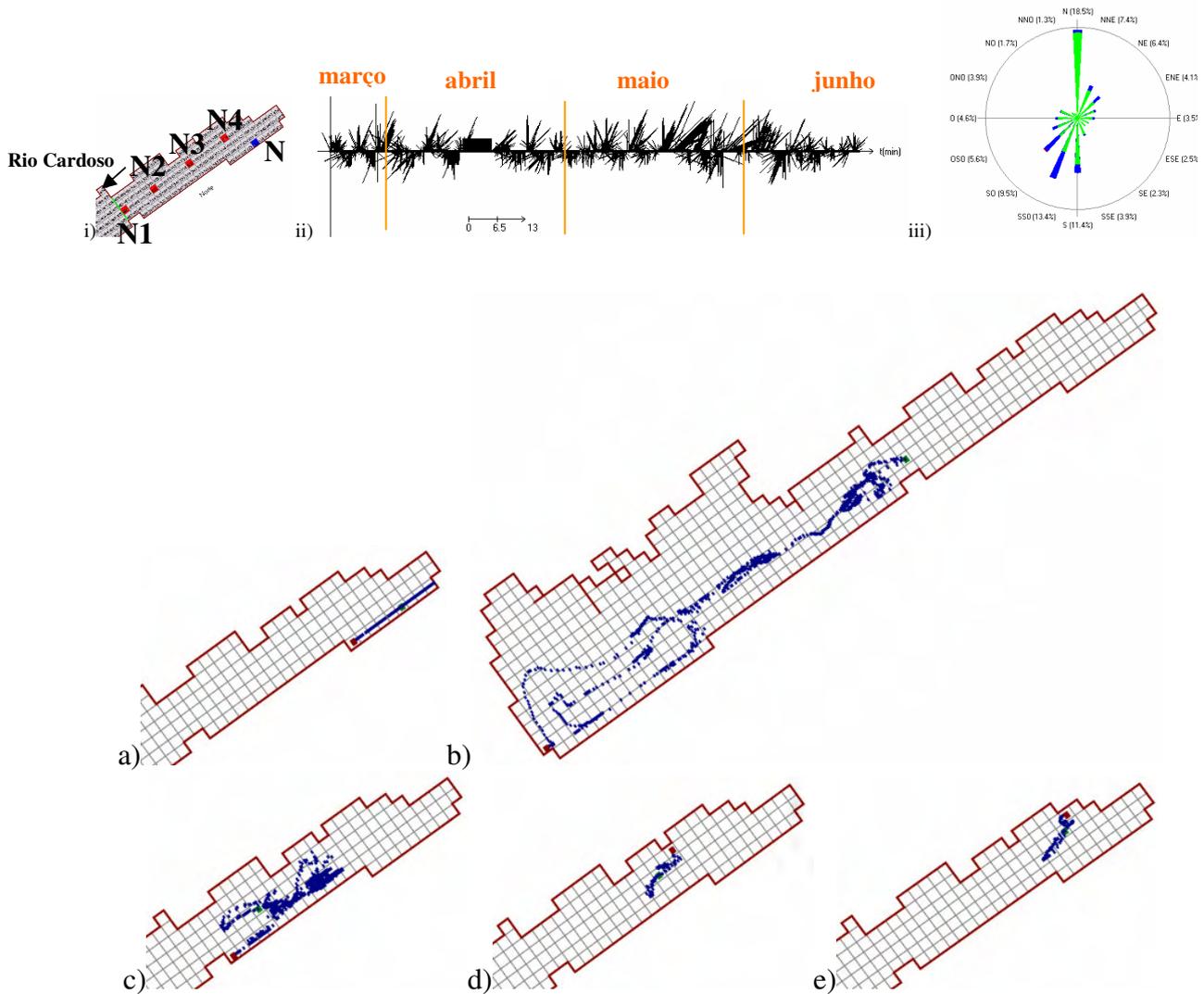


Figura 5.33 Correntologia da região Norte da lagoa Itapeva para o outono de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) N - 20/03 a 21/06, b) N1 - 20/03 a 11/06, c) N2 - 20/03 a 18/06, d) N3 - 20/03 a 02/04, e) N4 - 20/03 a 02/04

5.3.3.3 Inverno – 21/06/1999 a 22/09/1999

Aqui também não existiu direção predominante do vento e as de maior frequência foram as seguintes: S (17,4%), SO (16,1%), NE (16%), SSO (12,6%), seguida de NNE (12%). Neste período também não ocorreram chuvas de grandes proporções.

As rajadas de ventos mais fortes foram de SO e NNE que se evidenciaram na Figura 5.34 pela distância maior entre os pontos graficados.

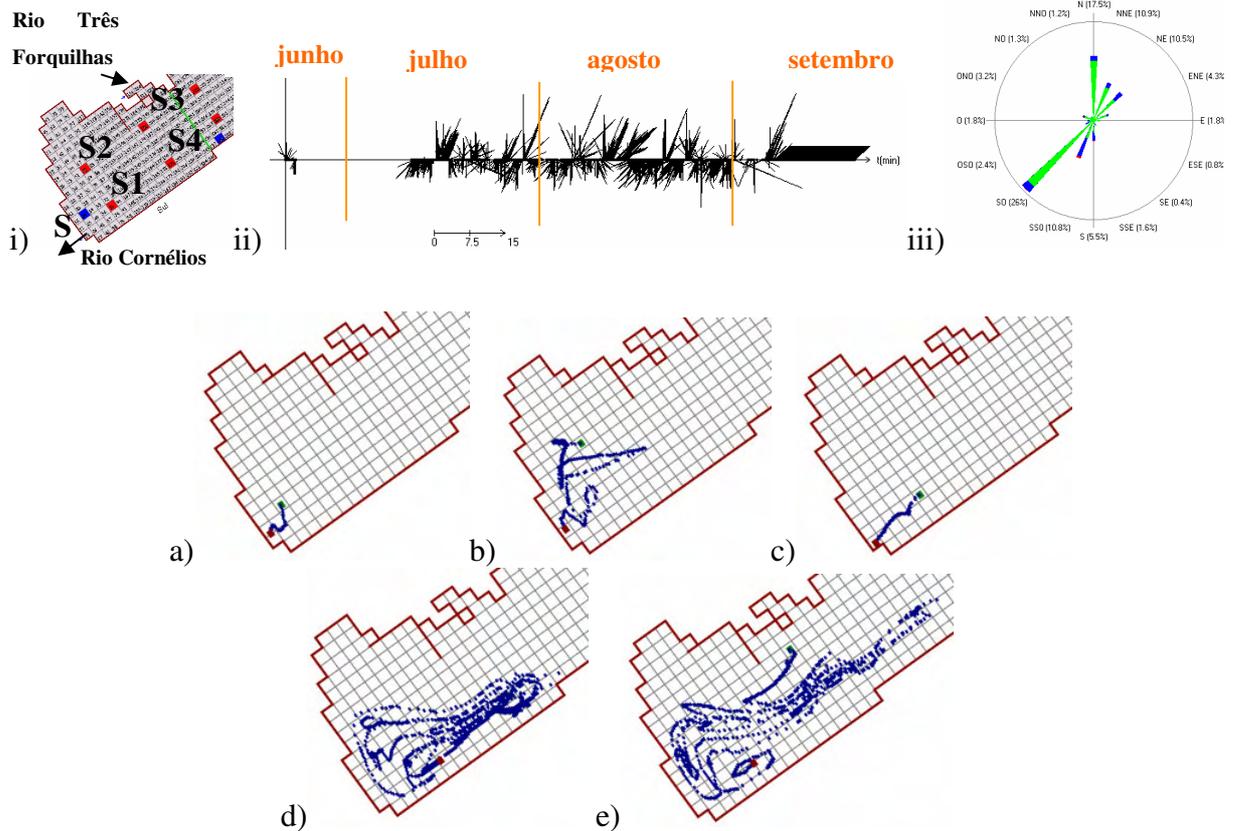


Figura 5.34 Correntologia da região Sul da lagoa Itapeva para o inverno de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) S - 21/06 a 29/06, b) S1 - 21/06 a 01/08, c) S2 - 21/06 a 04/07, d) S3 - 21/06 a 22/09, e) S4 - 21/06 a 22/09

Como já mencionado nas demais estações do ano, as regiões centro e sul poderiam ser consideradas apenas uma região da lagoa, deixando de lado apenas a região norte, como uma região de águas mais calmas.

Neste caso, verifica-se que, principalmente em função do vento ter períodos longos de atuação numa determinada direção e por não haver uma alta vazão de entrada na lagoa, a água pode percorrê-la integralmente, pois tem tempo de se deslocar de uma região para outra numa trajetória facilmente identificável. Quando o vento muda de direção, esta trajetória também se altera e pode-se identificar bem estas alterações de trajetória (Figura 5.35). Estas trajetórias evidenciam-se mais facilmente nas regiões sul e central da lagoa.

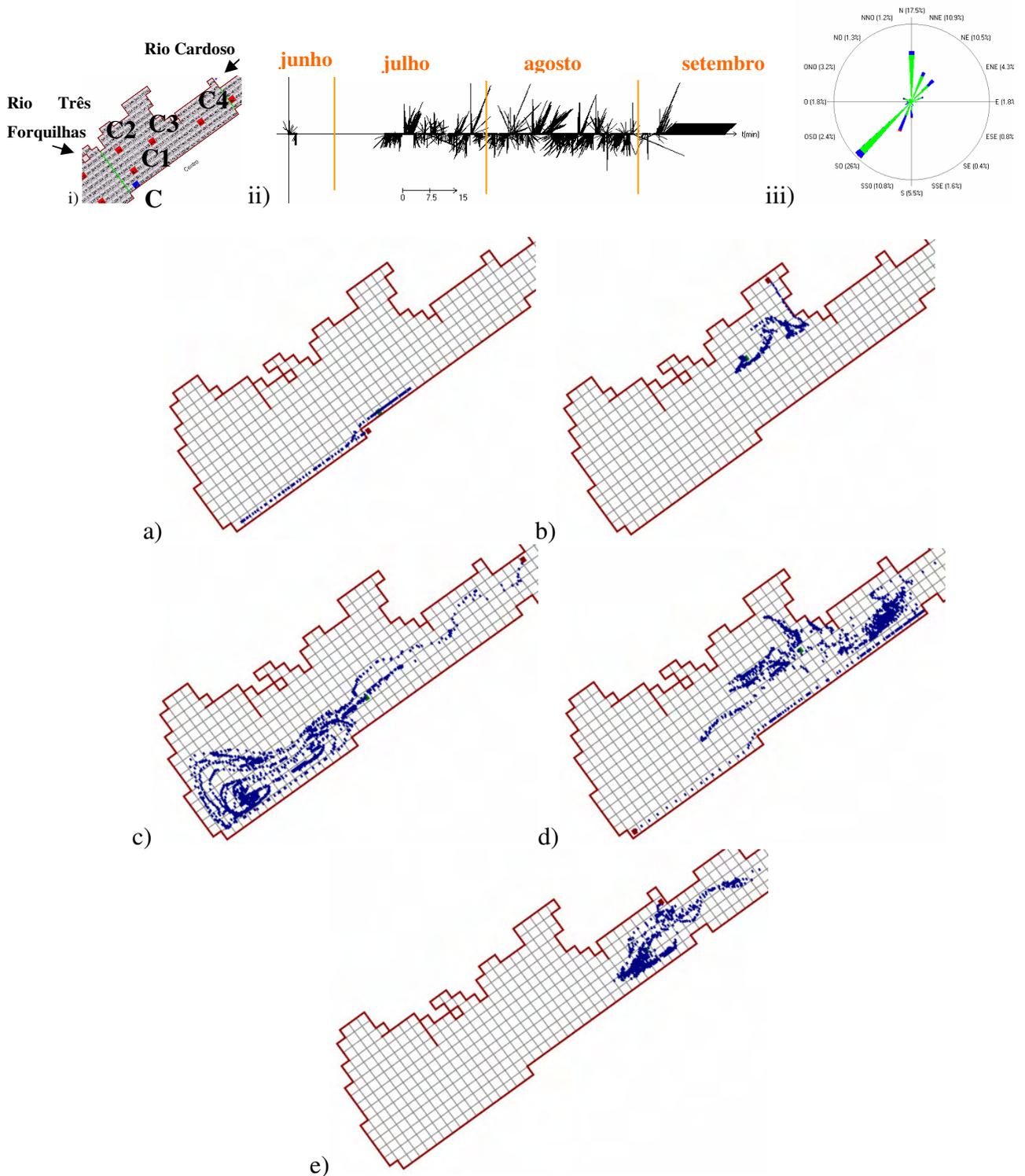


Figura 5.35 Correntologia da região Centro da lagoa Itapeva para o inverno de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) C - 21/06 a 22/07, b) C1 - 21/06 a 09/08, c) C2 - 21/06 a 22/09, d) C3 - 21/06 a 22/09, e) C4 - 21/06 a 22/09

A região norte continua com o comportamento das demais estações do ano, onde a água permanece na região (Figura 5.36). Apesar disto se for observado na Figura 5.35 item d) que corresponde ao ponto C4 mostra que a água desta região que tem influência do rio Cardoso renova as águas da região norte.

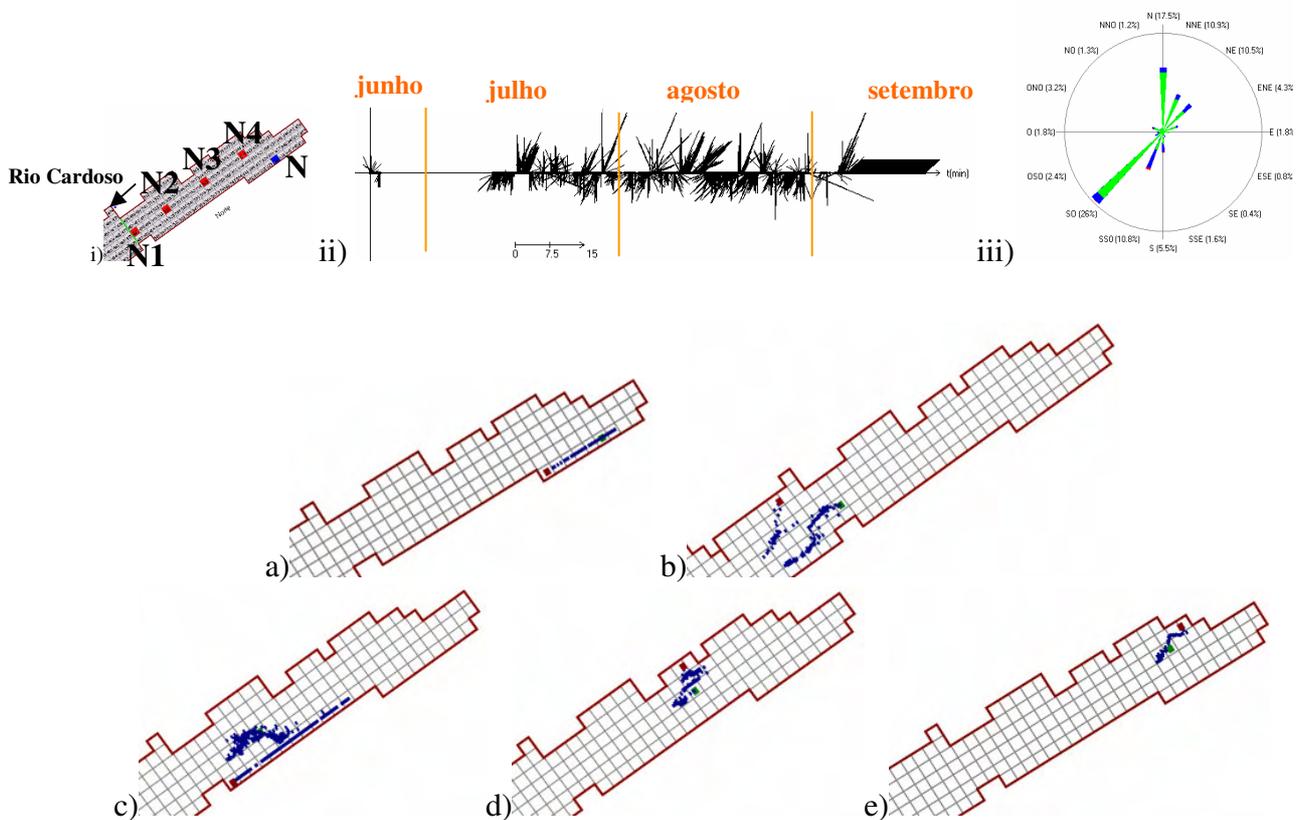


Figura 5.36 Correntologia da região Norte da lagoa Itapeva para o inverno de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) N - 21/06 a 31/07, b) N1 - 21/06 a 10/08, c) N2 - 21/06 a 10/09, d) N3 - 21/06 a 25/07, e) N4 - 21/06 a 31/07

5.3.3.4 Primavera – 22/09/1999 a 17/12/1999

Na primavera também não se observou direção predominante do vento e as de maior frequência foram as seguintes: NE (19,5%), N (17%), SSO (13,3%), seguida de NNE (13,2%). As rajadas de ventos mais fortes foram de NE e SSO, conforme se evidenciaram na Figura 5.37 e na Figura 5.38 pela distância maior entre os pontos graficados.

Analisando-se as trajetórias pode ser percebido que elas vão do início da primavera até apenas o início de novembro, portanto através das trajetórias não se pôde avaliar a constância dos ventos para a região sul.

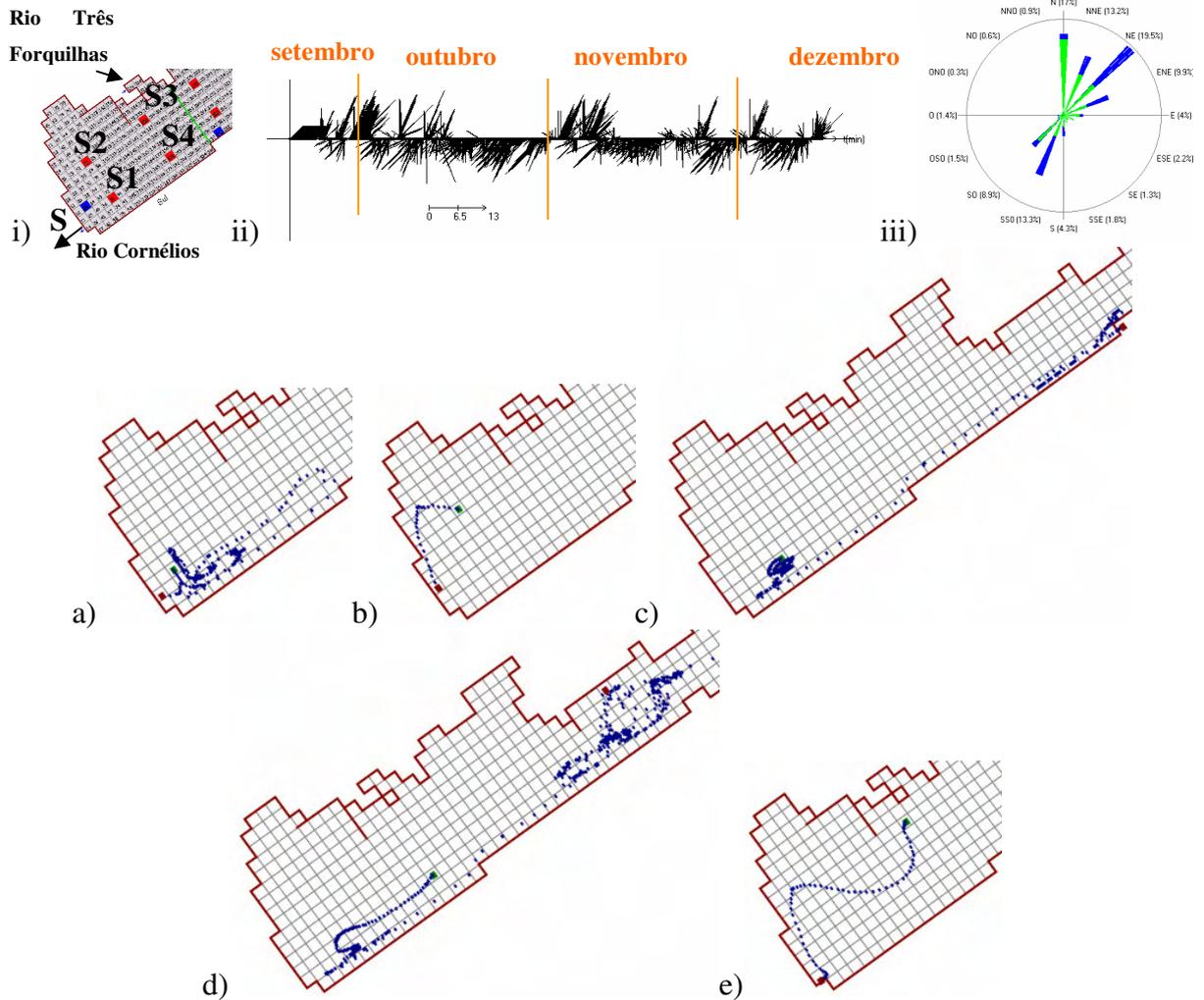


Figura 5.37 Correntologia da região Sul da lagoa Itapeva para a primavera de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) S - 21/09 a 17/10, b) S1 - 21/09 a 29/09, c) S2 - 21/09 a 17/10, d) S3 - 21/09 a 01/11, e) S4 - 21/09 a 01/10

Na região sul quando o vento é do quadrante SO, as regiões sul e centro acabam por se transformar numa grande zona de circulação, porém quando o vento vem do quadrante NE a tendência é desta água sair pelo exutório da lagoa (Figura 5.37).

Da mesma maneira que a região sul, as trajetórias da região central também vão até o início de novembro, e apenas a letra b) na Figura 5.38 vai até o meio de novembro. Nesta figura pode-se ver que a região central se comporta como uma zona de mistura inicialmente a água desloca-se para o sul da lagoa e depois com a mudança da direção de vento ela vai para o norte da lagoa, cruzando toda a região sul e centro, terminando perto do exutório do rio Cardoso.

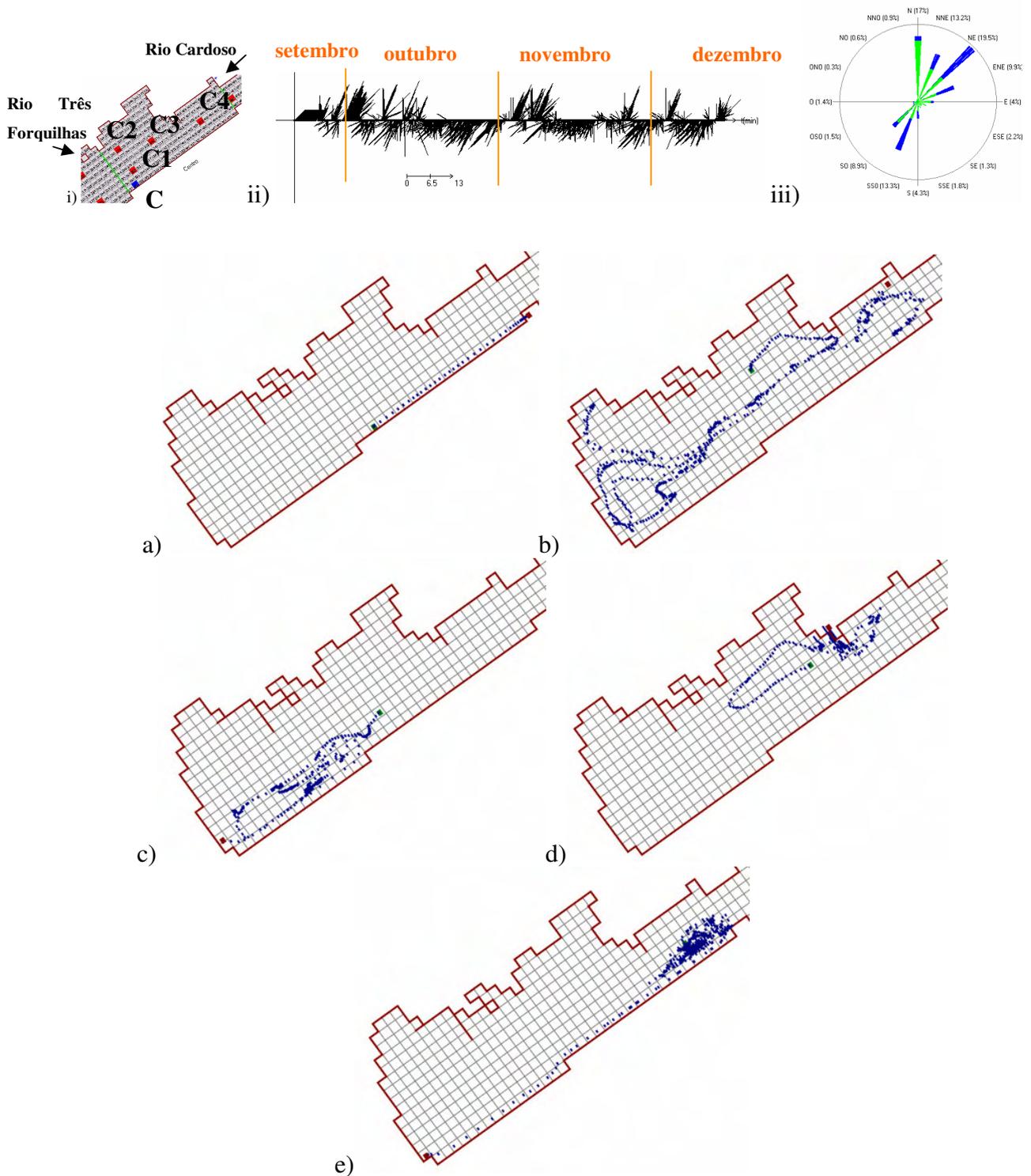


Figura 5.38 Correntologia da região Centro da lagoa Itapeva para a primavera de 1999.
i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s),
iii) Rosa dos ventos, a) C - 21/09 a 01/10, b) C1 - 21/09 a 14/11, c) C2 - 21/09 a 30/10, d)
C3 - 21/09 a 17/10, e) C4 - 21/09 a 01/11

Para a região norte (Figura 5.39) quando o vento predominante NE (item c) apresenta uma certa constância pode-se observar a saída da água para a região central.

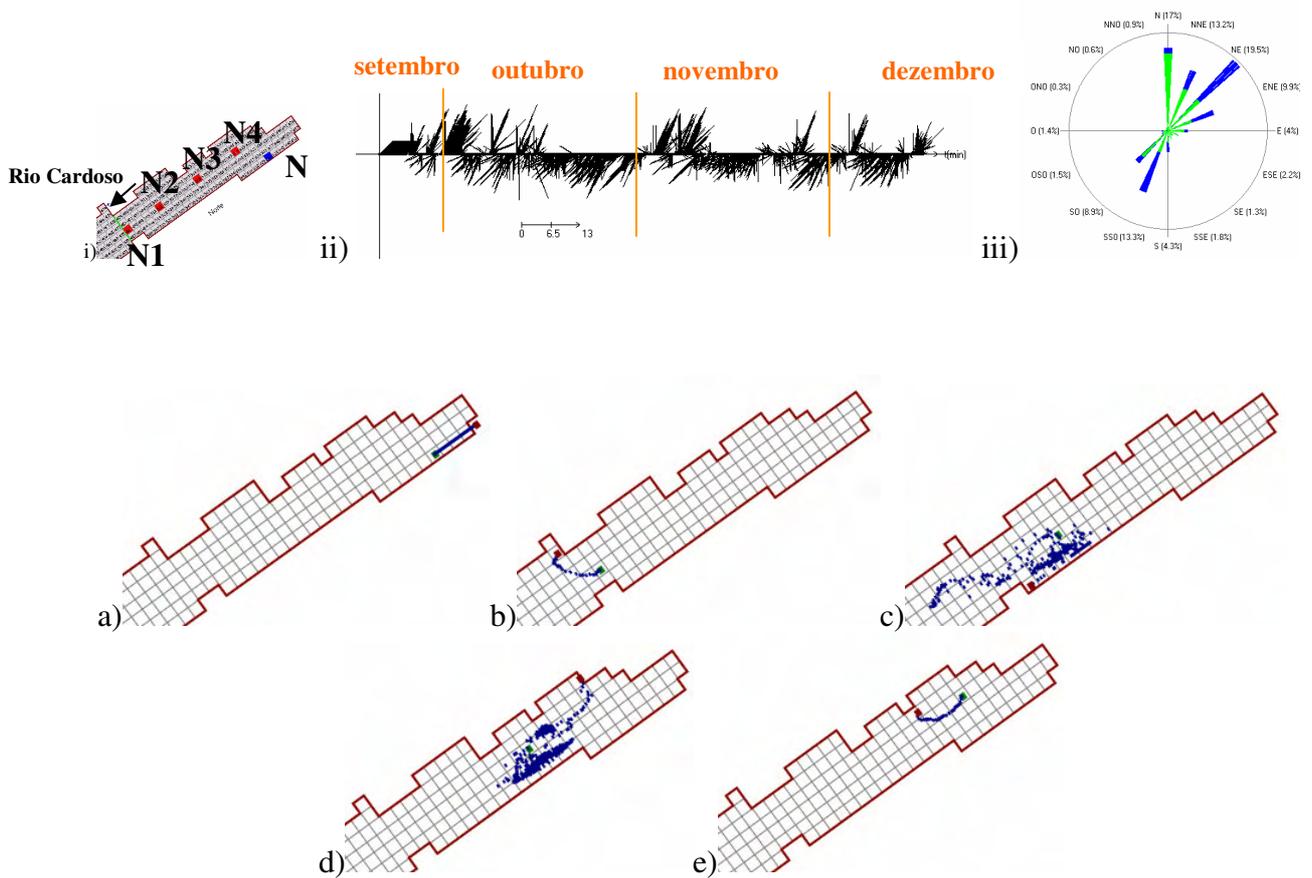


Figura 5.39 Correntologia da região Norte da lagoa Itapeva para a primavera de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) N - 21/09 a 25/10, b) N1 - 21/09 a 01/10, c) N2 - 21/09 a 25/10, d) N3 - 21/09 a 27/10, e) N4 - 21/09 a 29/09

Um problema nas análises da região norte consiste que o programa utilizado considera que quando a partícula encontra com a margem da lagoa, esta é a posição final, não dando continuidade na graficação da trajetória quando, por exemplo, o vento muda de direção.

Portanto, nestas conclusões iniciais deste estudo da lagoa Itapeva pode-se estar considerando que a água permanece na região e a realidade pode ser outra. Mas, baseado nos períodos mais longos de trajetórias da região norte foi evidenciado que esta região tem comportamento distinto das demais.

Ainda com relação à direção do escoamento serão mostradas a seguir algumas figuras com a média dos vetores de velocidade da água para algumas situações:

- 1999;
- Verão de 1999;
- 1ª campanha;
- Outono de 1999;
- 2ª campanha;
- Inverno de 1999;
- 3ª campanha;
- Primavera de 1999;
- Grande vazão afluyente;
- Pequena vazão afluyente e vento forte do quadrante NE;
- Pequena vazão afluyente e vento forte do quadrante SO.

As velocidades médias durante o ano de 1999 apresentadas na Figura 5.40 não são representativas, pois o escoamento da lagoa é regido principalmente pelo vento que possui uma grande variabilidade temporal. Estes ventos têm predominância nos quadrante SO e NE que quando são calculadas as médias destes vetores de velocidade da água a tendência é que estes se anulem resultando baixas velocidades.

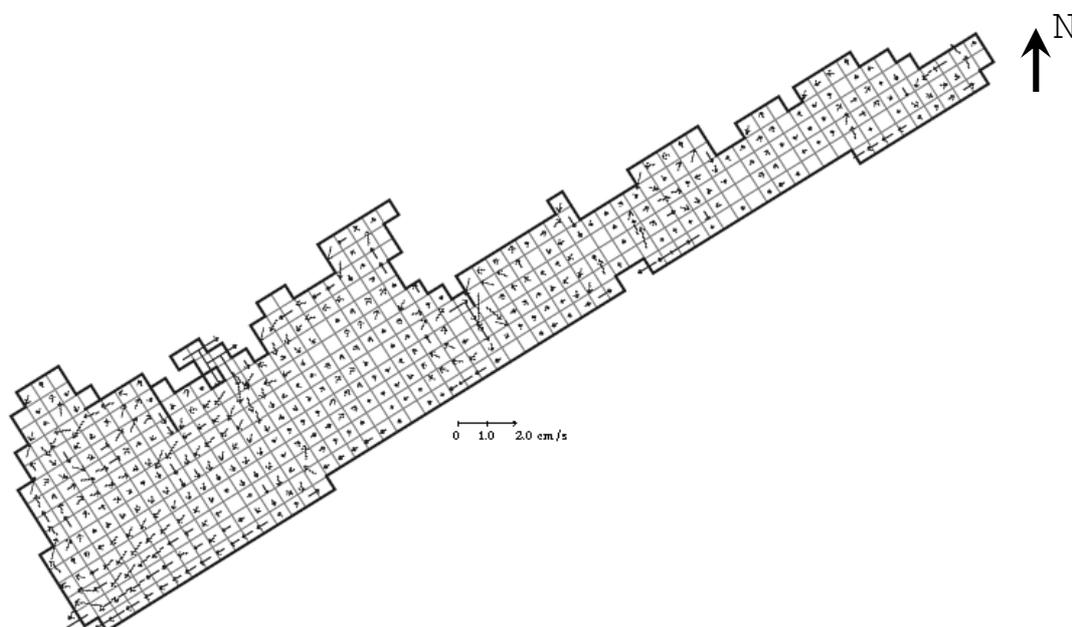


Figura 5.40 Mapa com a média dos vetores de velocidade da água para a lagoa Itapeva durante o ano de 1999

Pode-se caracterizar melhor o escoamento pela sazonalidade, no verão de 1999 o vento predominante foi o do quadrante NE. Na Figura 5.41 observa-se o comportamento da lagoa para o verão de 1999, onde a vento predominante faz com que na região sul a água escoe no sentido horário perto do exutório, na região central e perto do exutório do rio Três

Forquilhas o escoamento tem sentido anti horário, perto do rio Cardoso o escoamento também é no sentido horário.

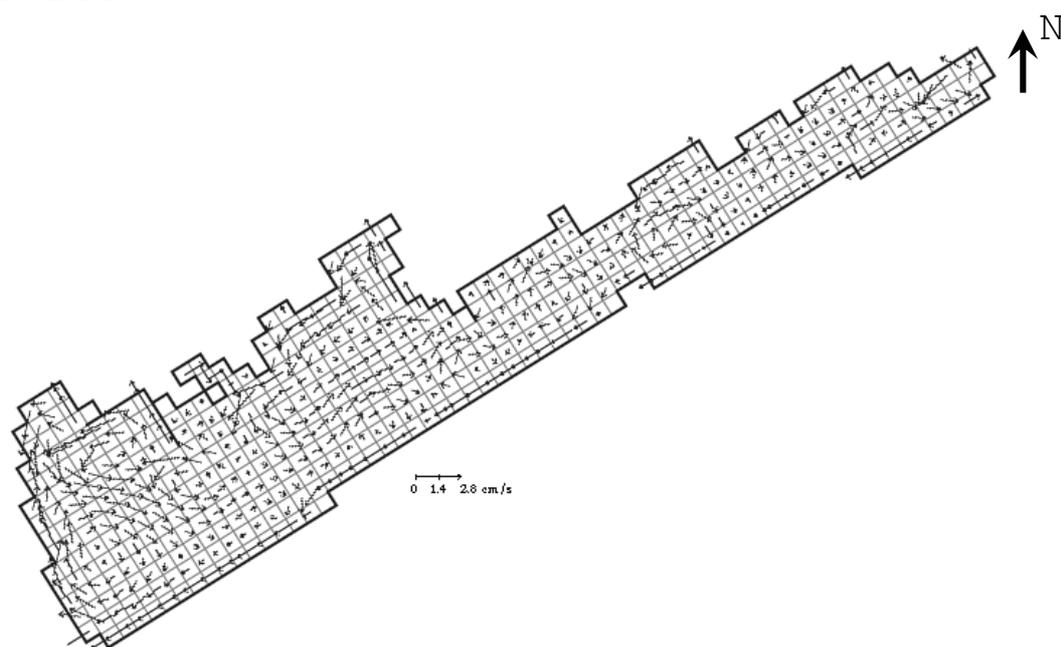


Figura 5.41 Mapa com a média dos vetores de velocidade da água para a lagoa Itapeva para o verão (04/01/1999 – 21/03/1999)

A Figura 5.42 apresenta a 1ª campanha realizada no verão de 1999 que ao comparar com a figura anterior verifica-se que o comportamento do escoamento nos dias de campanha representam de maneira semelhante o ocorrido no verão, a diferença mais visível corresponde às velocidades. Enquanto nos dias de campanhas observaram-se velocidades médias de até 7 cm/s, no verão as médias alcançaram a faixa dos 2 cm/s.

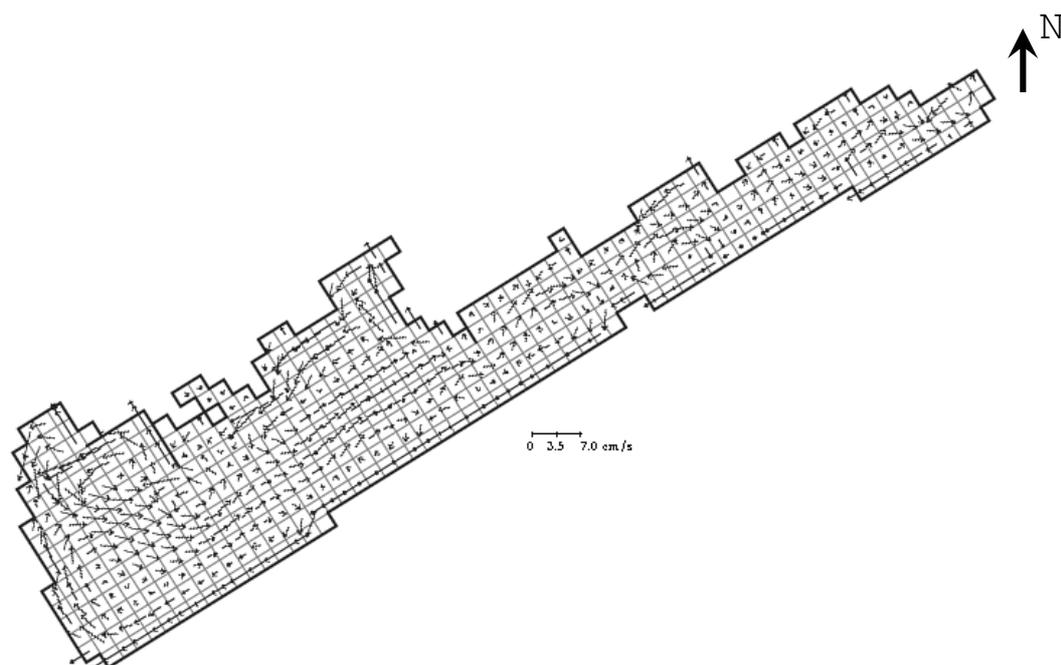


Figura 5.42 Mapa com a média dos vetores de velocidade da água para a lagoa Itapeva para a 1ª Campanha (02/03/1999 – 07/03/1999)

Na Figura 5.43 o vento influencia o escoamento da água em direção a região norte da lagoa principalmente próximo às margens, enquanto que o meio da lagoa recebe água de ambas as laterais e forma um escoamento contrário à direção do vento.

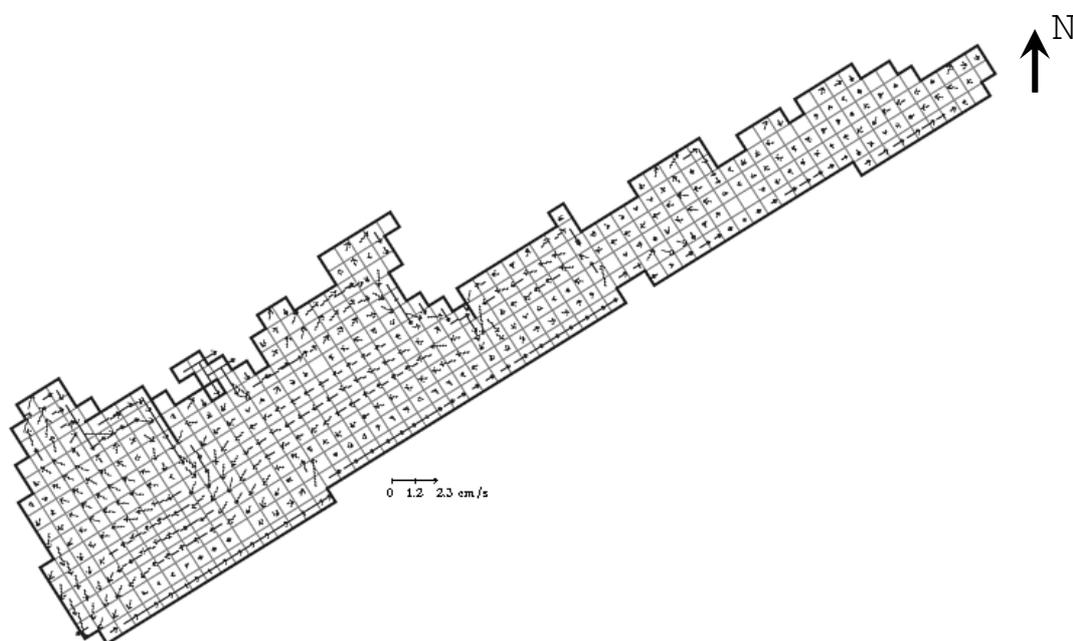


Figura 5.43 Mapa com a média dos vetores de velocidade da água para a lagoa Itapeva para o outono (22/03/1999 – 21/06/1999)

A média das velocidades para a 2ª campanha estão demonstradas na Figura 5.44. Está campanha também tem um escoamento semelhante ao ocorrido durante o outono de 1999, apresentando apenas velocidades médias maiores.

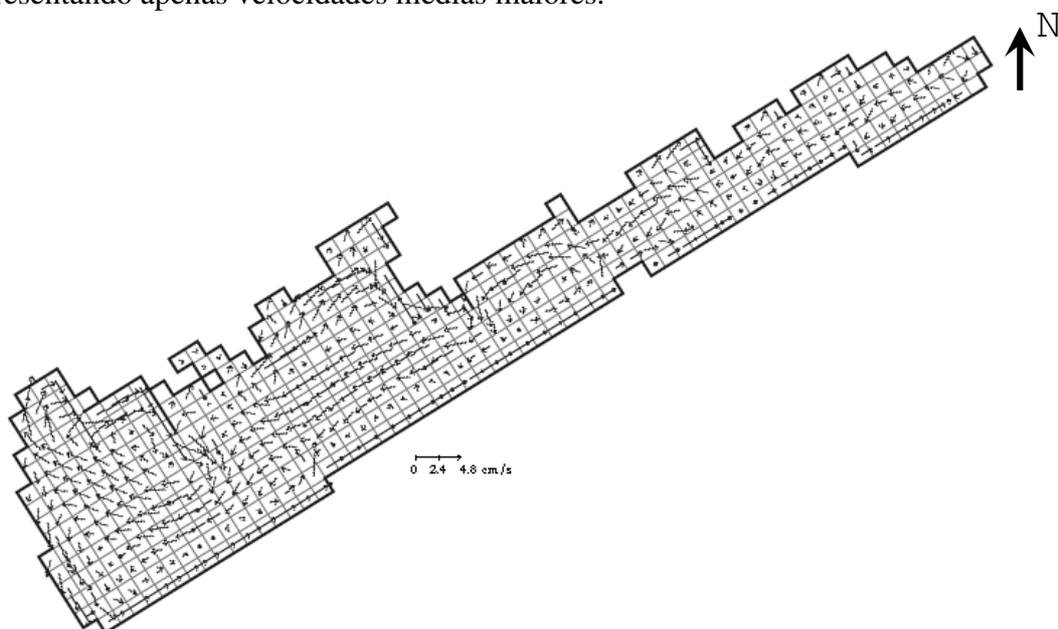


Figura 5.44 Mapa com a média dos vetores de velocidade da água para a lagoa Itapeva para a 2ª Campanha (21/05/1999 – 26/05/1999)

No inverno de 1999 não houve direção de vento predominante e apesar do vento do quadrante NE estar presente maior quantidade de tempo, o vento proveniente do quadrante SO teve maior intensidade e portanto quando se observa a Figura 5.45 pode-se dizer que está tem comportamento semelhante ao do outono.

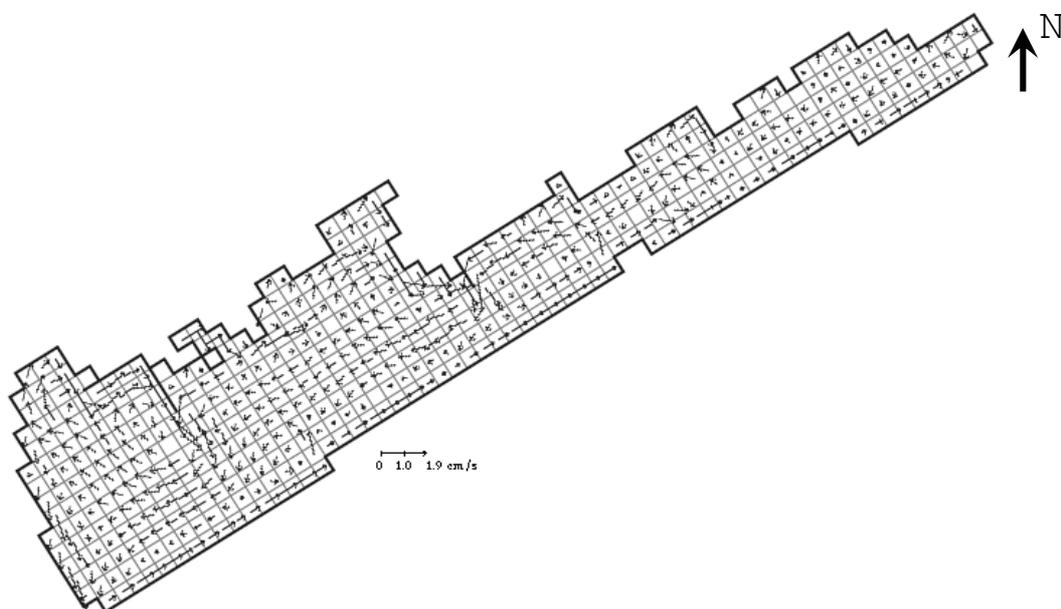


Figura 5.45 Mapa com a média dos vetores de velocidade da água para a lagoa Itapeva para o inverno (21/06/1999 – 22/09/1999)

A 3ª campanha como o inverno apresenta-se dividida com ventos dos dois quadrantes e os ventos do quadrante SO têm maior intensidade, portanto a Figura 5.46 representa de maneira adequada o que ocorreu no inverno de 1999.

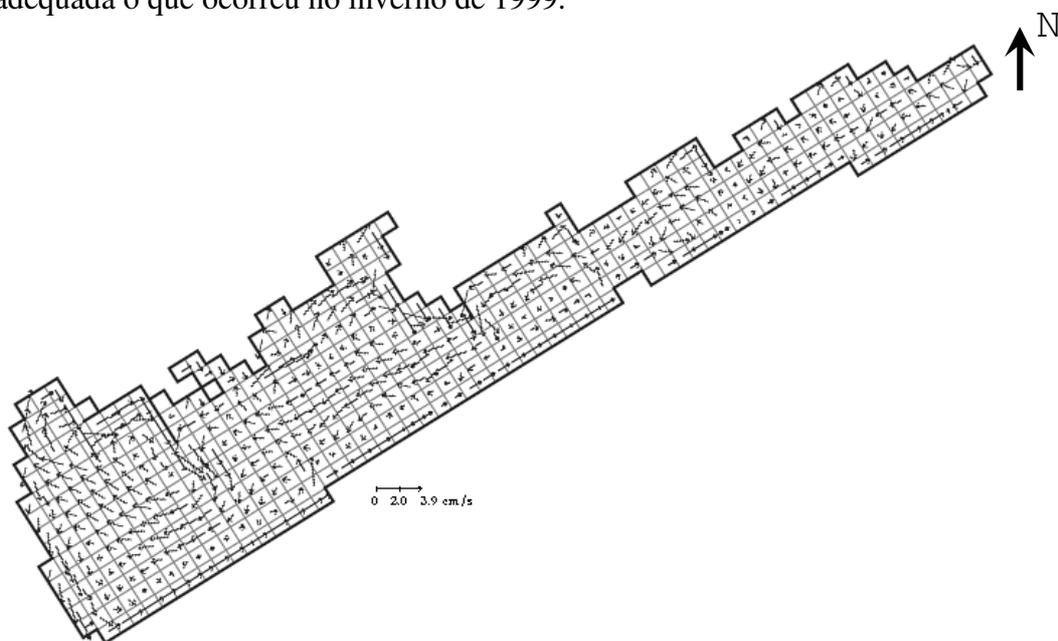


Figura 5.46 Mapa com a média dos vetores de velocidade da água para a lagoa Itapeva para a 3ª Campanha (14/08/1999 – 19/08/1999)

Na primavera de 1999 o predomínio do vento foi do quadrante NE com ventos de intensidade moderada. Ao analisar a Figura 5.47 pode-se verificar que a direção do escoamento é parecida com a do verão que também teve o vento predominante do quadrante NE.

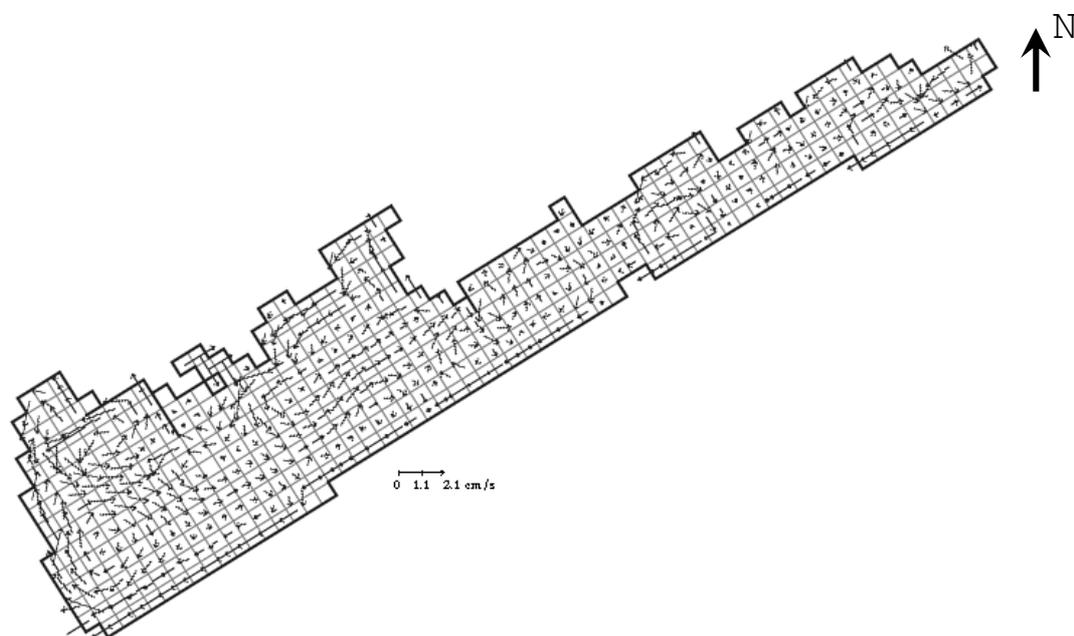


Figura 5.47 Mapa com a média dos vetores de velocidade da água para a lagoa Itapeva para a primavera (22/09/1999 – 17/12/1999)

A Figura 5.48 corresponde ao início de maio que foi um período de chuvas intensas. Estas chuvas ocasionaram grande afluência de vazão através dos dois rios, Três Forquilhas e Cardoso. Na Figura 5.48 a escala da velocidade foi ampliada para poder mostrar a influência do aporte de água de ambos os rios sobre a lagoa.

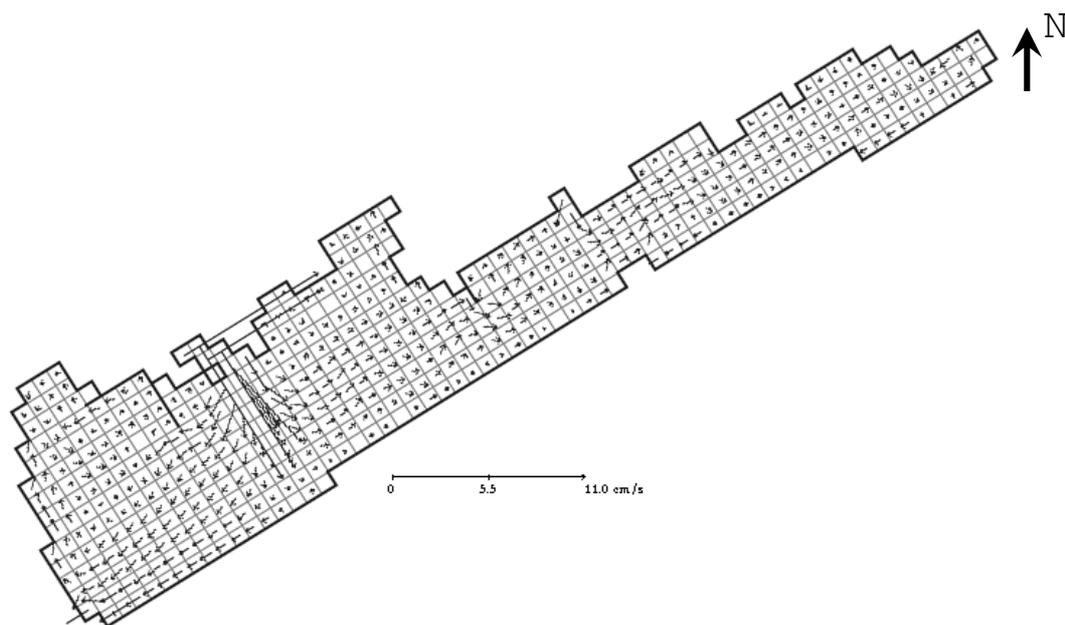


Figura 5.48 Mapa com a média dos vetores de velocidade da água para a lagoa Itapeva durante grande vazão afluyente (01/04/1999 – 09/04/1999)

Nesta época de cheia da lagoa existe a renovação da água para toda a lagoa.

Para ventos fortes provenientes de SO a lagoa Itapeva apresentou a correntologia conforme a Figura 5.49. Atingiu velocidades médias de até 20 cm/s para três dias distintos durante o ano de 1999.

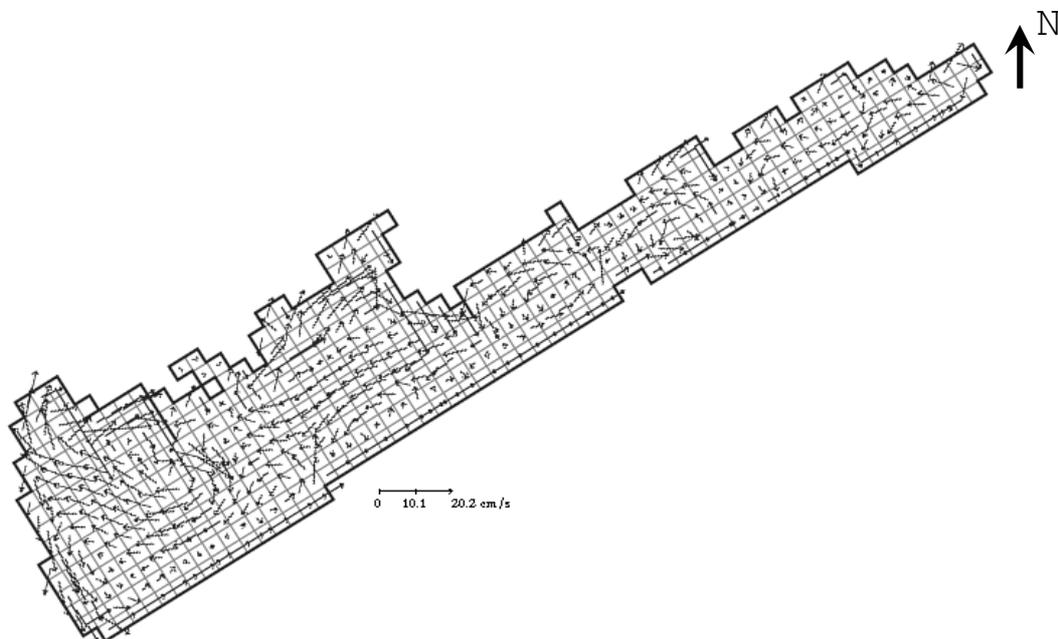


Figura 5.49 Mapa com a média dos vetores de velocidade da água para a lagoa Itapeva durante pequena vazão afluente e forte vento SO (13/02/1999, 01/11/1999 e 01/12/1999)

Para ventos fortes do quadrante NE (ver Figura 5.50) se verifica que o escoamento inverte de direção quando comparado com os ventos do quadrante SO (ver Figura 5.49).

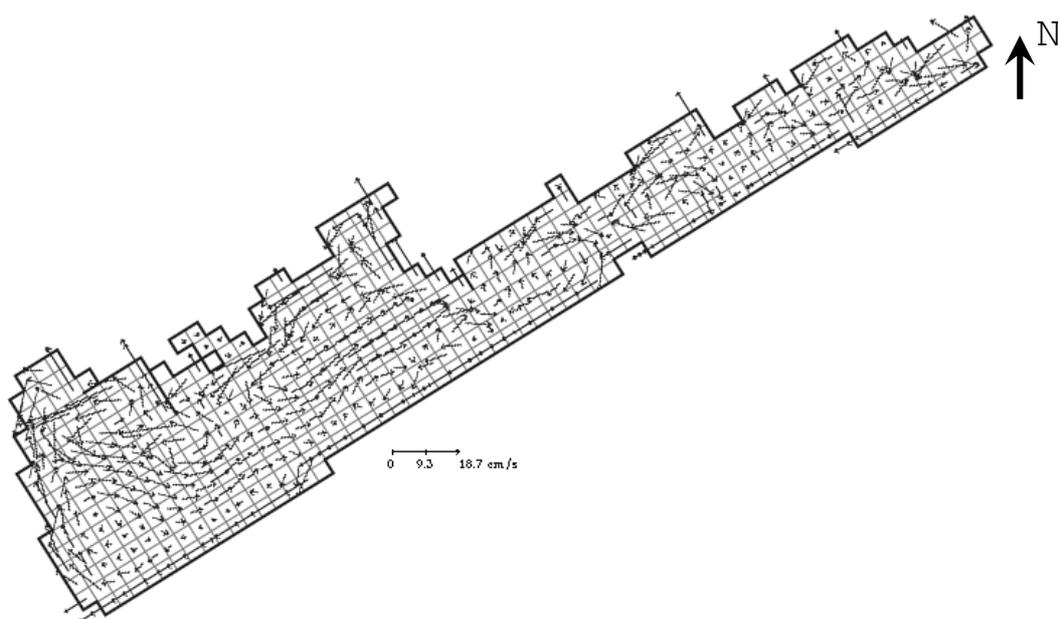


Figura 5.50 Mapa com a média dos vetores de velocidade da água para a lagoa Itapeva durante pequena vazão afluente e forte vento NE (20/05/1999 – 21/05/1999)

5.3.4 VELOCIDADES DAS CORRENTES

As velocidades das correntes, magnitude e direção, constituem em importantes variáveis de análise hidrodinâmica. O modelo hidrodinâmico bidimensional fornece essas informações em todas as quadrículas da malha de cálculo e em todos os intervalos de tempo. Na análise que segue, por uma questão de parcimônia, algumas células foram selecionadas para representar as diferentes áreas da lagoa Itapeva (Figura 5.51).

Observa-se que, para a análise das velocidades, foram adotados os mesmos pontos do início das trajetórias do estudo de correntologia. Neles analisou-se a distribuição temporal, quantitativa e direcional das velocidades. Esta análise considera a intensidade e direção da água que passa por este ponto.

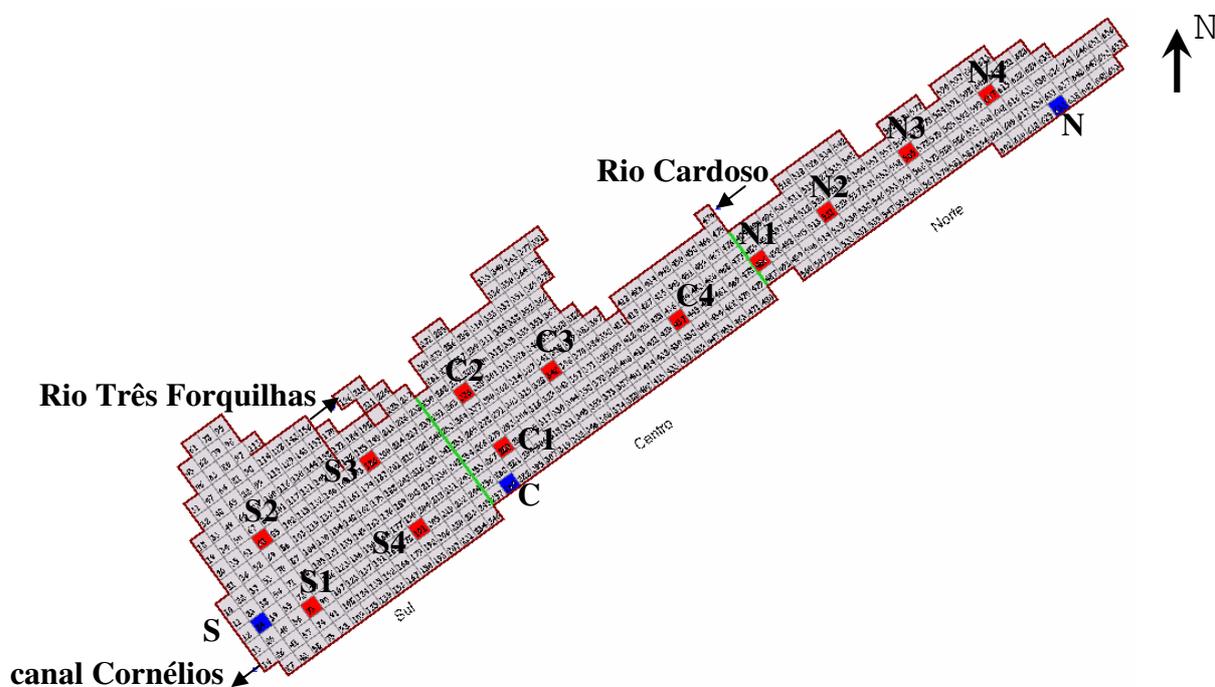


Figura 5.51 Localização dos pontos de estudo para a velocidade da água e divisão em regiões da lagoa Itapeva

Em cada região foram escolhidos 4 pontos conforme a Figura 5.51, sendo selecionados apenas os pontos mais explicativos para cada período sazonal. A rosa das velocidades mostra qual a direção predominante da água para o ponto de amostragem. Nas demais rosas têm-se a velocidade e a direção para cada ponto, as demais figuras seguiram este mesmo formato.

Antes de mostrar os resultados e suas análises convém destacar algumas considerações iniciais:

1. Geomorfologia: Pode-se verificar que todos os pontos próximos à margem sofrem alguma influência modificando acentuadamente a direção original do vento;
2. Vazões afluentes e efluentes: Quando existem valores altos de vazão, estes afetam a velocidade e direção da água para grande parte da lagoa;
3. Ventos: São os principais agentes de modificação da velocidade e direção da água, bem como das seiches.

Inicialmente serão mostradas as velocidades da água durante cada estação do ano para cada ponto de amostragem, em seguida serão analisadas as freqüências destas velocidades e por último serão mostradas as rosas das velocidades para os pontos selecionados em cada região da lagoa.

Na Figura 5.52 estão as velocidades da água para os pontos de amostragem Sul, Centro e Norte. Também está destacada cada campanha em sua estação do ano correspondente.

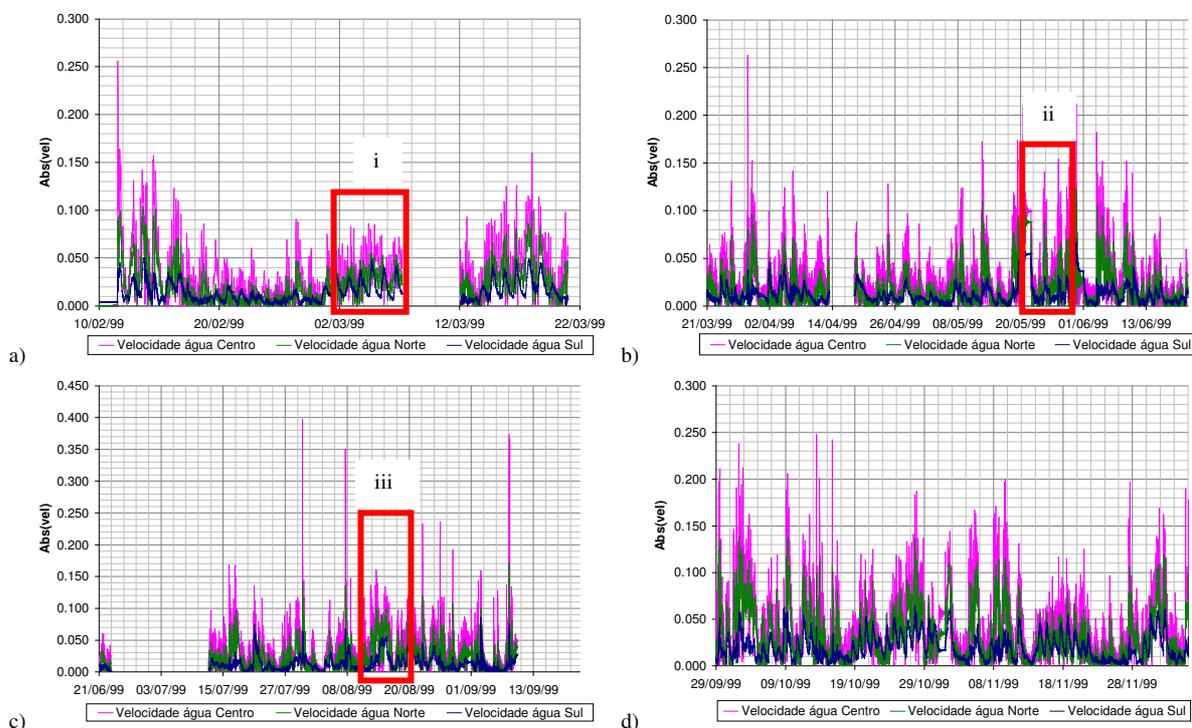


Figura 5.52 Velocidade da água para os pontos de coleta. a) Verão – 04/01/1999 a 21/03/1999, b) Outono – 21/03/1999 a 21/06/1999, c) Inverno – 21/06/1999 a 22/09/1999, d) Primavera – 22/09/1999 a 17/12/1999, i) 1ª Campanha – 02/03 a 07/03, ii) 2ª Campanha – 21/05 a 26/05, iii) 3ª Campanha – 14/08 a 19/08

A partir destas figuras verifica-se que o ponto de coleta central possui velocidades da água superiores ao ponto norte que por sua vez são superiores ao ponto sul. Isto se deve principalmente pelo fato de que o ponto sul está perto da margem e que esta margem é perpendicular às direções predominantes do vento e faz com que a velocidade seja reduzida.

Na Figura 5.53 pode-se verificar que o ponto de coleta central possui velocidades superiores aos demais pontos de amostragem quando a velocidade está acima de 0,025 m/s. Enquanto que o ponto ao sul da lagoa apesar de ter velocidades mais baixas que os demais locais permanece maior quantidade tempo com velocidades inferiores a 0,025 m/s dos 344 dias analisados permanece 296 dias (86%), o centro permanece 189 dias (55%) e o norte permanece 234 dias (68%).

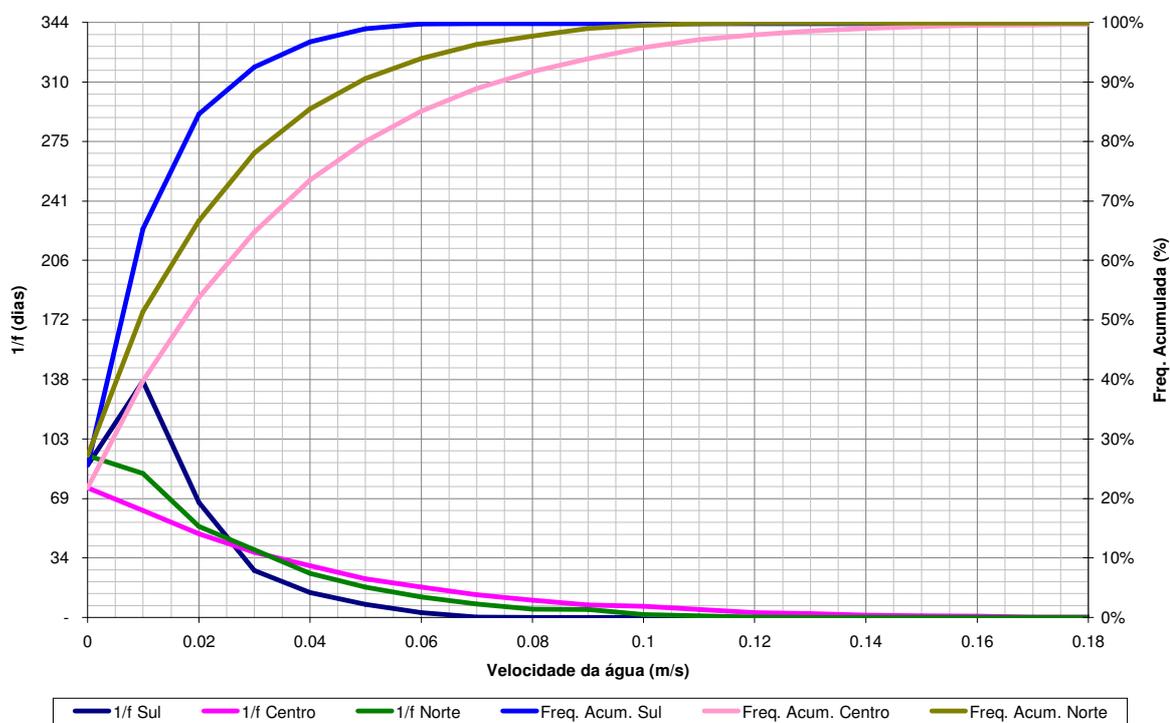


Figura 5.53 Frequência das velocidades da água para os três pontos de coleta (Sul, Centro e Norte) e sua frequência acumulada durante o ano de 1999 na lagoa Itapeva

O ponto central por estar no meio da lagoa acaba por apresentar velocidades maiores por ser susceptível tanto aos ventos do quadrante SO quanto do NE.

5.3.4.1 Verão – 04/01/1999 a 21/03/1999

1. Região Sul

Em a) pode-se dizer que, em razão do ponto de coleta estar próximo à margem e em função do vento predominante neste período ser do quadrante NE a resultante principal da água é a direção E; já em b) o ponto S1 não sofre tal influência e sua direção predominante é a OSO; em c) apesar deste ponto, S2, a princípio parecer apresentar o mesmo comportamento que o ponto S1, ele tem grande influência da região mais ao sul fazendo com que a direção predominante seja a NNE; em d) o ponto S3 tem a direção limitada pela margem direita, mas as demais direções são conseqüências diretas do vento; e e) o ponto S4 está limitado pelo braço que entra na lagoa do lado esquerdo, fazendo que no quadrante NO tenha velocidades bens pequenas (Figura 5.54).

A velocidade média na região sul, para os pontos selecionados, foi de 1,78 cm/s, o desvio padrão foi de 0,43 cm/s e a velocidade média máxima foi de 12,08 cm/s.

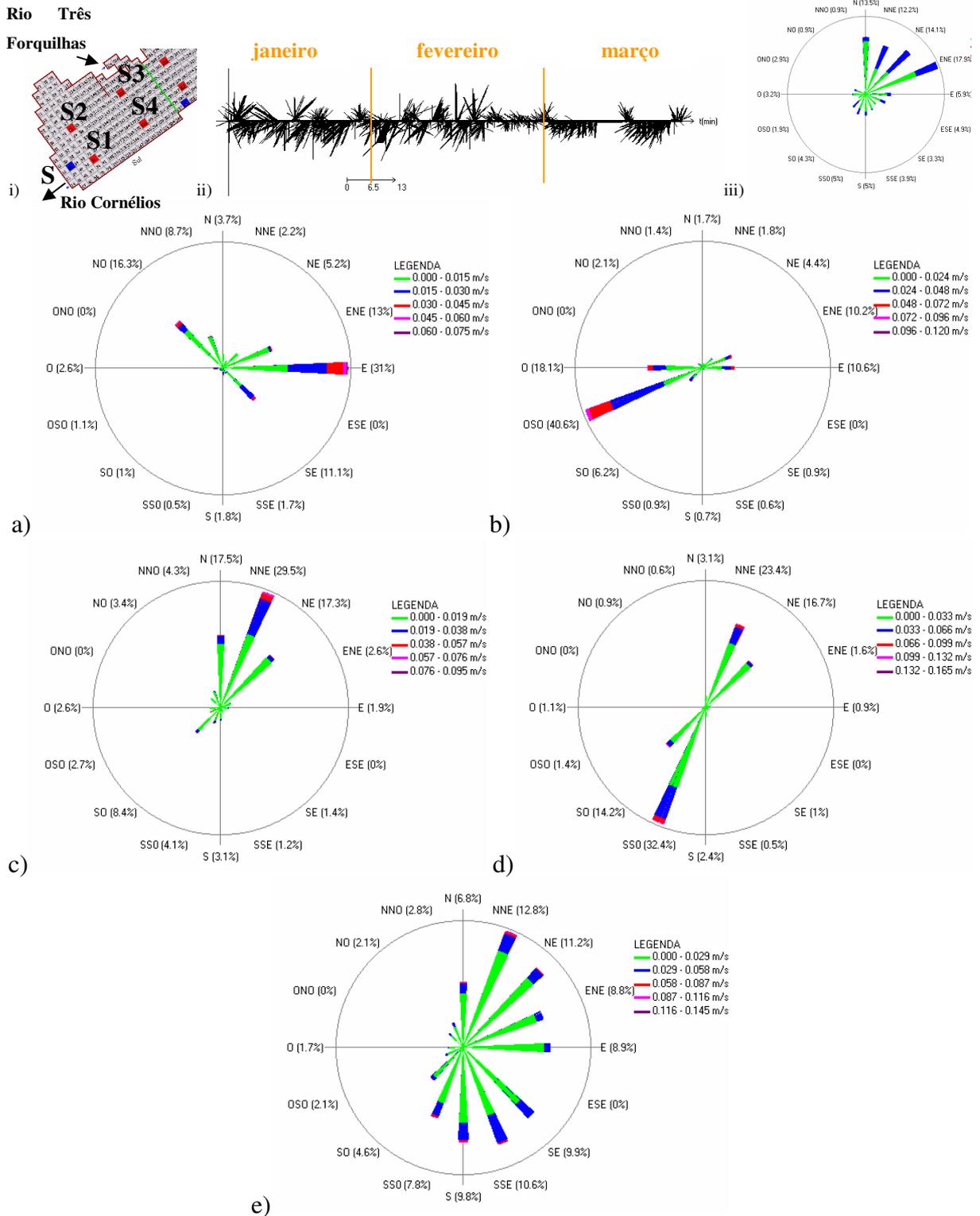


Figura 5.54 Rosa da velocidade da água da região Sul da lagoa Itapeva para o verão de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) Rosa da velocidade da água no ponto S, b) Rosa da velocidade da água no ponto S1, c) Rosa da velocidade da água no ponto S2, d) Rosa da velocidade da água no ponto S3, e) Rosa da velocidade da água no ponto S4

2. Região Central

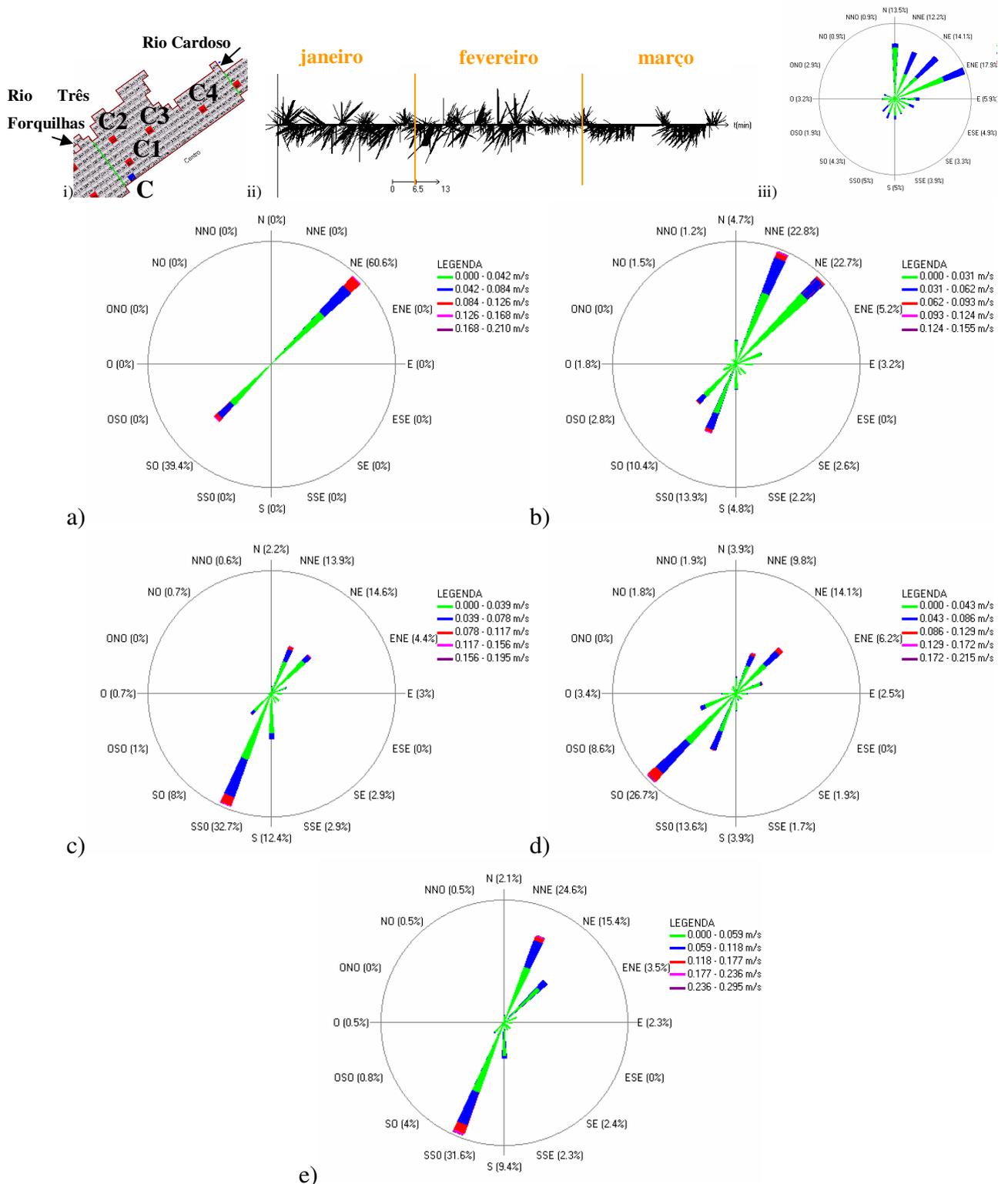


Figura 5.55 Rosa da velocidade da água da região Centro da lagoa Itapeva para o verão de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) Rosa da velocidade da água no ponto C, b) Rosa da velocidade da água no ponto C1, c) Rosa da velocidade da água no ponto C2, d) Rosa da velocidade da água no ponto C3, e) Rosa da velocidade da água no ponto C4

Em função do vento predominante neste período ser do quadrante N-E a resultante principal da água é a direção NE e SO, como mostra a Figura 5.55.

A velocidade média na região central, para os pontos selecionados, foi de 3,00 cm/s, o desvio padrão foi de 0,98 cm/s e a velocidade média máxima foi de 21,50 cm/s.

Na Figura 5.55, em função de a) que é o ponto de coleta, estar bem próximo à margem o programa faz com que as direções sejam paralelas à margem; b) há influência da vazão que entra na lagoa pelo rio Três Forquilhas, fazendo que suas direções predominantes sejam NE e NNE; em c) o efeito da margem faz com que todos os ventos do quadrante NE se agrupem na direção SSO; em d) a direção predominante é SO; em e) as margens também influenciam no redirecionamento, fazendo com que a direção predominante seja SSO e NNE dependendo da direção de vento atuante.

3. Região Norte

Em função do vento predominante neste período ser do quadrante NE a resultante principal da água é a direção SO e NE, como mostra a Figura 5.56. Em razão de a região ser muito estreita faz com que as direções principais de escoamento sejam paralelas às margens.

A velocidade média na região central, para os pontos selecionados, foi de 3,42 cm/s, o desvio padrão foi de 1,25 cm/s e a velocidade média máxima foi de 26,60 cm/s.

Na região norte todos os pontos selecionados tendem a seguir a direção paralelas à margens, sendo que a intensidade na direção NE vai diminuindo conforme se aproxima da extremidade superior da lagoa.

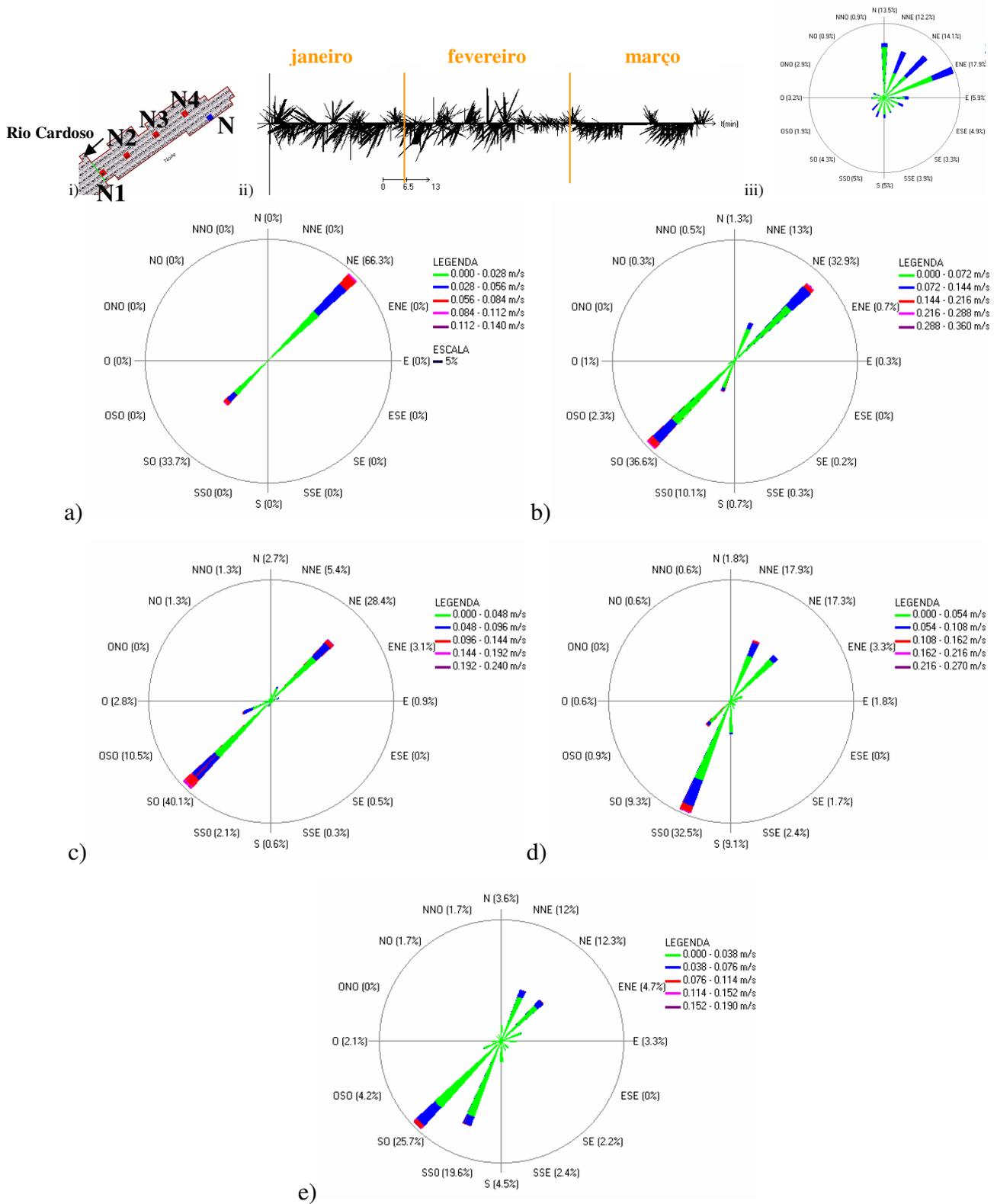


Figura 5.56 Rosa da velocidade da água da região Norte da lagoa Itapeva para o verão de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) Rosa da velocidade da água no ponto N, b) Rosa da velocidade da água no ponto N1, c) Rosa da velocidade da água no ponto N2, d) Rosa da velocidade da água no ponto N3, e) Rosa da velocidade da água no ponto N4

5.3.4.2 Outono – 21/03/1999 a 21/06/1999

1. Região Sul

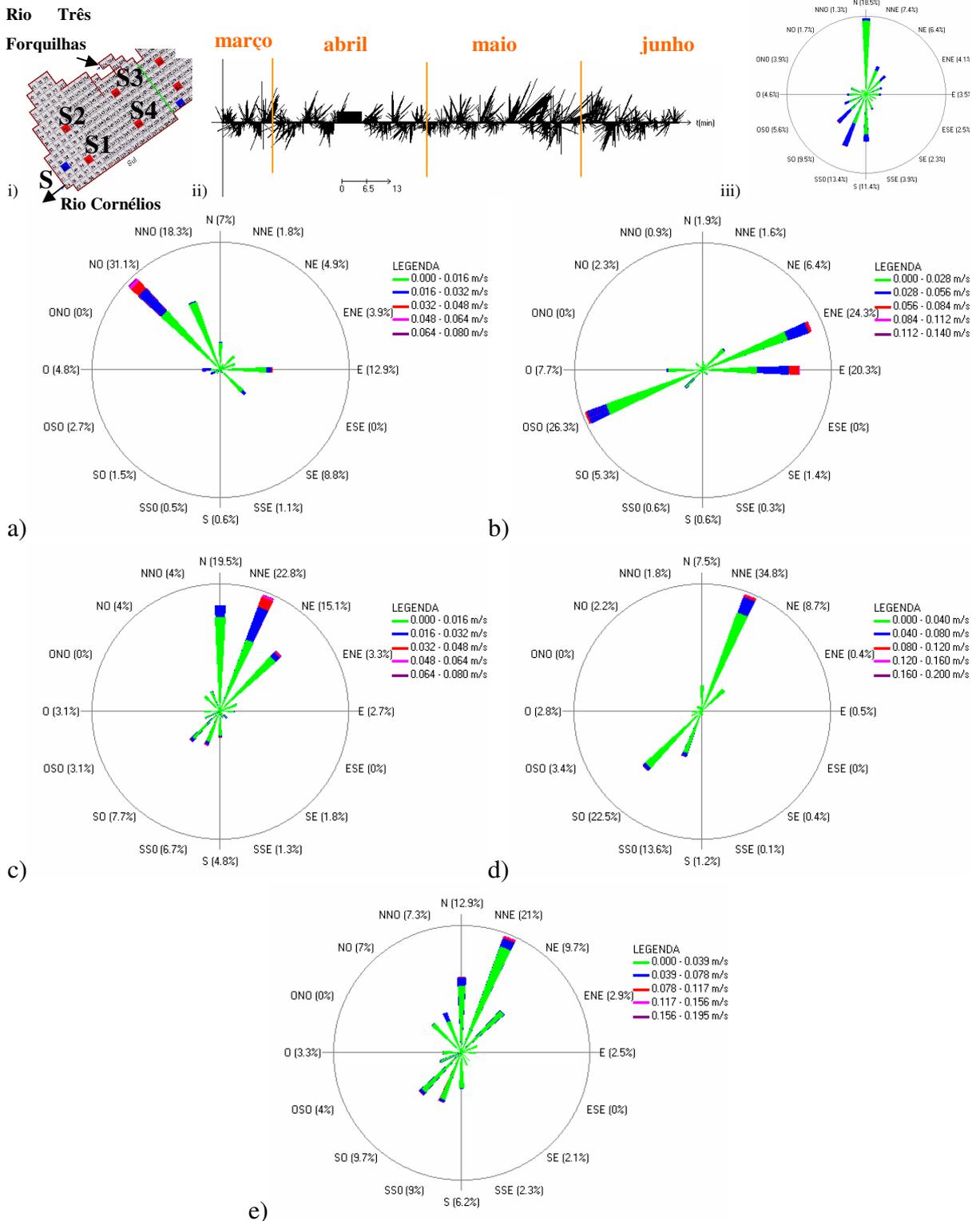


Figura 5.57 Rosa da velocidade da água da região Sul da lagoa Itapeva para o outono de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) Rosa da velocidade da água no ponto S, b) Rosa da velocidade da água no ponto S1, c) Rosa da velocidade da água no ponto S2, d) Rosa da velocidade da água no ponto S3, e) Rosa da velocidade da água no ponto S4

No outono a lagoa teve uma variação do nível de água passando de 1,20 metros de profundidade para quase 2,10 metros, e no final do outono começou a esvaziar. Em razão do ponto de coleta estar próximo ao canal Cornélios, o exutório da lagoa, imagina-se que o vento não consegue vencer o aporte de água que está indo a direção ao canal Cornélios. Portanto em a) a direção predominante fica sendo NO; em b) a direção predominante corresponde a ENE e OSO dependendo da direção do vento influenciada também pelo aporte de vazão; em c), d), e) a direção predominante é a NE, modificando-se um pouco em cada ponto pela localização da margem. Neste período também houve grandes aportes de precipitação, no início de maio a chuva foi em torno de 166 mm que acarretou a variação de nível citada acima.

Também se deve lembrar que apesar do vento preponderante ser N e estar caracterizado com ventos fracos, os ventos do quadrante S-O são os mais fortes.

A velocidade média na região sul, para os pontos selecionados, foi de 1,43 cm/s, o desvio padrão foi de 0,31 cm/s e a velocidade média máxima foi de 13,94 cm/s.

2. Região Central

Na região central o comportamento das águas e dos ventos tende a ser nos quadrantes SO e NE, para o outono, pode-se também verificar que ventos perpendiculares à maior direção da lagoa têm suas resultantes redirecionadas em função da geomorfologia.

A velocidade média na região central, para os pontos selecionados, foi de 2,55 cm/s, o desvio padrão foi de 0,83 cm/s e a velocidade média máxima foi de 27,93 cm/s. No ponto C4 a velocidade máxima chegou a 0,40 cm/s.

O outono foi um período de grande variabilidade na direção do vento, estando no quadrante SO e em seguida passando para outro quadrante.

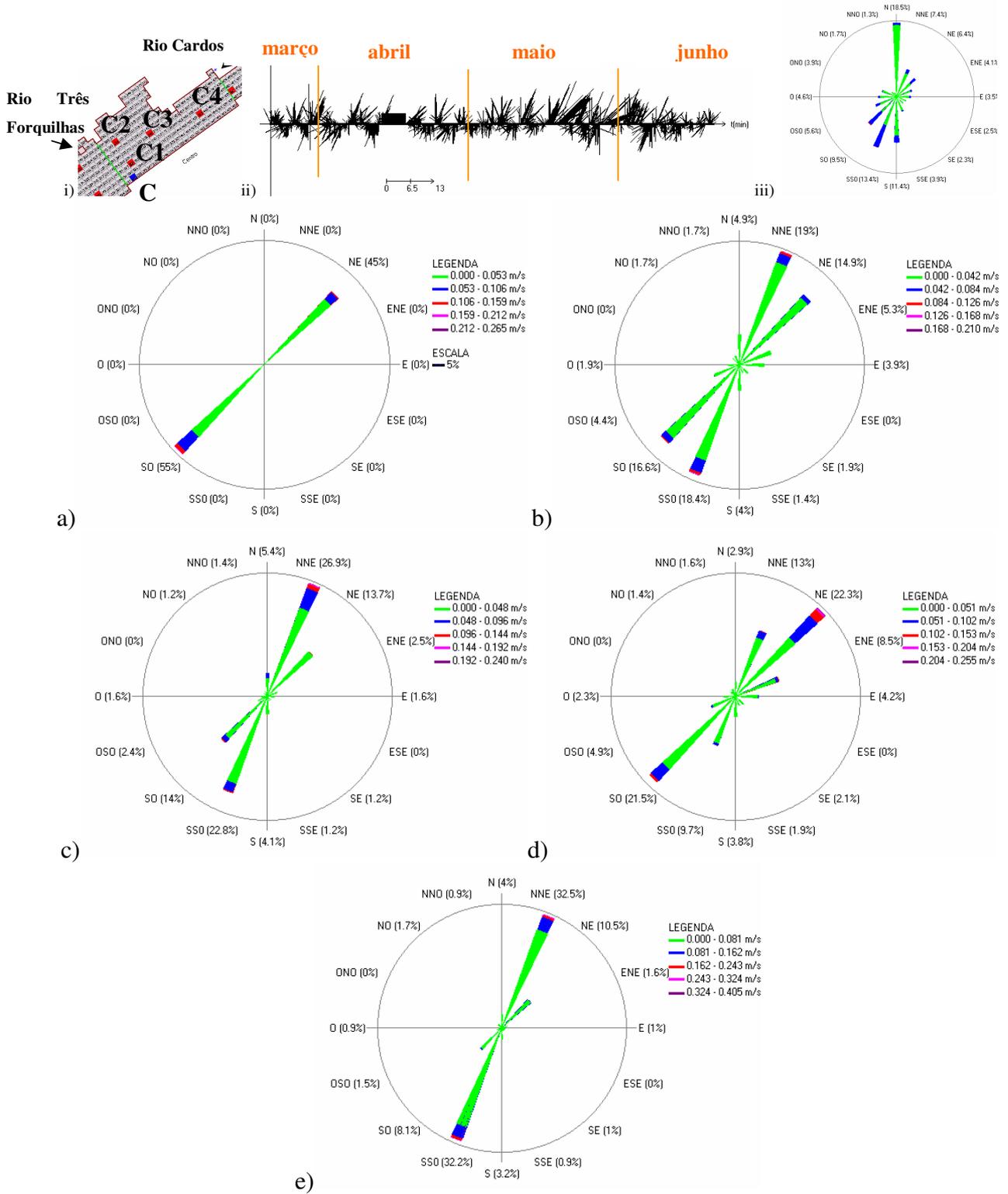


Figura 5.58 Rosa da velocidade da água da região Centro da lagoa Itapeva para o outono de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) Rosa da velocidade da água no ponto C, b) Rosa da velocidade da água no ponto C1, c) Rosa da velocidade da água no ponto C2, d) Rosa da velocidade da água no ponto C3, e) Rosa da velocidade da água no ponto C4

3. Região Norte

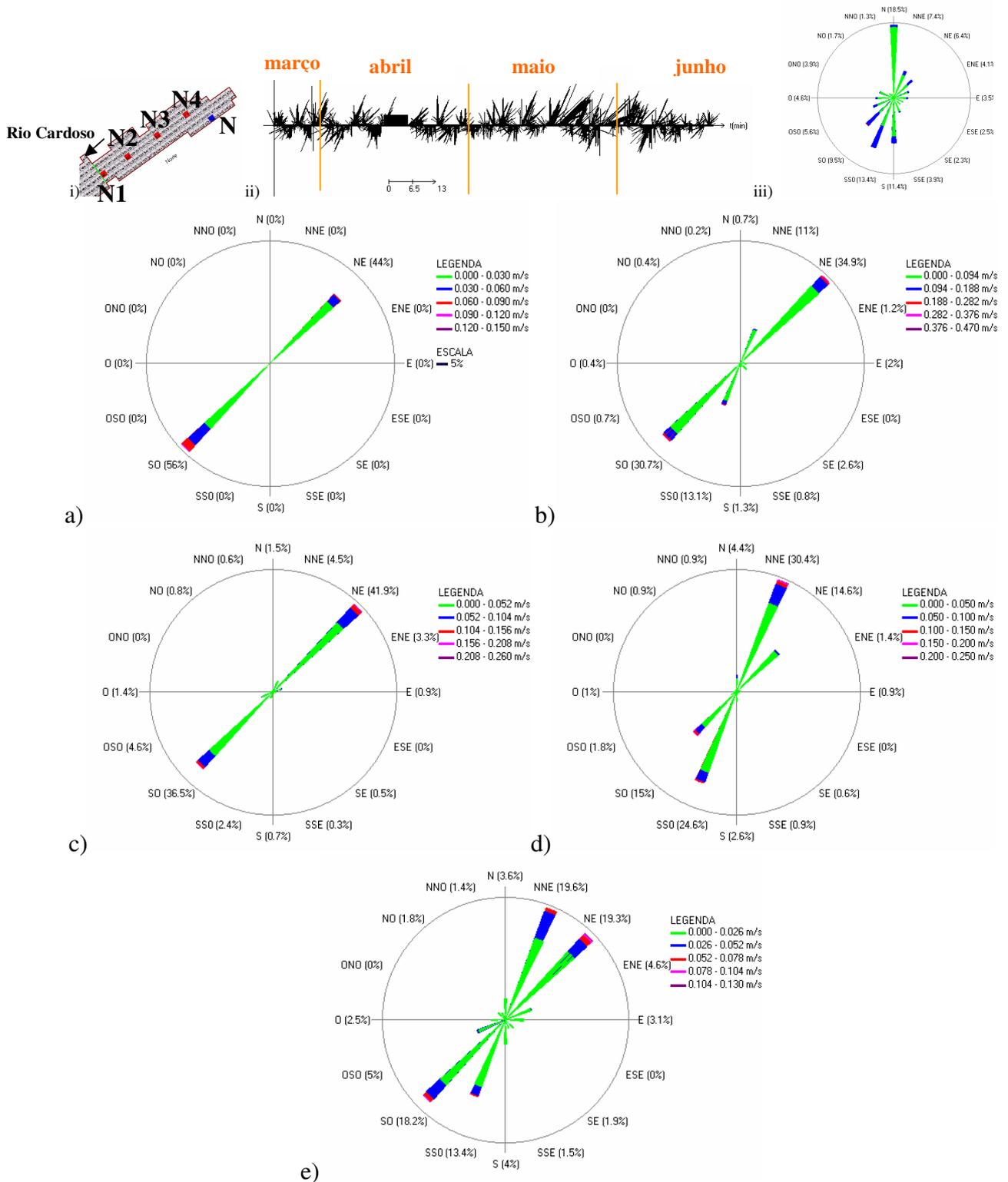


Figura 5.59 Rosa da velocidade da água da região Norte da lagoa Itapeva para o outono de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) Rosa da velocidade da água no ponto N, b) Rosa da velocidade da água no ponto N1, c) Rosa da velocidade da água no ponto N2, d) Rosa da velocidade da água no ponto N3, e) Rosa da velocidade da água no ponto N4

Na região norte o comportamento foi o mesmo que no verão, ou seja, todos os pontos selecionados tendem a seguir a direção paralela às margens, sendo que a intensidade na direção NE vai diminuindo conforme se aproxima da extremidade superior da lagoa.

A velocidade média na região norte, para os pontos selecionados, foi de 2,81 cm/s, o desvio padrão foi de 1,10 cm/s e a velocidade média máxima foi de 27,73 cm/s. Por outro lado, no ponto N1 a velocidade máxima chegou a 0,40 cm/s, no ponto N4 foi de 0,13 cm/s.

5.3.4.3 Inverno – 21/06/1999 a 22/09/1999

1. Região Sul

Neste período houve poucas chuvas e não ocorreu grande variabilidade na direção do vento, mantendo-se estável com ventos do quadrante NE. Assim a) recebe a influência do exutório da lagoa, como ocorreu em outros períodos; b) os ventos do quadrante NE têm como resultante, aparentemente, a direção OSO, os ventos SO e SSO têm como resultantes as direções NE, ENE e E; em c) ocorre o resultado de uma constância dos ventos no quadrante NE. A resultante é um fluxo nas regiões centro e sul de circulação, conforme a seta cinza na Figura 5.60.

A velocidade média na região sul, para os pontos selecionados, foi de 1,39 cm/s, o desvio padrão foi de 0,37 cm/s e a velocidade média máxima foi de 23,00 cm/s, enquanto que no ponto S3 a velocidade máxima chegou a 0,37 cm/s. No ponto de coleta a velocidade foi de 0,09 cm/s.

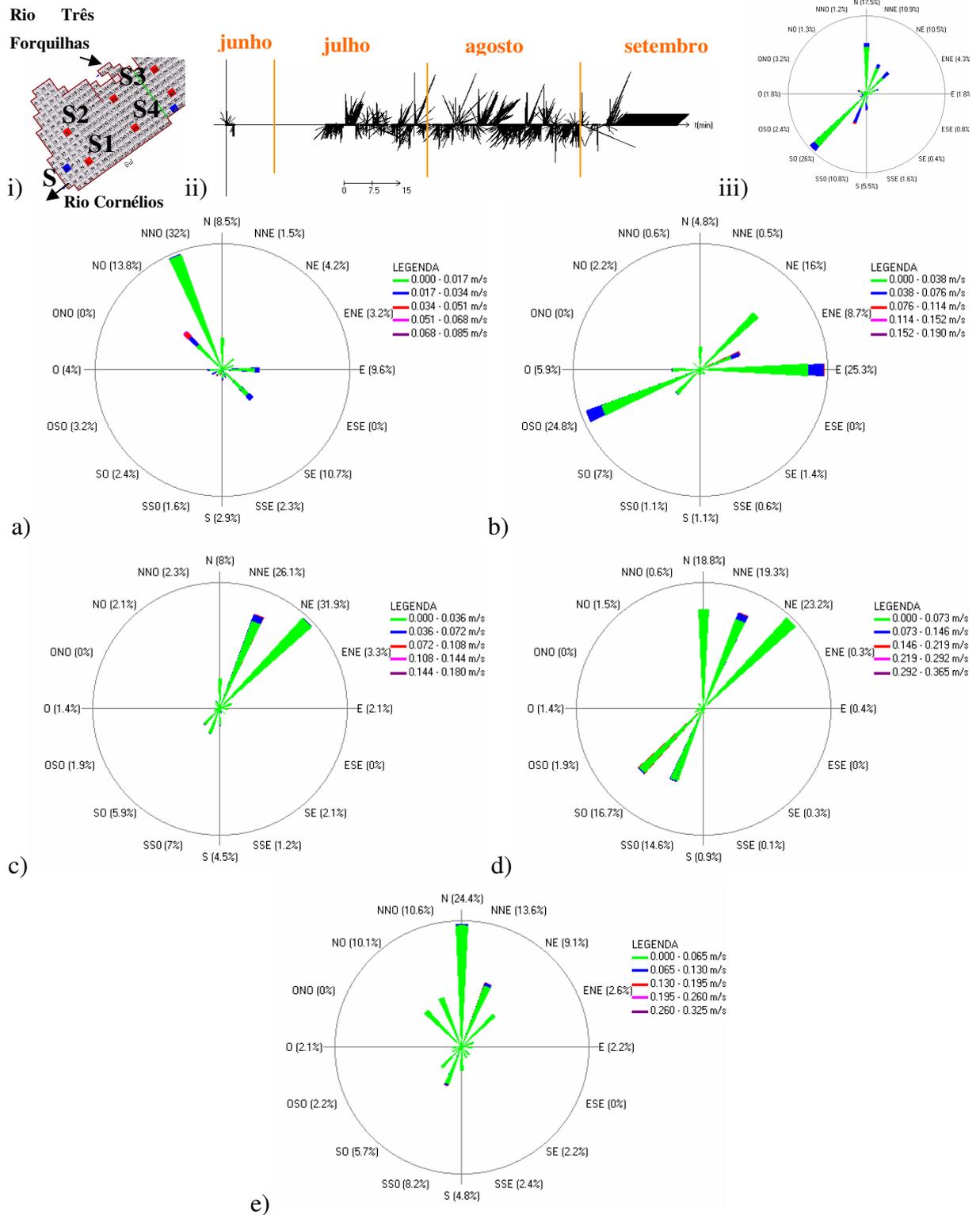


Figura 5.60 Rosa da velocidade da água da região Sul da lagoa Itapeva para o inverno de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) Rosa da velocidade da água no ponto S, b) Rosa da velocidade da água no ponto S1, c) Rosa da velocidade da água no ponto S2, d) Rosa da velocidade da água no ponto S3, e) Rosa da velocidade da água no ponto S4

2. Região Central

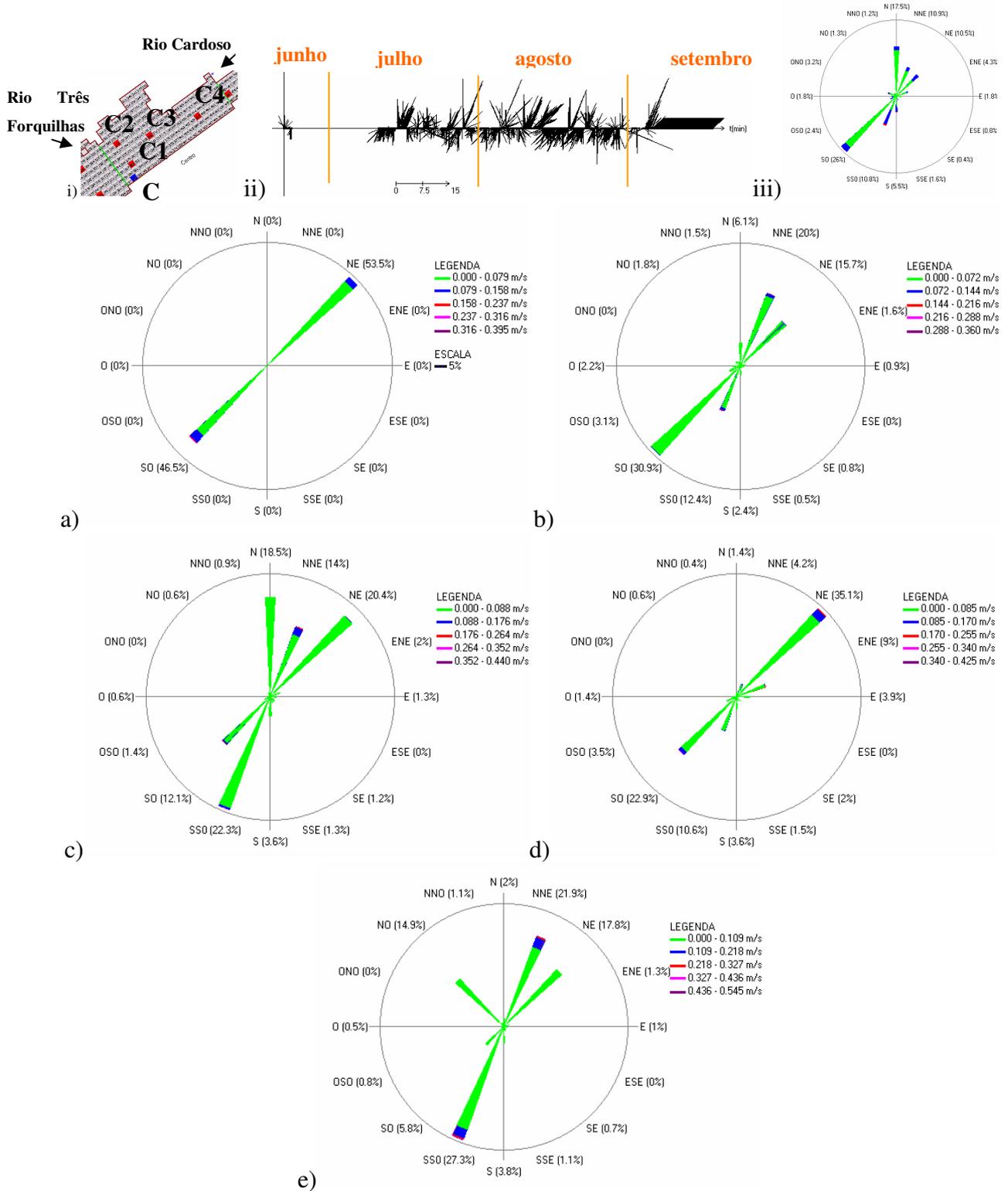


Figura 5.61 Rosa da velocidade da água da região Centro da lagoa Itapeva para o inverno de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) Rosa da velocidade da água no ponto C, b) Rosa da velocidade da água no ponto C1, c) Rosa da velocidade da água no ponto C2, d) Rosa da velocidade da água no ponto C3, e) Rosa da velocidade da água no ponto C4

As direções do escoamento têm o mesmo comportamento de outros períodos. A diferença básica está, na verdade, na velocidade da água e no número de ocorrências para cada direção.

A velocidade média na região central, para os pontos selecionados, foi de 2,39 cm/s, o desvio padrão foi de 0,72 cm/s e a velocidade média máxima foi de 44,30 cm/s. A velocidade máxima apresentou-se novamente em C4 que chegou a 0,55 cm/s. Os ventos mais fortes estão uniformemente distribuídos, conforme a Figura 5.61.

3. Região Norte

Na região norte o comportamento foi o mesmo que no verão e que no outono, ou seja, todos os pontos selecionados tendem a seguir a direção paralelas às margens, sendo que a intensidade na direção NE vai diminuindo conforme se aproxima da extremidade superior da lagoa (Figura 5.62).

A velocidade média na região norte, para os pontos selecionados, foi de 2,66 cm/s, o desvio padrão foi de 0,90 cm/s e a velocidade média máxima foi de 42,75 cm/s. Porém, no ponto N1 a velocidade máxima chegou a 0,67 cm/s, no ponto N4 foi de 0,21 cm/s.

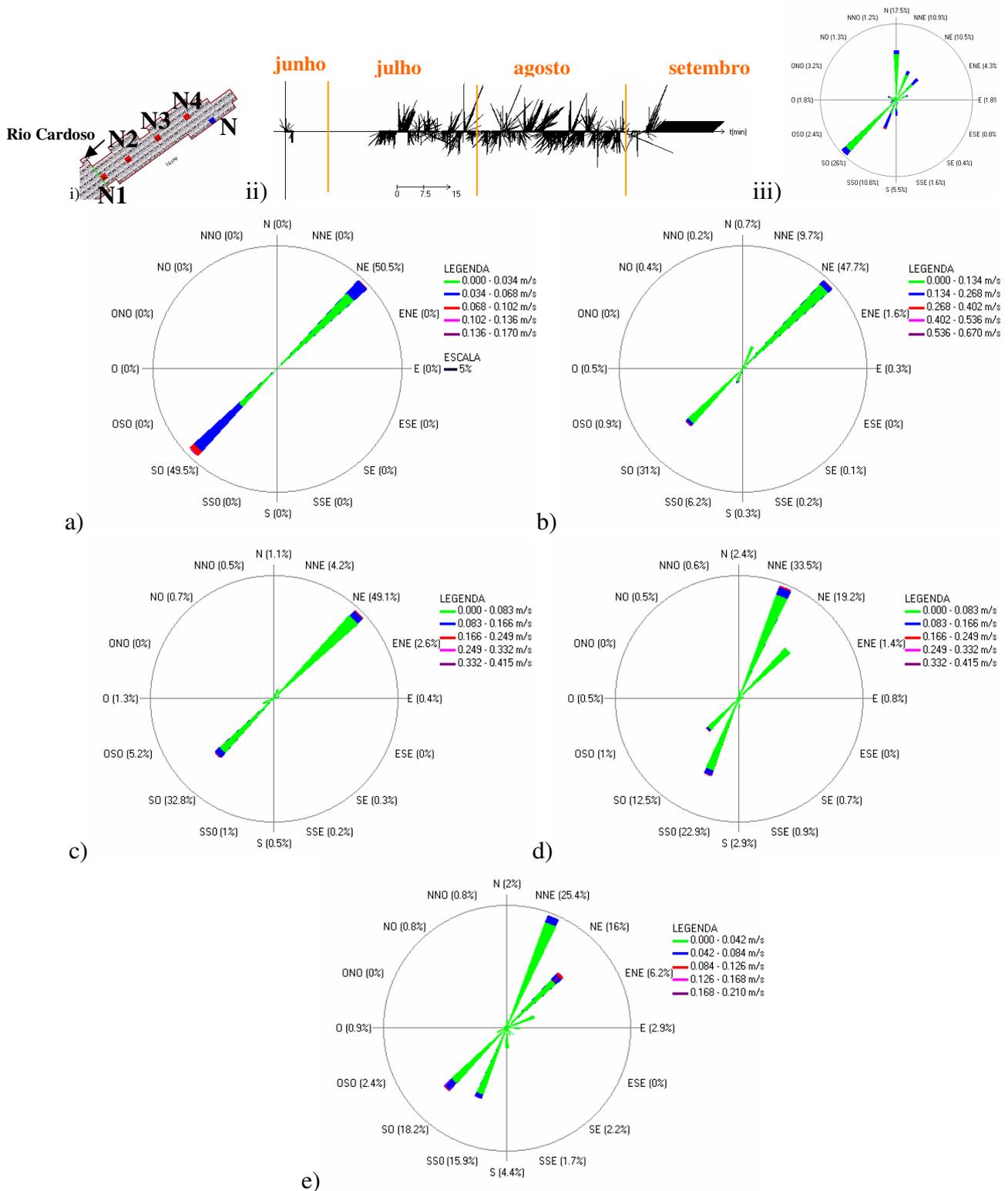


Figura 5.62 Rosa da velocidade da água da região Norte da lagoa Itapeva para o inverno de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) Rosa da velocidade da água no ponto N, b) Rosa da velocidade da água no ponto N1, c) Rosa da velocidade da água no ponto N2, d) Rosa da velocidade da água no ponto N3, e) Rosa da velocidade da água no ponto N4

5.3.4.4 Primavera – 22/09/1999 a 17/12/1999

1. Região Sul

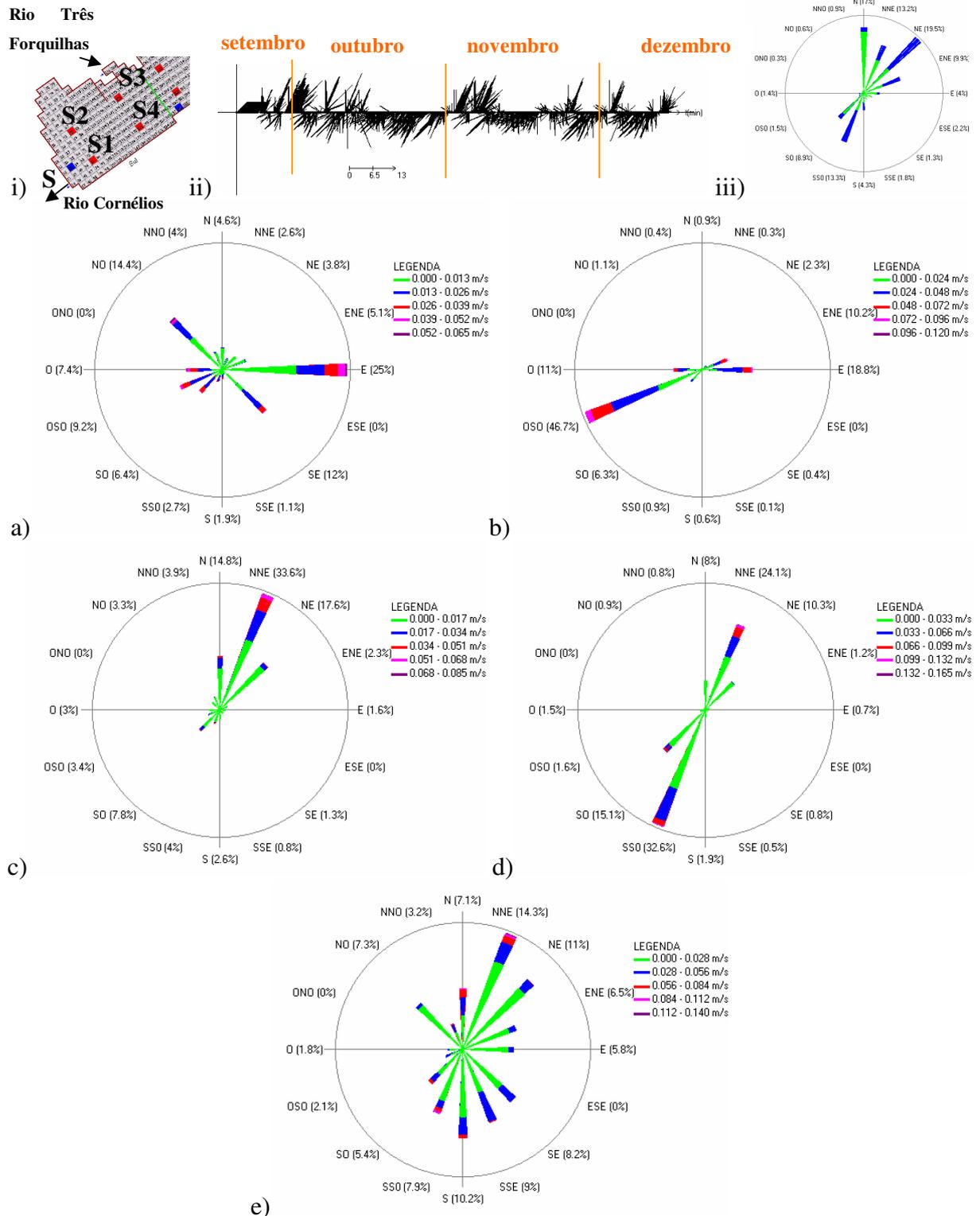


Figura 5.63 Rosa da velocidade da água da região Sul da lagoa Itapeva para a primavera de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) Rosa da velocidade da água no ponto S, b) Rosa da velocidade da água no ponto S1, c) Rosa da velocidade da água no ponto S2, d) Rosa da velocidade da água no ponto S3, e) Rosa da velocidade da água no ponto S4

Para esta época do ano, a variabilidade na direção do vento não foi muito grande. Através da Figura 5.63 pode-se ainda ver que foi neste período que houve maior quantidade de ventos moderados, resultando em velocidades maiores em todas as regiões.

O comportamento da primavera assemelha-se bastante ao do verão. Em a) pode-se dizer que em razão do ponto de coleta estar próximo à margem e em função do vento predominante neste período ser do quadrante NE, a resultante principal da água é a direção E; já em b) o ponto S1 não sofre a mesma influência que em a) e sua direção predominante é a OSO; em c) apesar deste ponto, S2, a princípio parecer apresentar o mesmo comportamento que o ponto S1, ele tem grande influência da região mais ao sul, representada pela seta cinza na figura, fazendo com que a direção predominante seja a NNE; em d) o ponto S3 tem a direção limitada pela margem direita, mas as demais direções são conseqüências diretas do vento; e e) o ponto S4 está limitado pelo braço que entra na lagoa do lado esquerdo, fazendo que no quadrante NO tenha velocidades bem pequenas (Figura 5.63).

A velocidade média na região sul, para os pontos selecionados, foi de 2,09 cm/s, o desvio padrão foi de 0,62 cm/s e a velocidade média máxima foi de 11,52 cm/s.

2. Região Central

Na Figura 5.64, b) tem influência da vazão que entra na lagoa pelo rio Três Forquilhas, fazendo que suas direções predominantes sejam NE, NNE e SSO; em c) o efeito da margem faz com que todos os ventos do quadrante NE se agrupem na direção SSO; em d) a direção predominante é SO; em e) as margens também influenciam no redirecionamento, fazendo com que a direção predominante seja SSO e NNE dependendo da direção de vento atuante.

A velocidade média na região sul, para os pontos selecionados, foi de 3,50 cm/s, o desvio padrão foi de 1,10 cm/s e a velocidade média máxima foi de 24,40 cm/s.

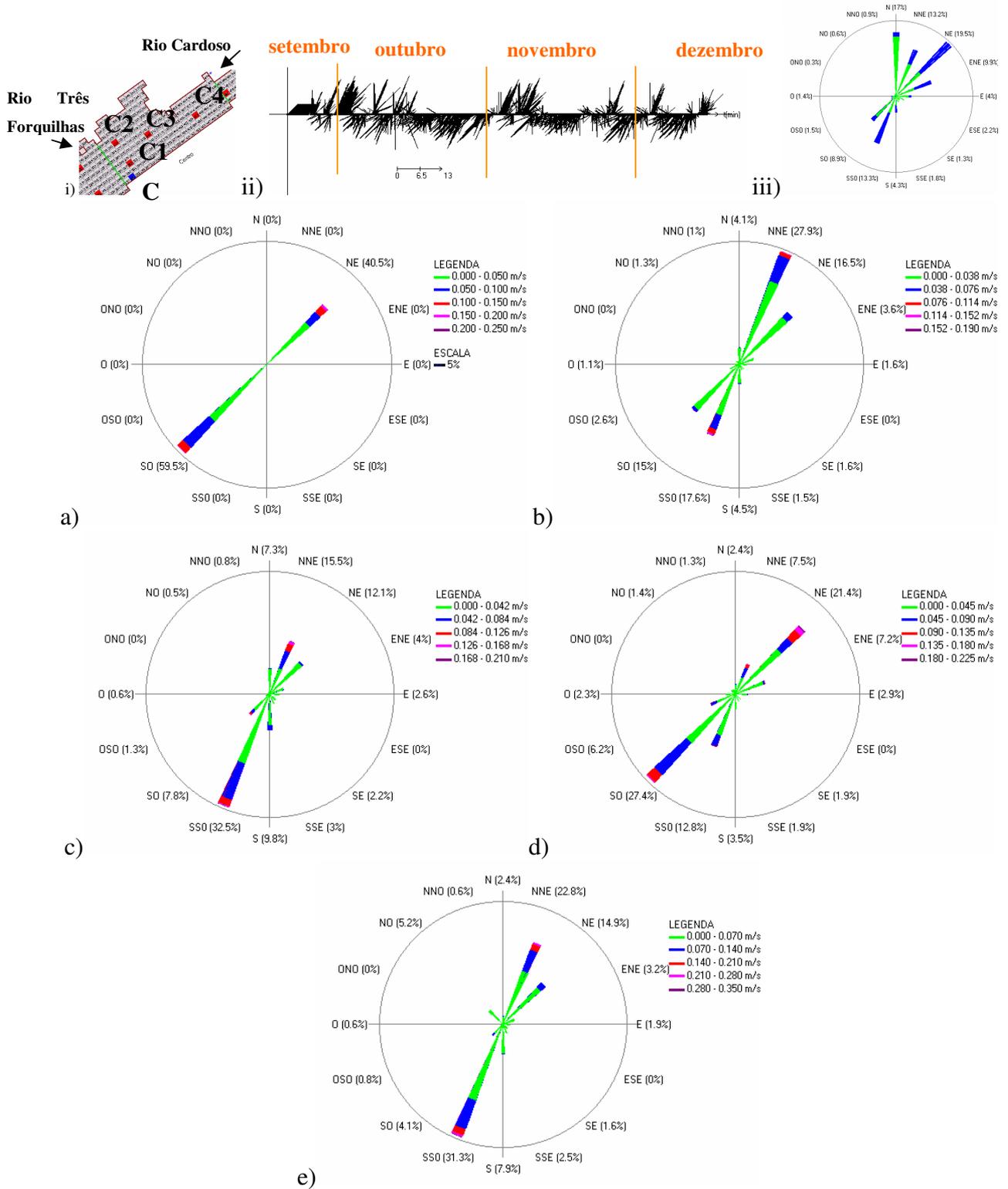


Figura 5.64 Rosa da velocidade da água da região Centro da lagoa Itapeva para a primavera de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) Rosa da velocidade da água no ponto C, b) Rosa da velocidade da água no ponto C1, c) Rosa da velocidade da água no ponto C2, d) Rosa da velocidade da água no ponto C3, e) Rosa da velocidade da água no ponto C4

3. Região Norte

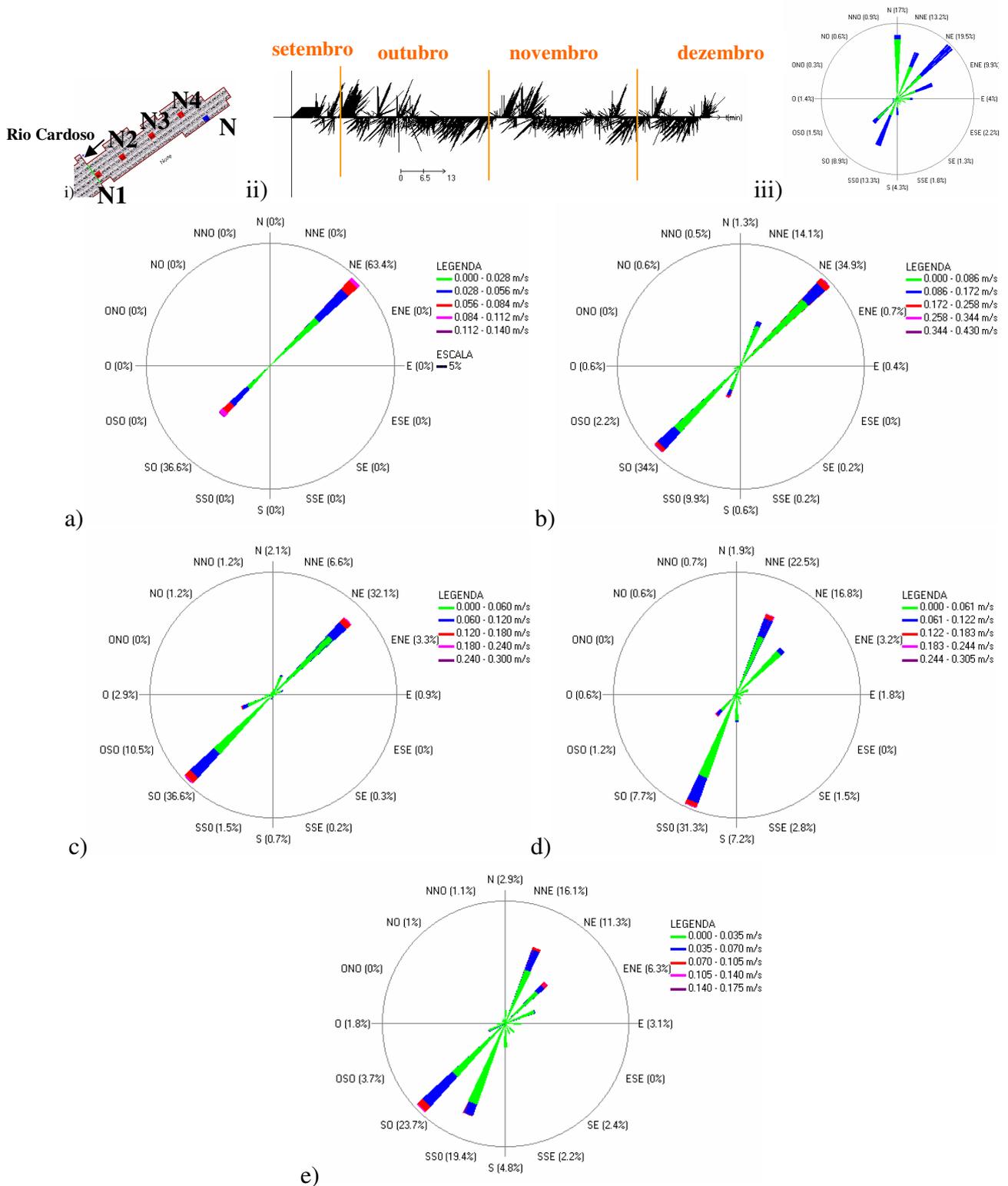


Figura 5.65 Rosa da velocidade da água da região Norte da lagoa Itapeva para a primavera de 1999. i) Mapa de localização dos pontos medidos, ii) Vento na lagoa em função do tempo (m/s), iii) Rosa dos ventos, a) Rosa da velocidade da água no ponto N, b) Rosa da velocidade da água no ponto N1, c) Rosa da velocidade da água no ponto N2, d) Rosa da velocidade da água no ponto N3, e) Rosa da velocidade da água no ponto N4

Na região norte o comportamento foi o mesmo para todo o ano, ou seja, todos os pontos selecionados tendem a seguir a direção paralela à margem, sendo que a intensidade na direção NE vai diminuindo conforme se aproxima da extremidade superior da lagoa (Figura 5.65).

A velocidade média na região norte, para os pontos selecionados, foi de 3,98 cm/s, o desvio padrão foi de 1,39 cm/s e a velocidade média máxima foi de 30,35 cm/s. Enquanto no ponto N1 a velocidade máxima chegou a 0,43 cm/s, no ponto N4 foi de 0,17 cm/s.

Tabela 5.7 Velocidade e direção da água para os pontos de coleta durante as estações do ano e durante as campanhas

	S			C			N		
	Va (cm/s)	Dir	Va max (cm/s)	Va (cm/s)	Dir	Va max (cm/s)	Va (cm/s)	Dir	Va max (cm/s)
verão	2.44	ONO	7.70	4.07	SO	21.10	2.79	SO	13.80
outono	1.69	SE	7.90	3.50/2.58	NE/SO	26.30	2.38/1.45	NE/SO	14.80
inverno	0.46/2.67	SSE/ESE	8.60	2.82/4.19	SO/NE	39.70	1.86/3.16	SO/NE	17.10
primavera	2.51	ONO	6.40	4.38	SO	28.80	3.04	SO	13.90
1campanha	2.16	ONO	4.80	4.13	SO	8.60	2.81	SO	5.60
2campanha	1.51/4.03	SE/ESE	5.50	5.09	NE	14.10	3.79	NE	8.90
3campanha	4.00/1.70	ESE/ONO	5.50	3.22/5.77	SO/NE	13.40	4.89/2.12	NE/SO	10.00

* S ; C ; N - pontos de amostragem Sul, Centro e Norte respectivamente

Va - velocidade média da água na direção predominante; Dir - direção predominante da água

Va max - velocidade máxima alcançada considerando todas as direções

5.3.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Apesar de se utilizar uma lei empírica para a vazão de saída da lagoa e a partir desta determinar os outros aportes, conseguiu-se uma boa estimativa da vazão de entrada da lagoa. Isto pode ser comprovado pela boa variação dos níveis no programa IPH-A, pela coerência em termos de magnitude da vazão média comparado-a com a do Rio Maquiné para o mesmo período.

O estudo hidrodinâmico foi capaz de avaliar que a variação do nível de água em função dos aportes de água é lenta, a taxa de variação do nível considerando a média móvel de seis dias é em torno de 1,5 cm/dia e o máximo registrado para o caso de crescimento do nível ficou em aproximadamente 9 cm/dia. Dessa maneira esta variação é pequena quando comparada à modificação dos níveis e as seiches criadas pelo efeito do vento sobre a lagoa. O valor médio de variação de nível diário causado pelo vento está em torno de 22 cm/dia.

Durante as campanhas a variação dos níveis em função do aporte de água ficou na faixa dos 10 cm em 5 dias. Este valor considera a média móvel de seis dias utilizada para reduzir os efeitos do vento.

Ao analisar os níveis com o efeito do vento podem-se encontrar facilmente variações de 1 cm/hora.

Os efeitos das seiches sobre os níveis estão vinculados com a duração, intensidade e direção dos ventos. A variabilidade na direção destes pode ser alta dependendo da estação do ano. O período médio de ocorrência encontrado foi de aproximadamente cinco horas.

A importância das seiches na caracterização do sistema está no fato de que o vento ao soprar numa determinada direção faz com que apareça o desnível entre as regiões da lagoa. A superfície da lagoa deixa de ser horizontal. Na região onde o nível de água está mais alto, em geral, a velocidade da água e a altura da onda são maiores.

Além das variações em função dos aportes de água e das seiches, há também a variação de nível em função das ondas geradas pelos ventos. Através dos cálculos, estima-se que as alturas das ondas alcancem valores de até 0,50 m.

Verifica-se ainda que o modelo tem bom funcionamento pela sobreposição das seiches simuladas em intensidade e duração, e dos níveis da água, com as variações medidas na lagoa.

Se existe um padrão de correntologia, seria aquele que, de maneira geral, identifica fluxos de água dentro da lagoa seguindo “caminhos” condicionados pela geomorfologia, e influenciados principalmente pelos ventos e pelas vazões afluentes.

As regiões sul e centro da lagoa Itapeva tendem a trabalhar em conjunto, principalmente quando o regime de ventos é forte. A região norte está, em geral, funcionando mais isoladamente em razão da geomorfologia da lagoa. Justamente pela freqüente troca da predominância dos ventos ora do quadrante SO ora do NE existe a renovação da água na região norte da lagoa.

5.4 VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Como variáveis ambientais, foram estudados os sólidos suspensos (SS) e a turbidez. De posse desses dados foi feita a correlação com os dados de nível, de velocidade da água e da altura da onda gerada pelo vento. Procurou-se estabelecer um padrão de variação das variáveis ambientais em função das variáveis hidrodinâmicas, existindo ainda a possibilidade de que para cada região da lagoa houvesse um comportamento distinto.

A princípio elaborou-se uma série de superfícies para cada campanha, pelo método das Diferenças Mínimas Quadradas, relacionando cada variável ambiental com as variáveis hidrodinâmicas. Considerou-se ainda que as variáveis hidrodinâmicas representam a variação da turbidez e dos sólidos suspensos pelos seus valores médios em três hipóteses: uma hora, duas horas e quatro horas.

5.4.1 CORRELAÇÕES

As correlações de SS para o ano de 1999 utilizaram n-amostral de 36 e para cada campanha o n-amostral de 12. Para a Turbidez o n-amostral anual foi 1443, enquanto que para cada campanha o n-amostral foi de 481. A diferença entre o n-amostral dos SS e da turbidez está no intervalo de amostragem que para os SS foi a cada 4 horas e para a turbidez foi a cada 15 minutos. O coeficiente de correlação utilizado foi o de Pearson, r , um índice sem dimensão situado entre -1,0 e 1,0 inclusive, que reflete a extensão de uma relação linear entre dois conjuntos de dados. Os valores negativos das correlações significam uma relação inversa, enquanto que os positivos uma relação direta. O grau de significância adotado foi $p < 0,05$.

Na Tabela 5.8 encontram-se as correlações para o ano de 1999. Em função da variabilidade das condições de contorno, vazões afluentes e ventos, a caracterização anual fica debilitada, apresentando correlações baixas entre a velocidade do vento, velocidade da água e nível da água com os sólidos suspensos e a turbidez. Para tentar caracterizar melhor se existe ou não uma relação entre as variáveis citadas serão analisadas cada campanha em separado.

Tabela 5.8 Correlações para a lagoa Itapeva durante a ano de 1999 entre nível de água, velocidade do vento e velocidade da água com sólidos suspensos e turbidez para os pontos de amostragem

Pontos	1999					
	SS			Turbidez		
	Nível	Vv	Va	Nível	Vv	Va
S	0.21	-0.09	-0.25	0.36	0.06	-0.07
C	0.21	0.58	0.31	0.54	0.28	0.30
N	0.64	0.47	0.43	0.79	0.33	0.12

* S ; C; N - pontos de amostragem Sul, Centro e Norte respectivamente

Va - velocidade da água; Vv - velocidade do vento

SS - sólidos suspenos

Comparando as correlações com dados instantâneos entre as campanhas não se pode observar uma característica comum. Para explicar melhor as correlações da Tabela 5.9, Tabela 5.10, Tabela 5.11, dar-se-á uma noção da direção predominante do vento após cada tabela de cada campanha. Estas correlações são melhores explicadas quando consideramos o *fetch* e a altura de onda estimada.

Tabela 5.9 Correlações para a lagoa Itapeva para a 1ª campanha (02/03/1999 a 07/03/1999) entre nível de água, velocidade do vento e velocidade da água com sólidos suspensos e turbidez para os pontos de amostragem

Pontos	1ª Campanha					
	SS			Turbidez		
	Nível	Vv	Va	Nível	Vv	Va
S	-0.18	0.65	0.30	-0.06	0.34	0.20
C	-0.42	0.61	0.20	-0.47	0.33	0.54
N	-0.24	0.14	0.30	-0.32	0.39	0.08

* S ; C; N - pontos de amostragem Sul, Centro e Norte respectivamente

Va - velocidade da água; Vv - velocidade do vento

SS - sólidos suspenos

Nesta campanha, as direções predominantes foram ventos NNE, NE, ENE (ver Figura 5.66), considerando ainda que no Norte o *fetch* nestas direções também é pequeno, a altura de onda resultante e a velocidade da água também serão pequenas. Já no centro, ambos, *fetch* e altura de onda que são ligados diretamente com o vento têm valores médios, e com isso conseguem representar melhor as oscilações dos SS. No sul, apesar do *fetch* ser alto, o ponto de amostragem está próximo da margem da lagoa, que neste caso está perpendicular a direção do vento, fazendo com que a velocidade da água seja reduzida. Através das correlações apresentadas o nível praticamente não influencia na variação dos SS e da turbidez durante a campanha de verão principalmente no ponto de amostragem ao sul da lagoa.

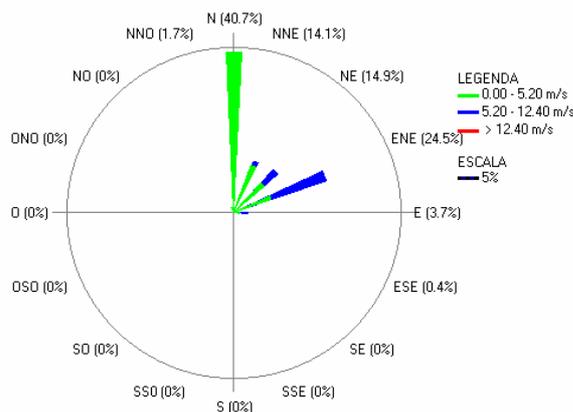


Figura 5.66 Rosa dos ventos durante a 1ª campanha (02/03/1999 a 07/03/1999)

Para a 2ª campanha (outono) as direções predominantes foram ventos fortes OSO e SO (ver Figura 5.67). Os pontos de amostragens das regiões centro e norte apresentam *fetch* e altura de onda razoáveis, sendo que a altura varia de uma média de 0,4 m até valores em torno de 2,0 m. Para a região norte que sofre um estreitamento na largura as variações de nível são mais acentuadas que nas outras regiões quando o vento vem do quadrante SO. Ao observar a Tabela 5.10 verifica-se que as melhores correlações para SS são do ponto de coleta Norte para as três variáveis, para o ponto Central a V_v e V_a também tiveram boas correlações para SS.

Tabela 5.10 Correlações para a lagoa Itapeva para a 2ª campanha (21/05/1999 a 26/05/1999) entre nível de água, velocidade do vento e velocidade da água com sólidos suspensos e turbidez para os pontos de amostragem

Pontos	2ª Campanha					
	SS			Turbidez		
	Nível	Vv	Va	Nível	Vv	Va
S	0.47	-0.31	-0.51	0.10	-0.28	-0.61
C	0.20	0.97	0.98	-0.73	0.09	0.09
N	0.94	0.91	0.95	0.26	0.38	0.37

* S ; C; N - pontos de amostragem Sul, Centro e Norte respectivamente

Va - velocidade da água; Vv - velocidade do vento

SS - sólidos suspensos

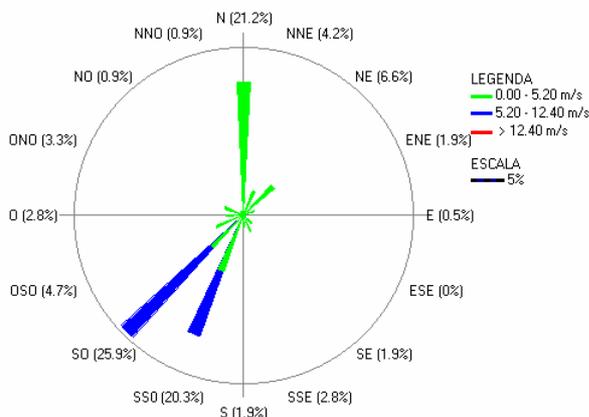


Figura 5.67 Rosa dos ventos durante a 2ª campanha (21/05/1999 a 26/05/1999)

Na 3ª campanha (Tabela 5.11) não houve direção predominante do vento (Figura 5.68) durante toda a campanha. Do dia 14 até a metade do dia 16 (Tabela 5.12) os ventos predominantes eram provenientes do quadrante SO e no próprio dia 16 até o fim da campanha (Tabela 5.13) passou para o quadrante NE. Em razão disso foram feitas três correlações distintas: o período inteiro, do dia 14 ao 16 e do dia 16 ao 19.

Tabela 5.11 Correlações para a lagoa Itapeva para a 3ª campanha (14/08/1999 a 19/08/1999) entre nível de água, velocidade do vento e velocidade da água com sólidos suspensos e turbidez para os pontos de amostragem

Pontos	3ª Campanha					
	SS			Turbidez		
	Nível	Vv	Va	Nível	Vv	Va
S	0.66	-0.35	-0.60	-0.07	0.33	0.33
C	-0.64	0.62	-0.18	-0.19	0.71	0.35
N	0.88	0.49	0.11	0.81	0.77	0.68

* S ; C; N - pontos de amostragem Sul, Centro e Norte respectivamente

Va - velocidade da água; Vv - velocidade do vento

SS - sólidos suspensos

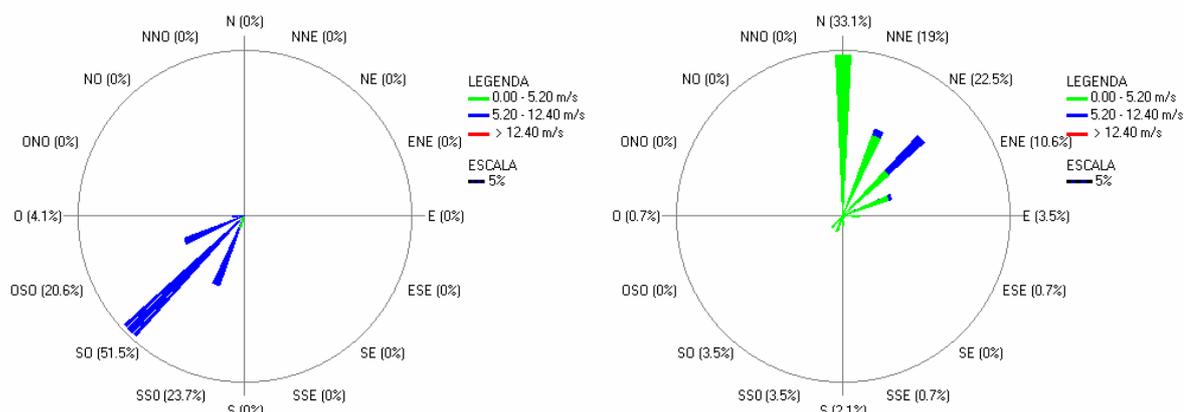


Figura 5.68 Rosa dos ventos na campanha de ago/99 – dias 14 a 16 e 16 a 19

Para os dias 14 a 16 o vento predominante faz com o *fetch* e a altura de onda sejam altos apenas para o Norte e para as demais regiões, a velocidade do vento e a velocidade da água não representam a variação dos sólidos suspensos.

Tabela 5.12 Correlações com SS para a campanha – 14 a 16 ago/99

Pontos	3ª Campanha 14/08 a 16/08					
	SS			Turbidez		
	Nível	Vv	Va	Nível	Vv	Va
S	0.65	-0.67	-0.76	-0.18	0.43	0.74
C	-0.63	0.59	-0.92	0.03	0.57	-0.02
N	0.80	0.79	0.45	0.41	0.72	0.37

* S ; C; N - pontos de amostragem Sul, Centro e Norte respectivamente

Va - velocidade da água; Vv - velocidade do vento

SS - sólidos suspensos

Enquanto que para os dias 16 a 19, em função do vento, o *fetch* e a altura de onda são altos caracterizando a ressuspensão dos SS para as regiões centro e sul, o oposto do início da campanha.

Tabela 5.13 Correlações com SS para a campanha – 16 a 19 ago/99

Pontos	3ª Campanha 16/08 a 19/08					
	SS			Turbidez		
	Nível	Vv	Va	Nível	Vv	Va
S	-0.27	0.66	0.89	0.38	0.28	0.23
C	-0.88	0.72	0.88	-0.30	0.55	0.46
N	0.24	-0.58	-0.70	0.15	0.11	-0.15

* S ; C; N - pontos de amostragem Sul, Centro e Norte respectivamente

Va - velocidade da água; Vv - velocidade do vento

SS - sólidos suspensos

Apenas os níveis de água não caracterizam a variação de sólidos suspensos, mesmo sabendo que a variação do nível de água é função das vazões de entrada, dos eventos de chuva, da evaporação, do vento que provoca as seiches (ondas longas), e das oscilações na altura de onda (ondas curtas). Justamente por isso, os níveis não são um parâmetro eficaz, pois é possível que haja casos em que o nível da lagoa pode estar alto e haver rajadas de vento de baixa intensidade. A melhor estimativa foi a utilização da altura de onda, pois dependendo dela ter-se-á uma mistura parcial ou total da coluna de água.

Vale salientar que, conforme a resolução nº 20 do CONAMA (1992), a lagoa Itapeva não seria enquadrada em nenhuma das quatro classes previstas, pois os valores de turbidez, em geral, sempre apresentam valores superiores a 100 NTU. Conforme Cardoso (2001), as lagoas da região costeira do RS são consideradas polimíticas, o que justifica uma mistura total das massas de água, podendo gerar altos valores de turbidez.

5.4.2 GRÁFICOS DE SUPERFÍCIE

Para ilustrar melhor as diferentes formas de agrupamento dos dados serão apresentados gráficos de superfícies. O ajuste das superfícies é feito através do método das ‘Diferenças Mínimas Quadradas’, para representar as variações dos sólidos suspensos (SS) e turbidez em função do nível (Ni), da velocidade da água (Va) e da altura da onda (Ao), para cada campanha. Foram consideradas médias de uma hora das variáveis a fim de indicar inicialmente um padrão ou não de comportamento. No eixo Z estão por vezes graficados a turbidez ou os SS, e as variáveis hidrodinâmicas estão nos eixos X e Y. Os pontos graficados

correspondem aos valores calculados a partir dos dados coletados em campo e estes deram origem às superfícies mostradas a seguir.

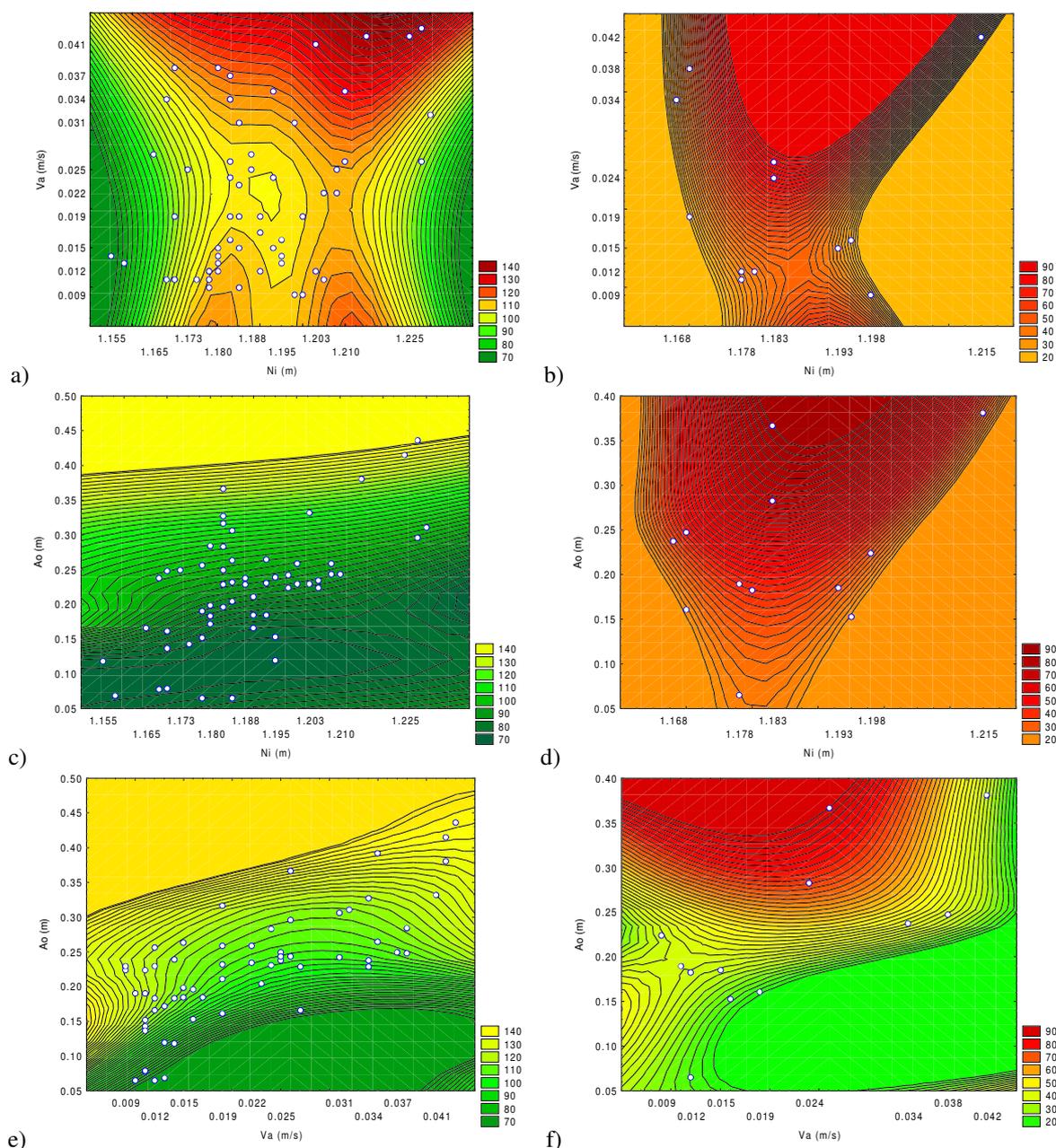


Figura 5.69 Turbidez em função de a) Ni e Va , c) Ni e Ao , e) Va e Ao . Sólidos Suspensos em função de b) Ni e Va , d) Ni e Ao , f) Va e Ao . Ni – Nível da Água, Va – Velocidade da Água, Ao – Altura de onda. Utilizando médias de 1 hora para a 1ª campanha (Verão) para o Ponto Sul

Na Figura 5.69, independente da Va , os valores maiores de turbidez ficaram mais altos para Ni intermediários (a). Quando considerada a turbidez dependente do Ni e da Ao , têm-se que independente do Ni , se a Ao está alta a turbidez também estará (b). Conseqüentemente se considerado em relação à Ao e Va , quanto maior a Ao e Va maior a turbidez (c). Já para os SS, o aumento pode ser visualizado quando Va ou Ao são altos,

independente do Ni (d, e). Os SS quando comparados com Va e Ao apresentam uma tendência de aumento da concentração dos SS com o crescimento da Ao (f).

Os gráficos de superfícies no Outono para o ponto Sul estão representados na Figura 5.70.

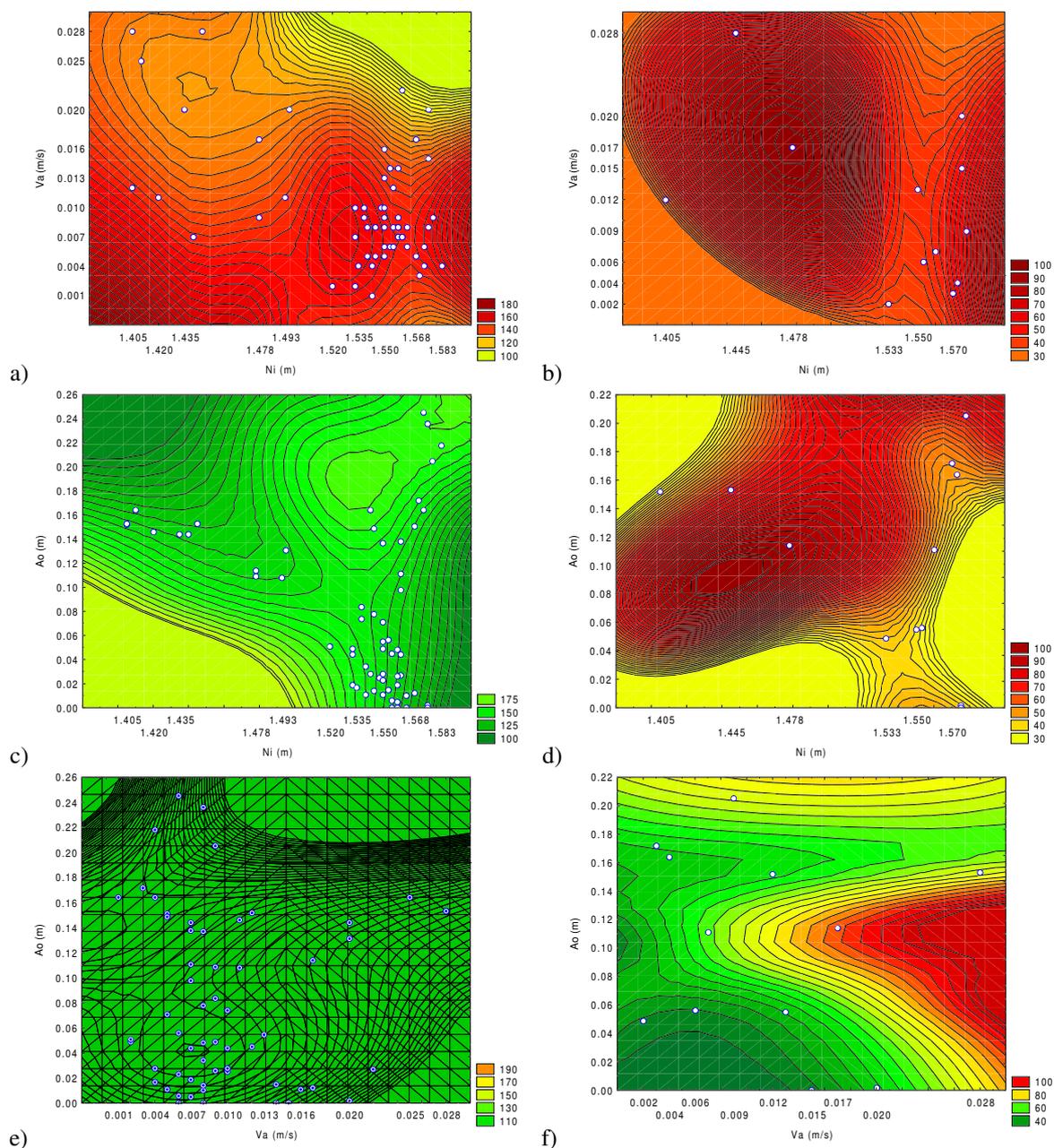


Figura 5.70 Turbidez em função de a) Ni e Va , c) Ni e Ao , e) Va e Ao . Sólidos Suspensos em função de b) Ni e Va , d) Ni e Ao , f) Va e Ao . Ni – Nível da Água, Va – Velocidade da Água, Ao – Altura de onda. Utilizando médias de 1 hora para a 2ª campanha (Outono) para o Ponto Sul

Observando a Figura 5.70, para o outono a turbidez se manteve entre os valores 100 e 200. Em relação ao Ni e à Va , a turbidez teve valores mais altos quando foram encontrados

Ni mais altos (a). No que se refere ao Ni e Ao , não teve uma tendência de crescimento, mantendo-se constante (b). Quanto a Va e Ao , a turbidez cresceu com o aumento ou da Va ou da Ao (c). Os SS apresentaram uma tendência de comportamento semelhante àquela mostrada nos gráficos de turbidez.

As representações gráficas para o inverno no pontos sul estão demonstradas na Figura 5.71.

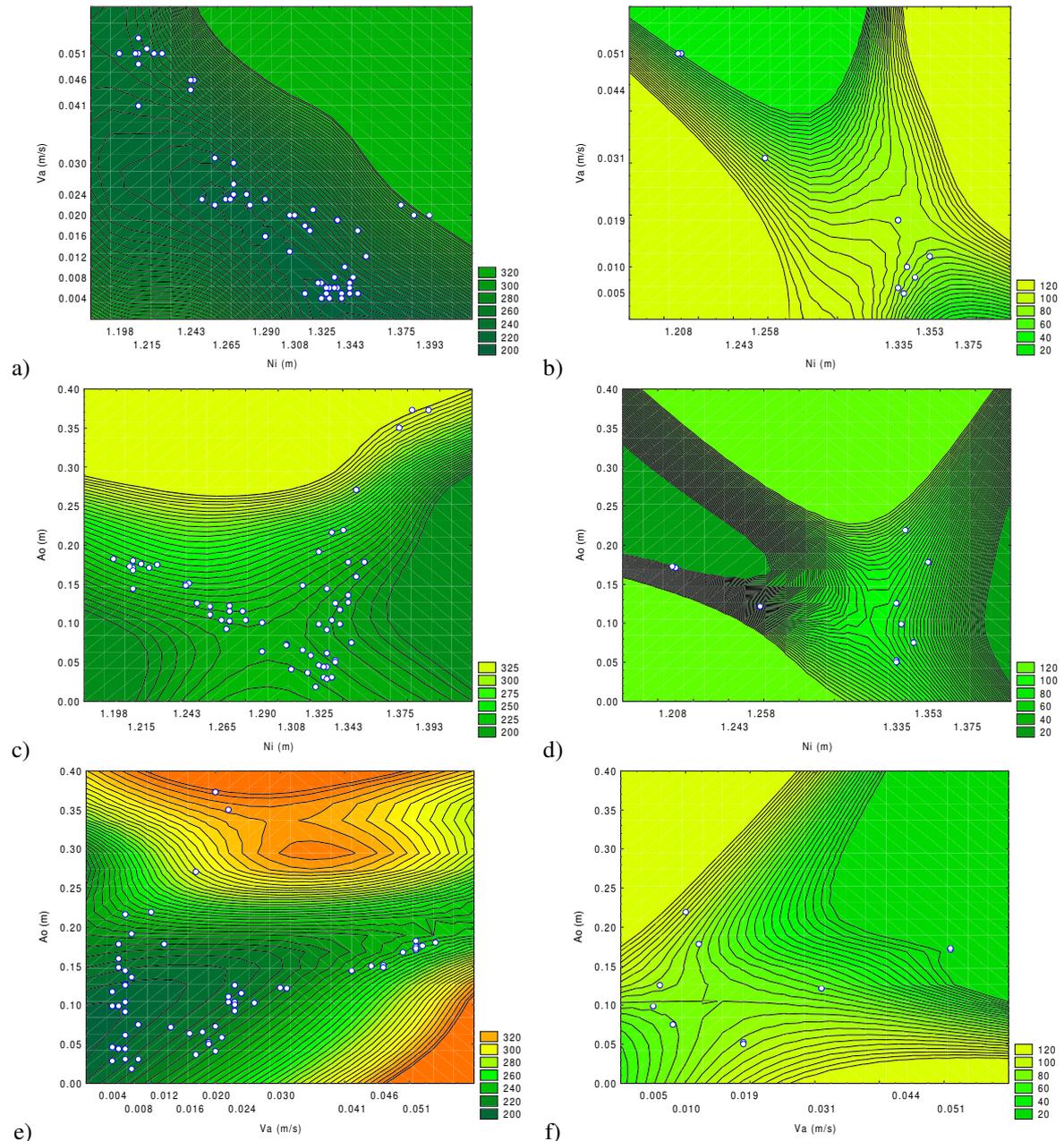


Figura 5.71 Turbidez em função de a) Ni e Va , c) Ni e Ao , e) Va e Ao . Sólidos Suspensos em função de b) Ni e Va , d) Ni e Ao , f) Va e Ao . Ni – Nível da Água, Va – Velocidade da Água, Ao – Altura de onda. Utilizando médias de 1 hora para a 3ª campanha (Inverno) para o Ponto Sul

Podem-se notar nos gráficos que a turbidez e *SS* se mantêm constante independente do *Ni* e da *Va* (a, d). Quanto maior a *Ao*, independente do *Ni*, maior a turbidez (b) e quanto maior a *Va* e a *Ao*, a turbidez também aumenta (c). Os valores mais altos de *SS* ocorreram mais em função da *Ao* (e, f) do que das demais variáveis.

Os gráficos de superfícies no Verão para o ponto Central estão representados na Figura 5.72.

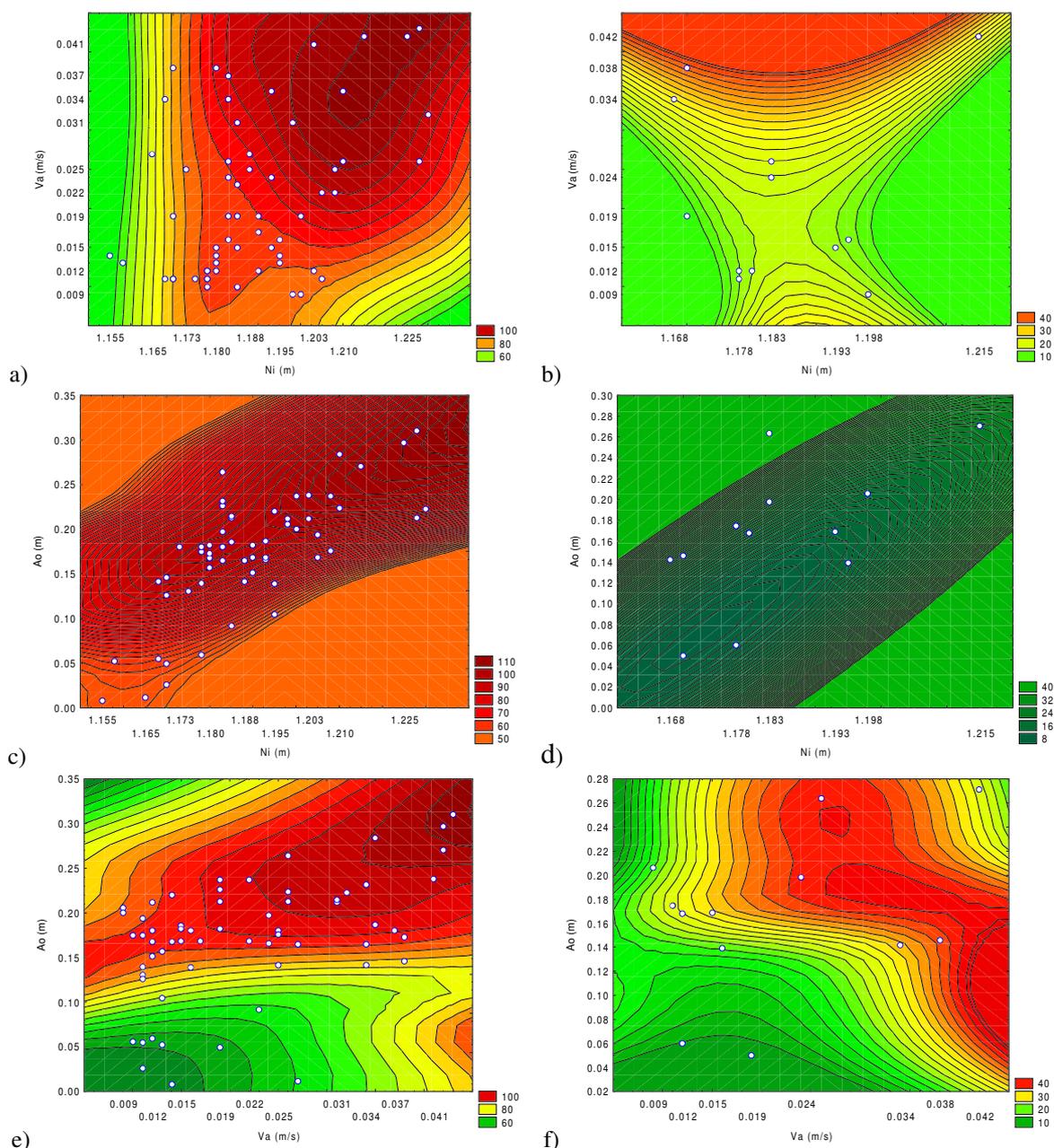


Figura 5.72 Turbidez em função de a) *Ni* e *Va*, c) *Ni* e *Ao*, e) *Va* e *Ao*. Sólidos Suspensos em função de b) *Ni* e *Va*, d) *Ni* e *Ao*, f) *Va* e *Ao*. *Ni* – Nível da Água, *Va* – Velocidade da Água, *Ao* – Altura de onda. Utilizando médias de 1 hora para a 1ª campanha (Verão) para o Ponto Central

Para o ponto de coleta central da lagoa, a turbidez aumenta em função da Va e de Ao , independente do Ni (a, b, c). A variação dos SS está associada de maneira mais clara, pois quanto maior a Va ou a Ao , maiores os valores de SS (d, e, f).

A Figura 5.73 demonstra os casos para o outono para o Ponto Central.

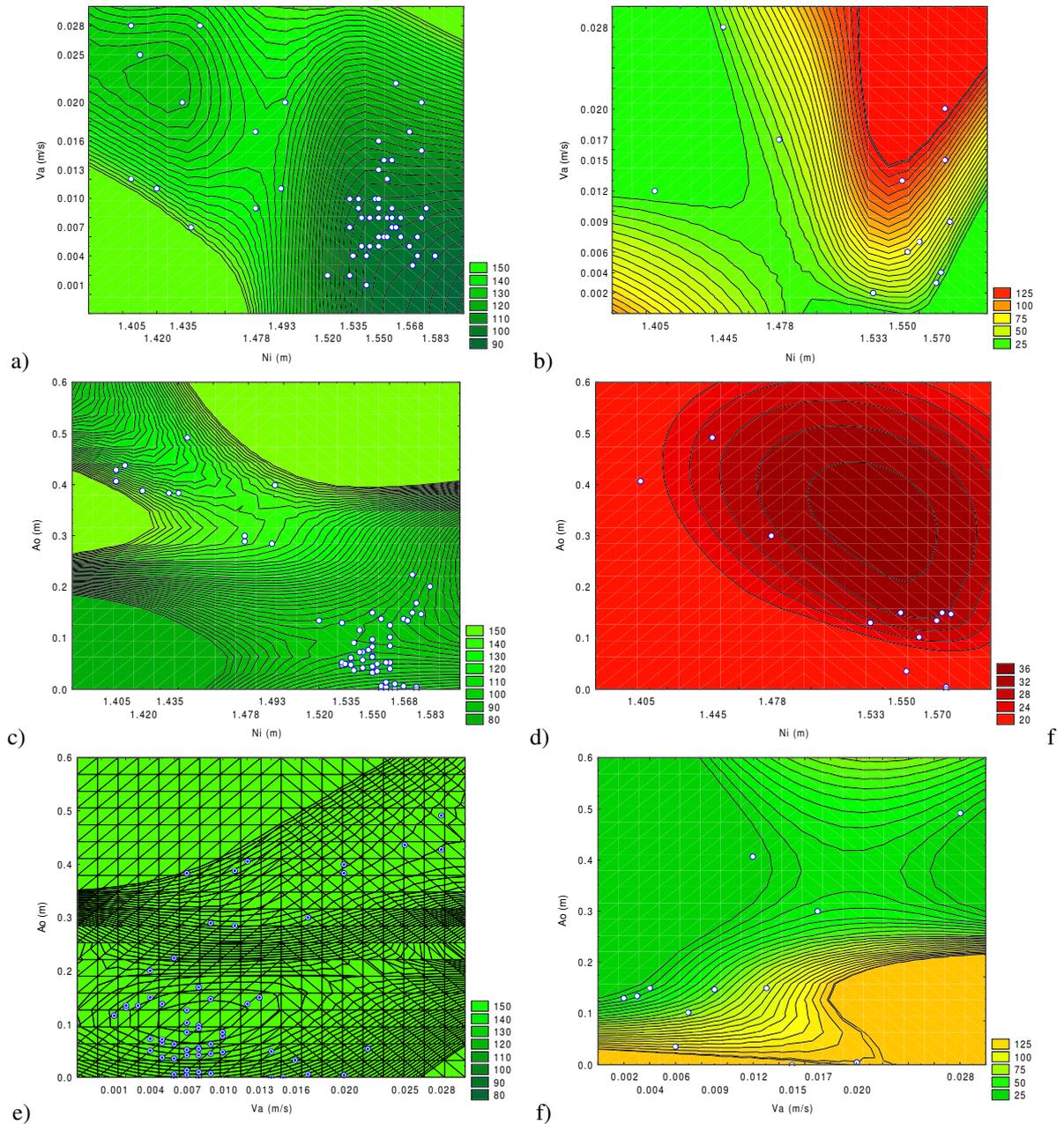


Figura 5.73 Turbidez em função de a) Ni e Va , c) Ni e Ao , e) Va e Ao . Sólidos Suspensos em função de b) Ni e Va , d) Ni e Ao , f) Va e Ao . Ni – Nível da Água, Va – Velocidade da Água, Ao – Altura de onda. Utilizando médias de 1 hora para a 2ª campanha (Outono) para o Ponto Central

No outono, para o ponto central, a turbidez teve valores maiores para Ni baixos e Va e Ao altos (a, b, c). Os SS foram mais influenciados pela Va e Ao para os Ni mais altos (d, e). Nesta campanha, a Va influenciou mais o aumento de SS que a Ao (f).

Os gráficos a seguir (Figura 5.74) demonstram o comportamento da turbidez e sólidos suspensos no inverno para o Ponto Central da lagoa.

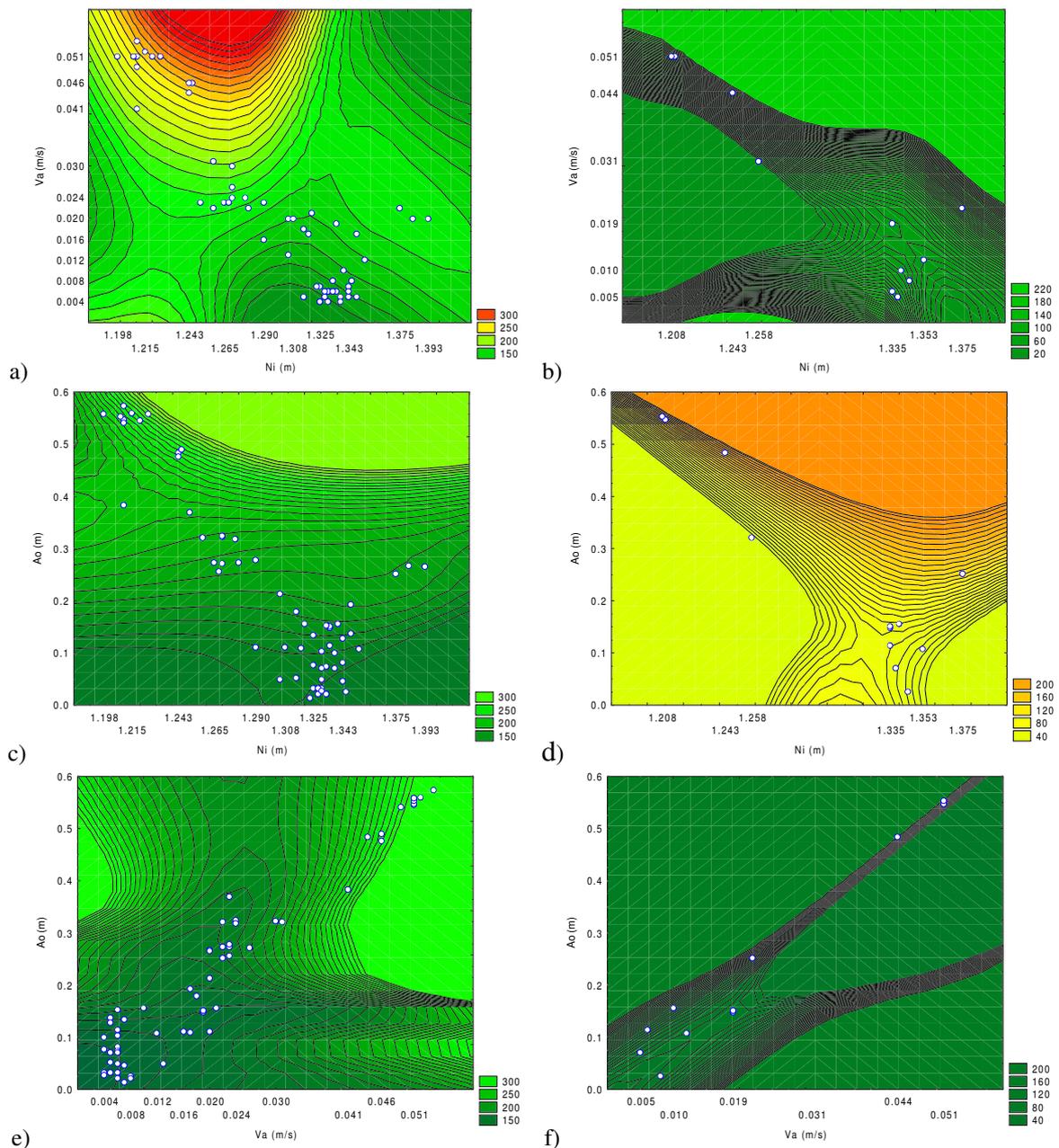


Figura 5.74 Turbidez em função de a) Ni e Va , c) Ni e Ao , e) Va e Ao . Sólidos Suspensos em função de b) Ni e Va , d) Ni e Ao , f) Va e Ao . Ni – Nível da Água, Va – Velocidade da Água, Ao – Altura de onda. Utilizando médias de 1 hora para a 3ª campanha (Inverno) para o Ponto Central

Assim como foi observado na Figura 5.73 no outono, para o ponto central, no inverno a turbidez teve valores maiores para Ni baixos e Va e Ao altos (a, b, c). Os SS foram susceptíveis tanto à Va , quanto a Ao (d, e, f), conforme a Figura 5.74.

A Figura 5.75 demonstra os casos para o verão para o Ponto Norte.

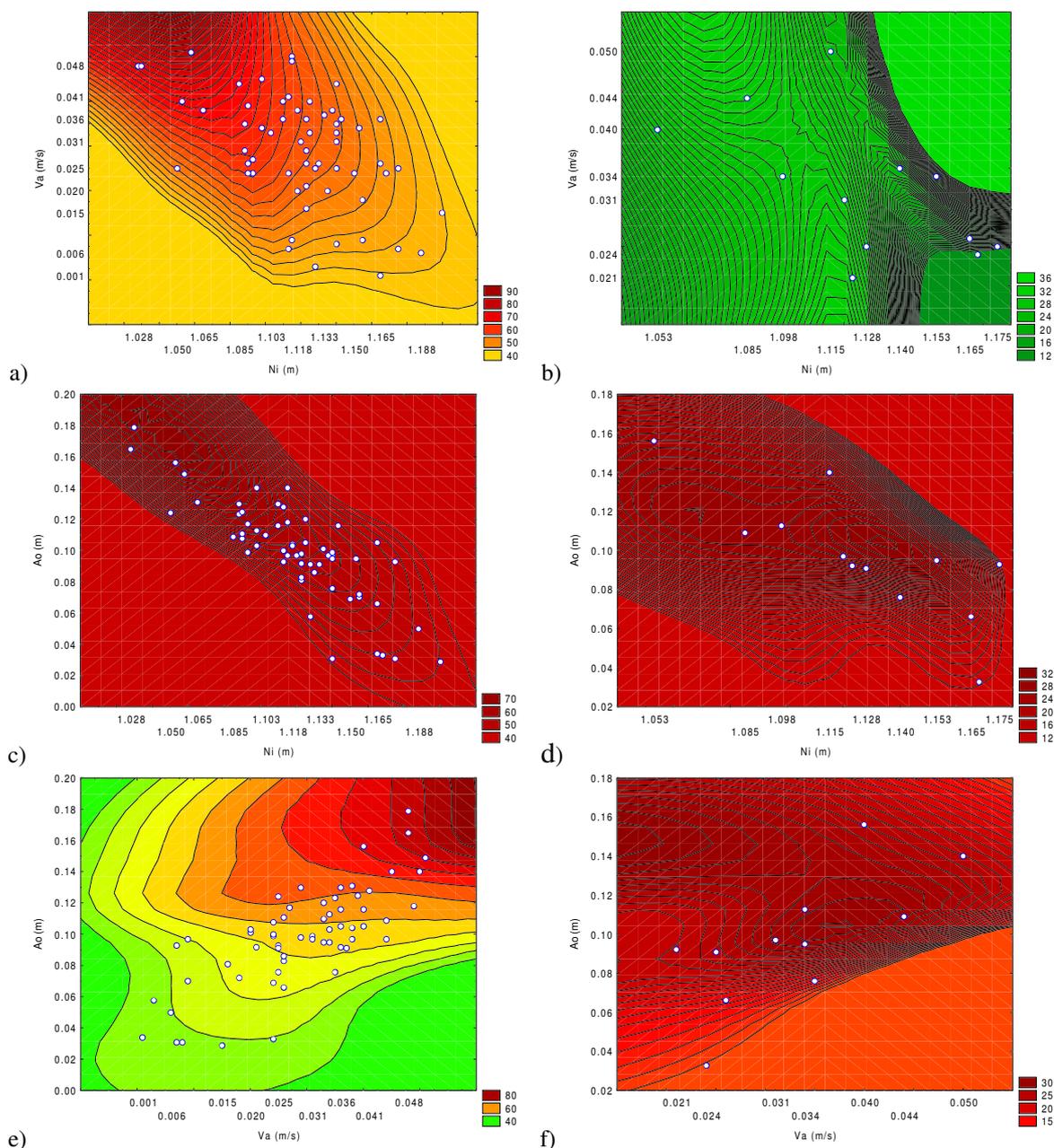


Figura 5.75 Turbidez em função de a) Ni e Va , c) Ni e Ao , e) Va e Ao . Sólidos Suspensos em função de b) Ni e Va , d) Ni e Ao , f) Va e Ao . Ni – Nível da Água, Va – Velocidade da Água, Ao – Altura de onda. Utilizando médias de 1 hora para a 1ª campanha (Verão) para o Ponto Norte

Para a estação de coleta ao norte da lagoa, no verão, o vento predominante foi do quadrante NE. Como consequência têm-se baixos valores de turbidez. O comportamento do

ponto norte assemelha-se ao do ponto central, onde a turbidez tem valores superiores para Ni mais baixos e quanto maior a Ao e a Va maior a turbidez (a, b, c). Os SS variaram de 10 a 30 mg/l , a Ao teve valores baixos também e independente da Va e do Ni , os valores de SS mantiveram-se nesta amplitude (d, e, f).

A Figura 5.76 demonstra os casos para o outono para o Ponto Norte.

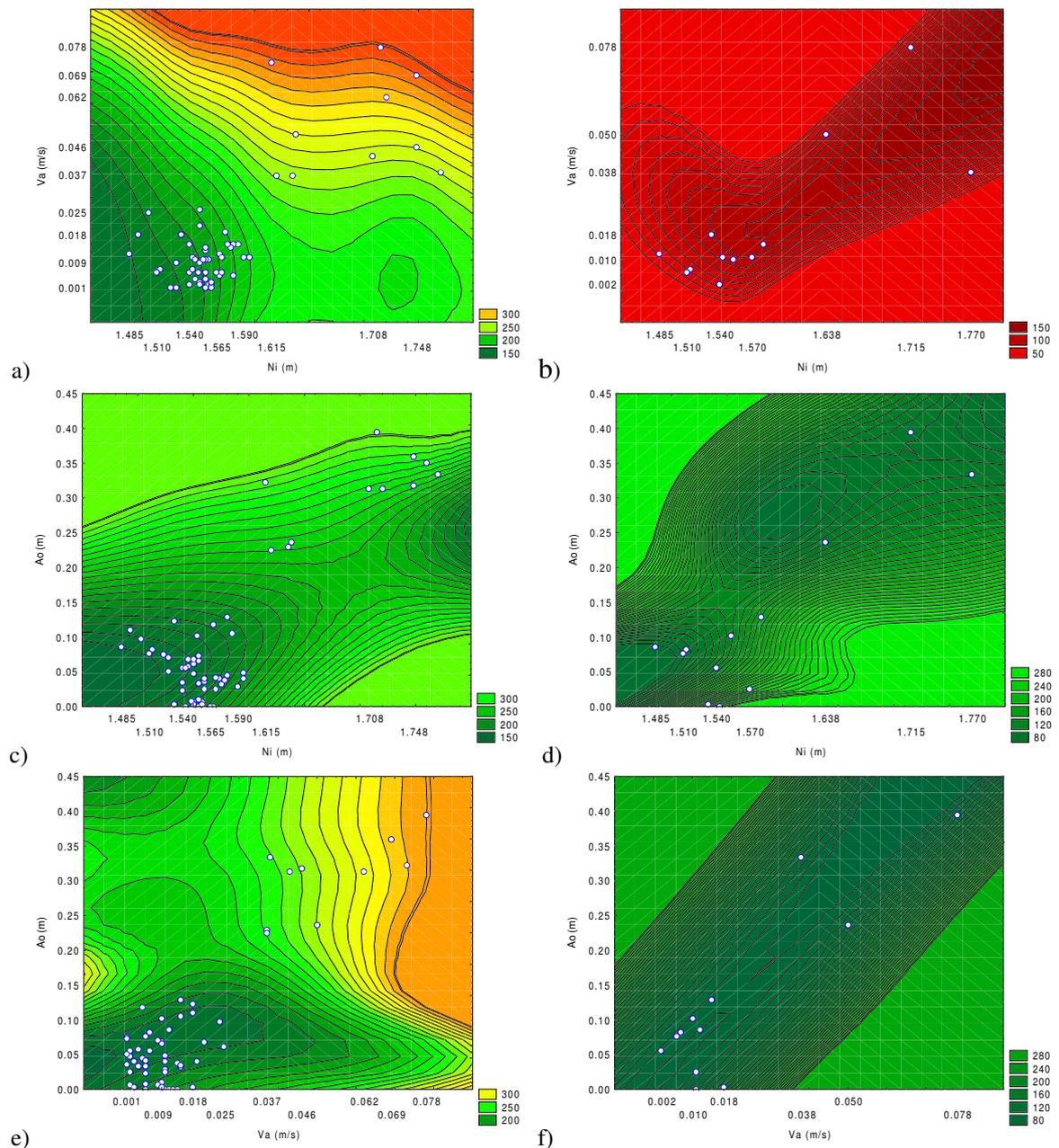


Figura 5.76 Turbidez em função de a) Ni e Va , c) Ni e Ao , e) Va e Ao . Sólidos Suspensos em função de b) Ni e Va , d) Ni e Ao , f) Va e Ao . Ni – Nível da Água, Va – Velocidade da Água, Ao – Altura de onda. Utilizando médias de 1 hora para a 2ª campanha (Outono) para o Ponto Norte

Nesta estação do ano (Figura 5.76), ao contrário dos outros períodos, para *Ni* mais altos, maior foi a *Va* e maior a *Ao* e a turbidez (a, b, c). Estes valores podem ocorrer, pois para este período o vento predominante foi do quadrante S-O, fazendo com que as *Ao* no norte fossem maiores. Quando comparado o *Ni* com os pontos sul e centro da lagoa, para este mesmo período, encontra-se para *Ni* no ponto norte valores acima em 0,20 metros que corresponde à seiche criada pelo vento. Neste período, nem a *Va*, nem a *Ao* tiveram aparentemente muita influência sobre a variação dos *SS* (d, e, f), mas se analisada a direção da água é fácil verificar que quando a água vai na direção NE, os valores de *SS* são bem maiores do que para a direção SO. Esta influência da direção na variação de *SS* não é facilmente evidenciada nos demais pontos de amostragem.

Os gráficos de superfícies no Inverno para o ponto Norte estão representados na Figura 5.77. Neste período, o ponto norte teve valores mais altos de turbidez para *Ni*, *Va* e *Ao* mais altos (a, b, c). Em função das faixas serem muito amplas, nas figuras acima (d, e, f) não pôde ser associada de maneira adequada a variação dos *SS* que dependem da *Ao*, *Va* e da direção da água, nesta campanha. Para valores mais altos de *Ao* e *Va* foram encontrados valores altos também de *SS* e que dependem também da direção da água.

Analisando, principalmente, *Ni*, *Ao*, *Va*, direção e intensidade do vento predominantes em cada período observa-se preliminarmente que a turbidez e os *SS* tendem a ser maiores para os pontos que se localizam na extremidade contrária da lagoa, quer dizer aqueles que têm o fetch maior concomitante com a direção do vento predominante durante o período.

Após analisar cada ponto de coleta em cada estação do ano, por último serão graficados todas as campanhas e todos os pontos para se ter uma noção do comportamento da lagoa como um todo.

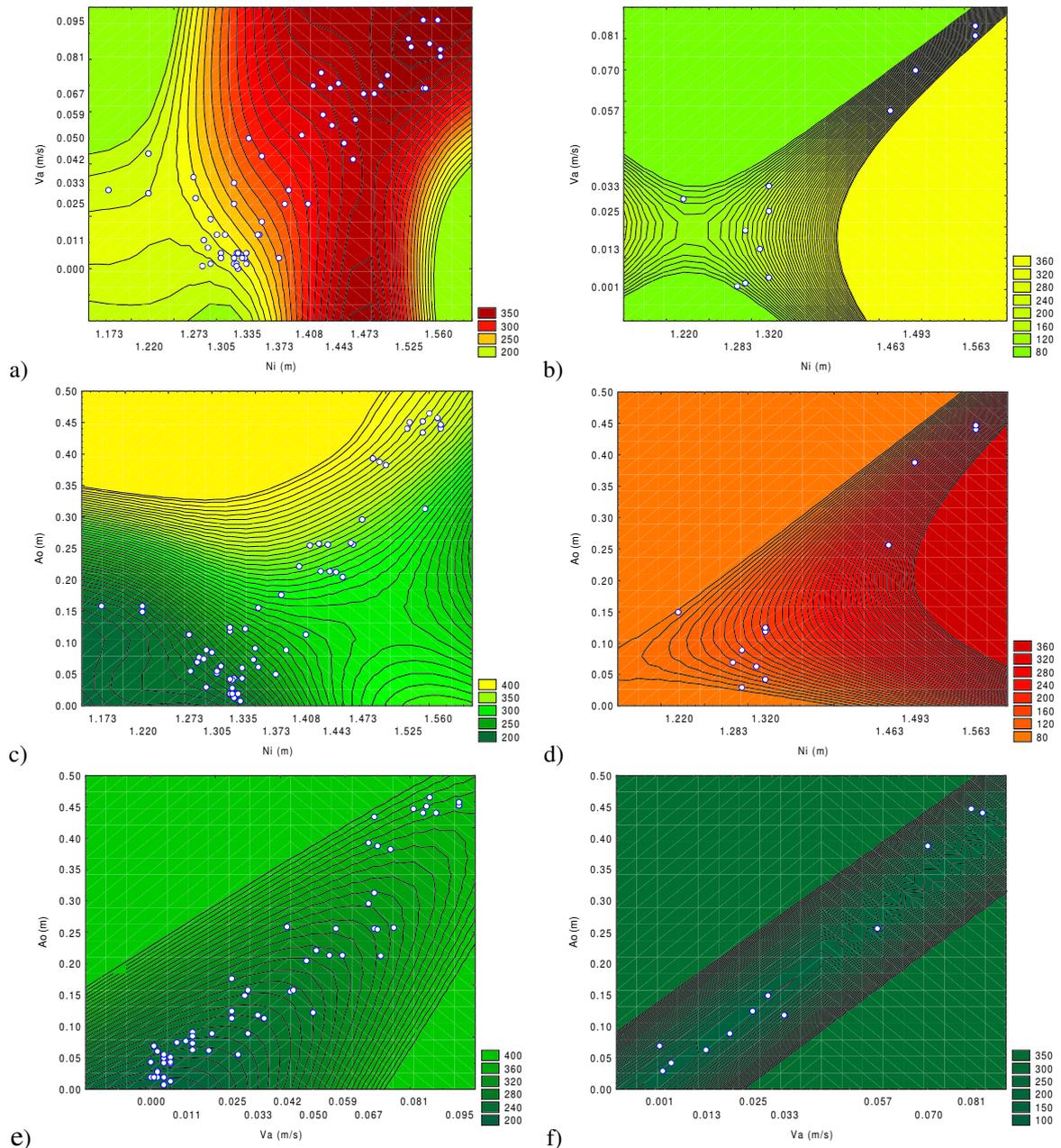


Figura 5.77 Turbidez em função de a) Ni e Va, c) Ni e Ao, e) Va e Ao. Sólidos Suspensos em função de b) Ni e Va, d) Ni e Ao, f) Va e Ao. Ni – Nível da Água, Va – Velocidade da Água, Ao – Altura de onda. Utilizando médias de 1 hora para a 3ª campanha (Inverno) para o Ponto Norte

As superfícies gráficas representando a variação dos SS e da turbidez para as três campanhas e para os três pontos de coleta estão demonstradas na Figura 5.78.

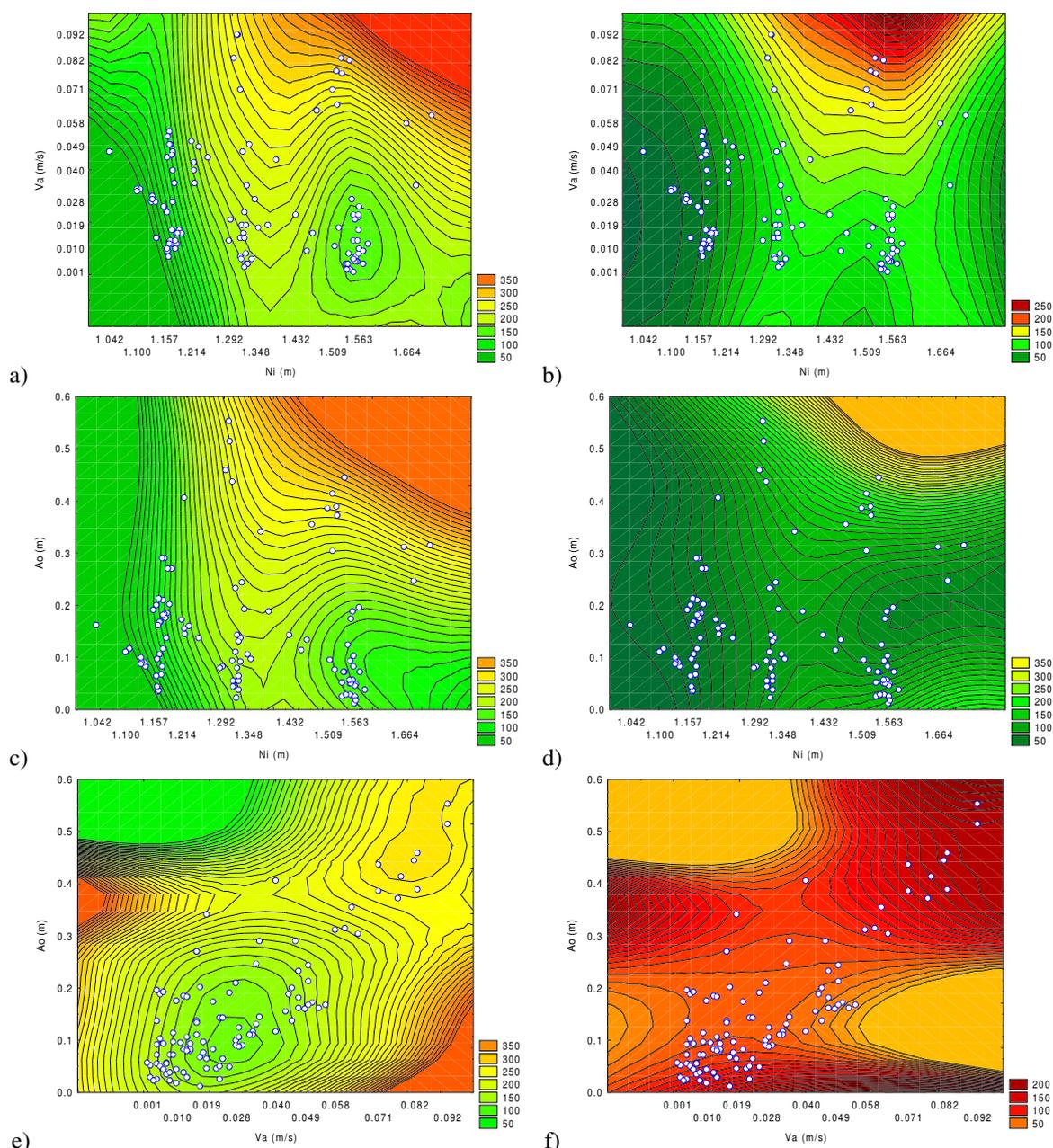


Figura 5.78 Turbidez em função de a) Ni e Va, c) Ni e Ao, e) Va e Ao. Sólidos Suspensos em função de b) Ni e Va, d) Ni e Ao, f) Va e Ao. Ni – Nível da Água, Va – Velocidade da Água, Ao – Altura de onda. Utilizando médias de 1 hora para toda as campanhas e todos os pontos de amostragem da lagoa Itapeva

Para a Figura 5.78 observa-se que a Va apareceu às vezes como uma variável influente na variação da turbidez e antes isso não ocorreu. Este comportamento está vinculado à direção da Va , especificamente quando vem das direções onde o *fetch* é maior. Então se têm valores altos de turbidez (a). No caso de Ao acima de 0,30 metros têm-se valores mais elevados de turbidez (b). Manifesta-se uma proporcionalidade entre o aumento de ambas as variáveis, Va e Ao , com o aumento da turbidez (c). Têm-se um comportamento parecido ao do gráfico (a) para os SS (d). Para Ao com ondas pequenas, encontra-se valores de 10 a 100 mg/l de SS e apenas para ondas acima de 0,20 metros têm-se valores de SS acima dos 200 mg/l (e).

Pode-se constatar que para o intervalo de 10 a 100 mg/l tanto a Va , quanto a Ao podem ter valores baixos e os valores mais altos de SS só acontecem quando ambos têm valores altos (f).

Considerações finais das análises dos gráficos de superfície considerando as três campanhas e analisando o comportamento das variáveis para cada ponto de amostragem da lagoa:

- No ponto Sul valores superiores a 100 mg/l para SS e 200 NTU para turbidez estão relacionados mais com os Ni entre 1,20 m e 1,40 m do que com a Va e a Ao . Para Va superiores a 0,30 m/s e Ao superiores a 0,04 m/s verifica-se também valores altos de turbidez.
- No Centro os maiores valores de SS , maiores que 100 mg/l, foram para Ni em torno de 1,20 m onde se encontram simultaneamente Va superiores a 0,045 m/s e Ao maiores que 0,45 m. Enquanto que para a turbidez os valores mais elevados foram para Ni em torno de 1,30m. Para este ponto fica mais evidenciado quando comparado com os demais pontos de amostragem que quanto maior a Va e Ao maiores serão a turbidez e a concentração de SS .
- No Norte quando a concentração dos SS ultrapassava 200 mg/l os Ni eram superiores a 1,35m, a Ao era maior que 0,30 m e a Va era maior que 0,035 m/s. Para turbidez maior que 250 NTU os Ni eram maiores que 1,30 m, a Ao era superior a 0,20 m e a Va era superior a 0,03 m/s.

Após esta breve interpretação das variações dos dados hidrodinâmicos e ambientais serão feitas as regressões múltiplas a fim de caracterizar melhor estes comportamentos e estimar um grau de correlação entre as variáveis.

5.4.3 REGRESSÕES MÚLTIPLAS

Para cada a campanha onde estão calculadas as variáveis hidrodinâmicas, para cada ponto de coleta e para as hipóteses de representação da variação de turbidez e sólidos suspensos com médias de uma hora, duas horas e quatro horas foi feita uma equação de regressão linear múltipla para estimar o quanto as variáveis hidrodinâmicas são capazes de explicar as variações das ambientais.

Em função do programa utilizado para cálculo das variáveis hidrodinâmicas, o IPH-A tentou-se inicialmente a regressão múltipla com as variáveis: níveis e velocidades da água. Em seguida, acrescentou-se a altura de onda e por último utilizou-se um peso nas variáveis independentes calculadas pelo método chamado de ‘Diferenças Mínimas Quadradas Ponderadas’. Este método é utilizado normalmente quando as variações dos resíduos não são constantes no intervalo de abrangência das variáveis independentes.

Serão mostradas aqui, apenas as equações múltiplas para cada variável ambiental que melhor representaram cada campanha em cada estação, e nas demais hipóteses serão comentados os coeficientes de correlação e o grau de significância ($p=0,05$) para a equação e para cada variável independente. Após a análise de cada campanha, em separado, será analisado o conjunto das campanhas para cada estação de coleta e por último o comportamento de toda a lagoa, considerando todos os pontos e todas as campanhas.

Nas tabelas abaixo estão resumidos o grau de significância e o fator de correlação para as três campanhas realizadas utilizando as médias de uma hora, duas horas e quatro horas entre sólidos suspensos, turbidez e os níveis, velocidade da água e a altura de onda, bem como os coeficientes das equações de regressão múltipla.

Para a análise dos pontos serão consideradas ainda as condições de contorno, como velocidade e direção do vento, fetch e vazões afluentes. De modo geral os coeficientes de correlação apresentaram melhores resultados ao utilizar as médias de quatro horas para as variáveis em estudo, portanto as equações baseadas nas regressões múltiplas, bem como as análises finais considerando toda a lagoa utilizou-se apenas estas médias de quatro horas. Dependendo principalmente do regime de ventos e das intensidades e duração destes ventos verificam-se nos níveis (N_i), nas velocidades da água (V_a) e nas alturas de onda (A_o) seus

resultados e portanto a importância de cada um destas variáveis na variação dos sólidos suspensos (SS) e da turbidez.

Tabela 5.14 Resumo das Regressões Múltiplas entre as variáveis hidrodinâmicas e ambientais para o ponto de amostragem Sul na lagoa Itapeva das campanhas efetuadas em 1999

Campanhas	Var. Amb.	Var. Hidr.	Sul															
			Mh1					Mh2					Mh4					
			p	R	p1	p2	p3	p	R	p1	p2	p3	p	R	p1	p2	p3	
1	Turbidez	1																
		2																
		3	0	0.63	-	-	0						0.003	0.78	-	-	0.003	
		12	0.012	0.37	0.045	0.19	-	0.062	0.42	0.067	0.555	-	0.052	0.69	0.032	0.843	-	
		13																
		23	0	0.68	-	0.005	0	0	0.72	-	0.019	0	0	0.91	-	0.025	0	
		123	0	0.69	0.214	0.003	0	0	0.73	0.582	0.019	0	0.005	0.88	0.917	0.037	0.01	
	SS	1																
		2																
		3																
		12	0.68	0.28	0.727	0.422	-	0.723	26	0.943	0.473	-	0.632	0.31	0.354	0.66	-	
		13	0.021	0.76	0.116	-	0.007											
		23																
		123	0.011	0.85	0.03	0.063	0.002	0.006	0.88	0.007	0.021	0.001	0.005	0.89	0.007	0.002	0.001	
2	Turbidez	1																
		2										0.003	0.78	-	0.003	-		
		3																
		12	0.002	0.44	0.538	0.001	-	0.007	0.54	0.407	0.002	-	0.007	0.82	0.248	0.002	-	
		13																
		23	0	0.54	-	0	0.004	0.001	0.62	-	0.001	0.037	0.005	0.83	-	0.004	0.147	
		123	0	0.54	0.71	0.002	0.005	0.004	0.62	0.937	0.005	0.061	0.015	0.84	0.489	0.007	0.282	
	SS	1																
		2																
		3																
		12	0.446	0.4	0.779	0.331	-	0.378	0.44	0.533	0.379	-	0.14	0.59	0.127	0.459	-	
		13																
		23	0.128	0.6	-	0.114	0.118	0.106	0.63	-	0.102	0.094	0.035	0.72	-	0.051	0.026	
		123	0.263	0.61	0.737	0.148	0.138	0.236	0.63	0.873	0.189	0.142	0.062	0.76	0.334	0.153	0.071	
3	Turbidez	1																
		2																
		3																
		12	0	0.83	0	0	-	0	0.88	0	0	-	0	0.93	0	0	-	
		13																
		23																
		123	0	0.88	0	0	0	0	0.92	0	0	0.001	0	0.95	0	0	0.141	
	SS	1	0	0.89	0	-	-	0	0.88	0	-	-	0.001	0.88	0.001	-	-	
		2																
		3																
		12	0	0.89	0.027	0.883	-	0.001	0.88	0.039	0.646	-	0.007	0.82	0.133	0.8	-	
		13																
		23																
		123	0.003	0.9	0.12	0.774	0.483	0.005	0.89	0.264	0.38	0.413	0.018	0.83	0.578	0.464	0.433	

Em Var. Hidr.: 1 - Ni, 2 - Va, 3 - Ao, 12 - Ni Va, 13 - Ni Ao, 23 - Va Ao, 123 - Ni Va Ao

Ni - nível da água, Va - velocidade da água, Ao - altura da onda

Mh1 - média horária de 1 hora, Mh2 - média horária de 2 horas, Mh4 - média horária de 4 horas

p - grau de significância, R - fator de correlação

p1 - grau de significância de Ni, p2 - grau de significância de Va, p3 - grau de significância de Ao

Tabela 5.15 Coeficientes das equações de Regressão Múltipla para o ponto de amostragem Sul na lagoa Itapeva das campanhas efetuadas em 1999

Campanhas	Var. Amb.	Var. Hidr.	Média	R	Sul			
					c1	c2	c3	ε
1	Turbidez	23	4 horas	0.91	-	-0.67	1.39	1.48
	SS	123	4 horas	0.89	-0.74	-1.07	1.94	13.15
2	Turbidez	2	4 horas	0.78	-	-0.78	-	13
	SS	23	4 horas	0.72	-	0.53	0.63	16.38
3	Turbidez	12	4 horas	0.93	1.83	2.11	-	14.95
	SS	1	1 hora	0.89	0.89	-	-	16.48

Em Var. Hidr.: 1 - Ni, 2 - Va, 3 - Ao, 12 - Ni Va, 13 - Ni Ao, 23 - Va Ao, 123 - Ni Va Ao

Ni - nível da água, Va - velocidade da água, Ao - altura da onda

R - fator de correlação

c1, c2, c3 - coeficientes de Ni, Va, Ao respectivamente e ε - erro

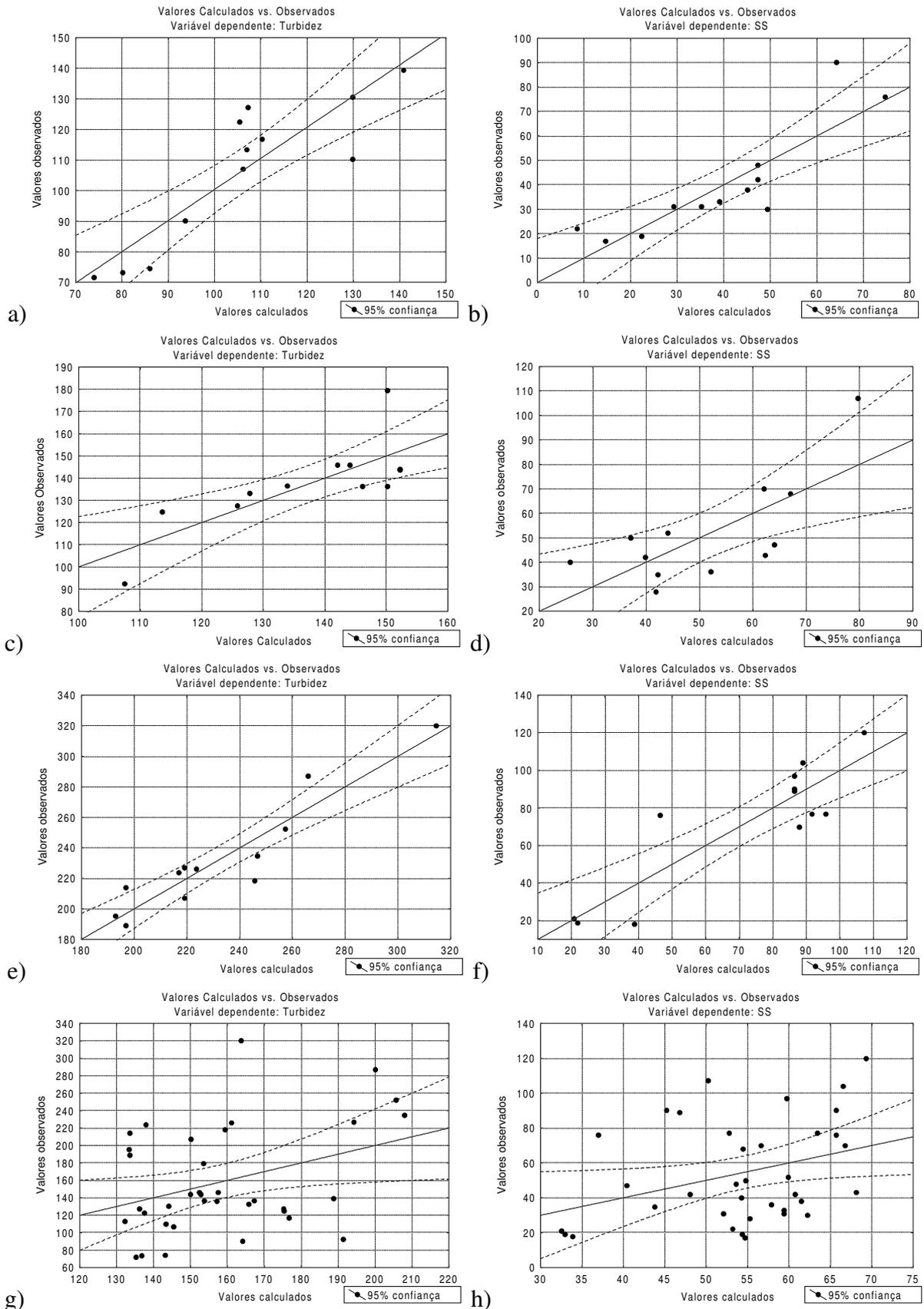


Figura 5.79 Valores calculados x observados de turbidez e SS no ponto Sul. a) Turbidez: 1ª Campanha – verão; b) SS: 1ª Campanha – verão; c) Turbidez: 2ª Campanha – outono; d) SS: 2ª Campanha – outono; e) Turbidez: 3ª Campanha – inverno; f) SS: 3ª Campanha – inverno; g) Turbidez: Todas as campanhas; h) SS: Todas as campanhas

Tabela 5.16 Resumo das Regressões Múltiplas entre as variáveis hidrodinâmicas e ambientais para o ponto de amostragem Central na lagoa Itapeva das campanhas efetuadas em 1999

Campanhas	Var. Amb.	Var. Hidr.	Centro																
			Mh1					Mh2					Mh4						
			p	R	p1	p2	p3	p	R	p1	p2	p3	p	R	p1	p2	p3		
1	Turbidez	1																	
		2											0.003	0.79		0.003			
		3	0	0.66	-	-	0	0	0.69	-	-	0							
		12	0.002	0.44	0.013	0.146	-	0.03	0.47	0.046	0.427	-	0.005	0.83	0.201	0.002	-		
		13						0	0.7	0.394	-	0							
		23											0.003	0.85	-	0.106	0.087		
	123	0	0.67	0.267	0.936	0	0	0.7	0.406	0.998	0	0.007	0.87	0.351	0.076	0.156			
	SS	1																	
		2											0.249	0.36	-	0.249	-		
		3											0.023	0.65	-	-	0.023		
		12	0.459	0.4	0.888	0.225	-	0.428	0.41	0.697	0.297	-	0.228	0.53	0.205	0.148	-		
		13	0.032	0.73	0.071	-	0.011	0.044	0.71	0.087	-	0.02							
		23																	
	2	Turbidez	1																
			2											0	0.88	-	0	-	
3																			
12			0	0.65	0	0.086	-	0	0.69	0.002	0.107	-	0.14	0.59	0.64	0.672	-		
13																			
23																			
123		0	0.65	0.005	0.085	0.788	0	0.69	0.032	0.109	0.703	0.038	0.79	0.854	0.054	0.318			
SS		1																	
		2																	
		3																	
		12	0.106	0.63	0.047	0.126	-	0.14	0.59	0.064	0.162	-	0.079	0.66	0.057	0.307	-		
		13																	
		23	0.004	0.84	-	0.015	0.001	0.005	0.83	-	0.02	0.002	0.017	0.77	-	0.036	0.011		
123		0.008	0.87	0.237	0.018	0.009	0.012	0.85	0.326	0.026	0.011	0.038	0.79	0.392	0.041	0.07			
3		Turbidez	1																
	2		0	0.89	-	0	-	0	0.9	-	0	-							
	3		0	0.9	-	0	-	0	0.92	-	0	-	0	0.92	-	-	0		
	12		0	0.89	0.745	0	-	0	0.9	0.798	0	-	0.001	0.88	0.991	0.008	-		
	13												0	0.93	0.391	-	0		
	23		0	0.91	-	0.113	0.006	0	0.92	-	0.487	0.034	0	0.94	-	0.148	0.022		
	123	0	0.91	0.611	0.099	0.006	0	0.92	0.653	0.426	0.035	0	0.95	0.118	0.056	0.007			
	SS	1																	
		2						0.013	0.69	-	0.013	-							
		3																	
		12	0.051	0.69	0.774	0.167	-	0.032	0.73	0.325	0.037	-	0.104	0.63	0.274	0.052	-		
		13																	
		23	0	0.93	-	0.058	0.015	0.014	0.78	-	0.281	0.111							
	123	0.007	0.87	0.322	0.117	0.016	0.022	0.82	0.23	0.42	0.092	0	0.93	0.001	0.003	0			

Em Var. Hidr.: 1 - Ni, 2 - Va, 3 - Ao, 12 - Ni Va, 13 - Ni Ao, 23 - Va Ao, 123 - Ni Va Ao

Ni - nível da água, Va - velocidade da água, Ao - altura da onda

Mh1 - média horária de 1 hora, Mh2 - média horária de 2 horas, Mh4 - média horária de 4 horas

p - grau de significância, R - fator de correlação

p1 - grau de significância de Ni, p2 - grau de significância de Va, p3 - grau de significância de Ao

Tabela 5.17 Coeficientes das equações de Regressão Múltipla para o ponto de amostragem Central na lagoa Itapeva das campanhas efetuadas em 1999

Campanhas	Var. Amb.	Var. Hidr.	Média	R	Centro			ε
					c1	c2	c3	
1	Turbidez	2	4 horas	0.79	-	0.79	-	13.46
	SS	3	4 horas	0.65	-	-	0.65	10.7
2	Turbidez	2	4 horas	0.88	-	0.88	-	4.58
	SS	23	4 horas	0.77	-	1.58	-2.06	34.94
3	Turbidez	3	4 horas	0.92	-	-	0.92	30.34
	SS	123	4 horas	0.93	1.12	-3.63	5.11	31.72

Em Var. Hidr.: 1 - Ni, 2 - Va, 3 - Ao, 12 - Ni Va, 13 - Ni Ao, 23 - Va Ao, 123 - Ni Va Ao

Ni - nível da água, Va - velocidade da água, Ao - altura da onda

R - fator de correlação

c1, c2, c3 - coeficientes de Ni, Va, Ao respectivamente e ε - erro

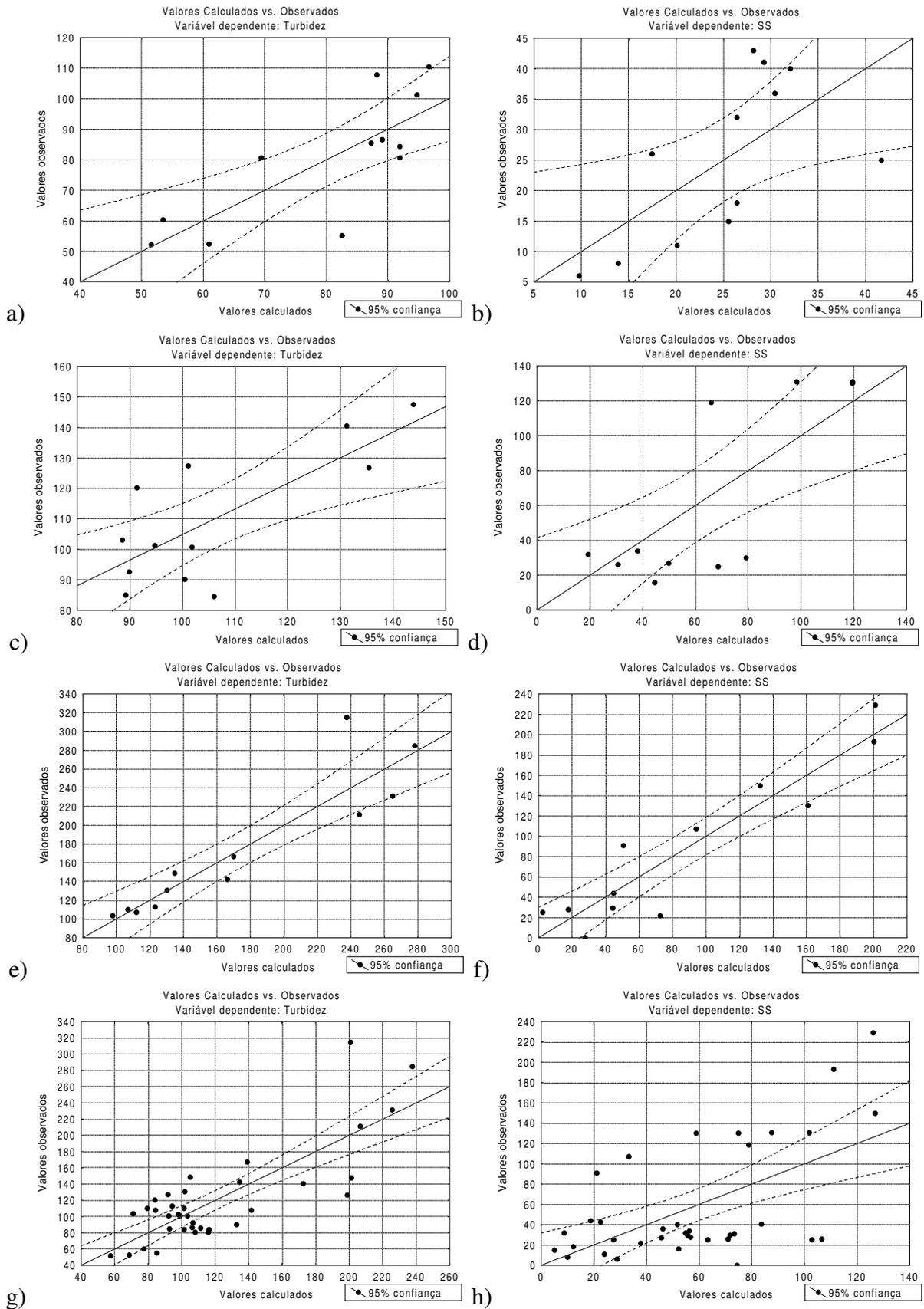


Figura 5.80 Valores calculados x observados de turbidez e SS no ponto Central. a) Turbidez: 1ª Campanha – verão; b) SS: 1ª Campanha – verão; c) Turbidez: 2ª Campanha – outono; d) SS: 2ª Campanha – outono; e) Turbidez: 3ª Campanha – inverno; f) SS: 3ª Campanha – inverno; g) Turbidez: Todas as campanhas; h) SS: Todas as campanhas

Tabela 5.18 Resumo das Regressões Múltiplas entre as variáveis hidrodinâmicas e as variáveis ambientais para o ponto de amostragem Norte na lagoa Itapeva das campanhas efetuadas em 1999

Campanhas	Var. Amb.	Var. Hidr.	Norte														
			Mh1					Mh2					Mh4				
			p	R	p1	p2	p3	p	R	p1	p2	p3	p	R	p1	p2	p3
1	Turbidez	1	0	0.48	0	-	-	0	0.6	0	-	-	0.002	0.8	0.002	-	-
		2			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		3			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		12	0	0.52	0.009	0.074	-	0	0.66	0.02	0.067	-	0.01	0.8	0.106	0.942	-
		13			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		23			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		123	0	0.52	0.195	0.334	0.641	0.001	0.66	0.127	0.151	0.733	0.015	0.84	0.055	0.405	0.202
	SS	1			-	-	-	0.063	0.55	0.063	-	-	0.015	0.68	-	0.015	-
		2			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		3			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		12	0.245	0.52	0.159	0.891	-	0.194	0.55	0.415	0.872	-	0.037	0.72	0.345	0.05	-
		13			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		23			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		123	0.401	0.54	0.462	0.727	0.61	0.374	0.55	0.591	0.874	0.871	0.09	0.73	0.337	0.191	0.592
2	Turbidez	1			-	-	-			-	-	0	0.9	-	0	-	
		2			-	-	-			-	-	-			-	-	
		3			-	-	-			-	-	-			-	-	
		12	0	0.89	0	0	-	0	0.91	0.01	0	-	0	0.92	0.194	0.046	-
		13			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		23			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		123	0	0.89	0	0	0.428	0	0.91	0.004	0.001	0.17	0	0.94	0.091	0.025	0.201
	SS	1			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		2			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		3			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		12	0.817	0.21	0.968	0.685	-	0.498	0.38	0.588	0.282	-	0.771	0.24	0.704	0.532	-
		13			-	-	-	0.009	0.8	0.051	-	0.005	0.022	0.76	0.022	-	0.007
		23			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		123	0.006	0.88	0.011	0.037	0	0.027	0.81	0.026	0.126	0.008	0.013	0.85	0.04	0.075	0.002
3	Turbidez	1			-	-	0	0.9	0	-	-	0	0.9	0	-	-	
		2			-	-	-			-	-	-			-	-	
		3			-	-	-			-	-	-			-	-	
		12	0	0.9	0	0	-	0	0.91	0	0.08	-	0	0.92	0.043	0.224	-
		13			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		23			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		123	0	0.91	0	0.331	0.119	0	0.92	0.003	0.986	0.188	0.001	0.92	0.084	0.592	0.869
	SS	1	0.006	0.74	0.006	-	-	0.002	0.78	0.002	-	-	0	0.84	0	-	-
		2			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		3			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		12	0.028	0.74	0.257	0.838	-	0.011	0.8	0.192	0.526	-	0.003	0.86	0.124	0.406	-
		13			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		23			-	-	-			-	-	-			-	-	-
		123	0.074	0.75	0.251	0.636	0.665	0.026	0.82	0.154	0.314	0.394	0.009	0.86	0.114	0.373	0.499

Em Var. Hidr.: 1 - Ni, 2 - Va, 3 - Ao, 12 - Ni Va, 13 - Ni Ao, 23 - Va Ao, 123 - Ni Va Ao

Ni - nível da água, Va - velocidade da água, Ao - altura da onda

Mh1 - média horária de 1 hora, Mh2 - média horária de 2 horas, Mh4 - média horária de 4 horas

p - grau de significância, R - fator de correlação

p1 - grau de significância de Ni, p2 - grau de significância de Va, p3 - grau de significância de Ao

Tabela 5.19 Coeficientes das equações de Regressão Múltipla para o ponto de amostragem Norte na lagoa Itapeva das campanhas efetuadas em 1999

Campanhas	Var. Amb.	Var. Hidr.	Média	R	Norte			ε
					c1	c2	c3	
1	Turbidez	1	4 horas	0.80	-0.8	-	-	65.35
	SS	2	4 horas	0.68	-	0.68	-	6.63
2	Turbidez	12	2 horas	0.91	0.38	0.57	-	21.39
	SS	13	2 horas	0.80	0.8	-	-1.33	688.3
3	Turbidez	1	4 horas	0.90	0.9	-	-	40.24
	SS	1	4 horas	0.84	0.84	-	-	58.72

Em Var. Hidr.: 1 - Ni, 2 - Va, 3 - Ao, 12 - Ni Va, 13 - Ni Ao, 23 - Va Ao, 123 - Ni Va Ao

Ni - nível da água, Va - velocidade da água, Ao - altura da onda

R - fator de correlação

c1, c2, c3 - coeficientes de Ni, Va, Ao respectivamente e ε - erro

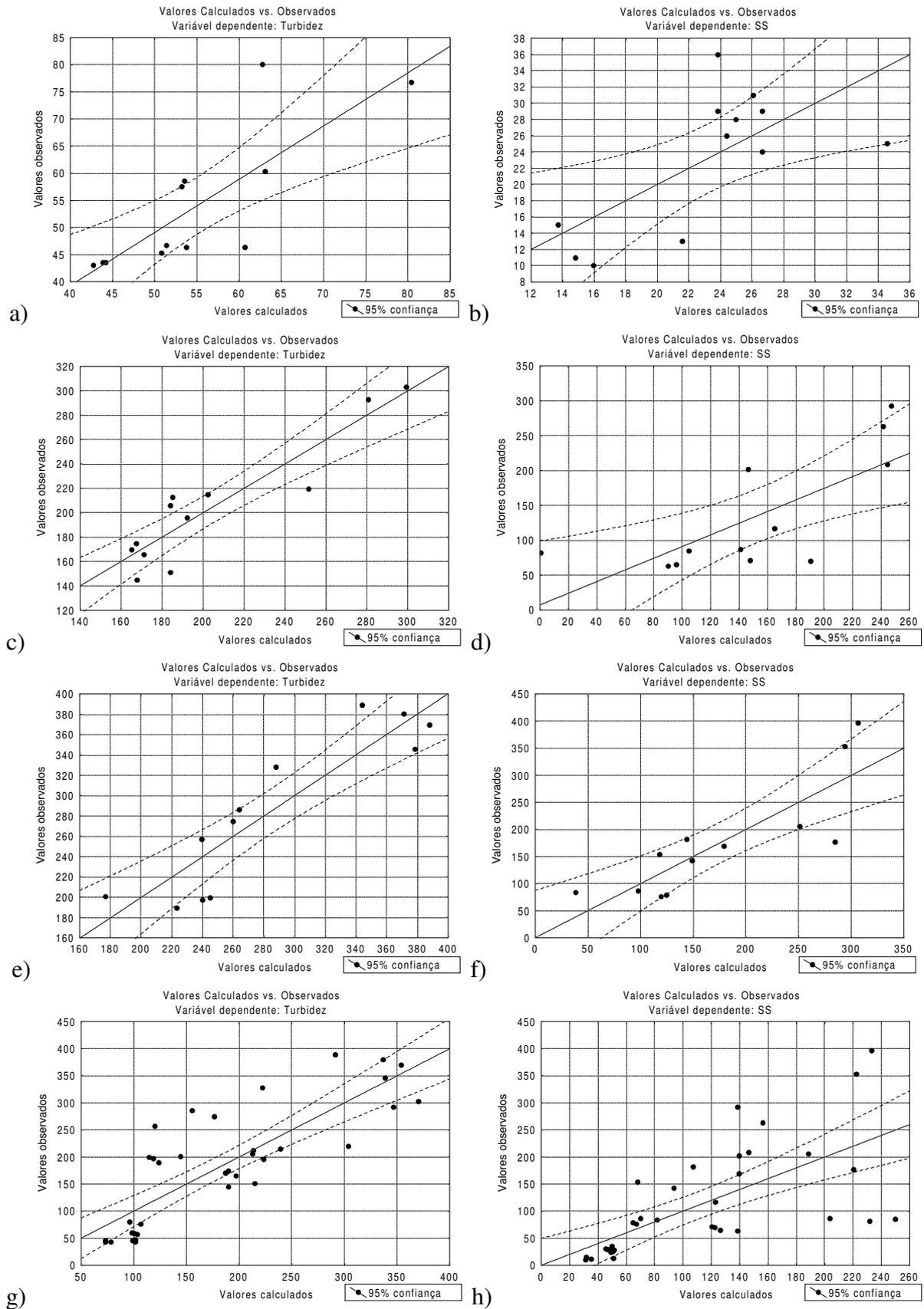


Figura 5.81 Valores calculados x observados de turbidez e SS no ponto Norte. a) Turbidez: 1ª Campanha – verão; b) SS: 1ª Campanha – verão; c) Turbidez: 2ª Campanha – outono; d) SS: 2ª Campanha – outono; e) Turbidez: 3ª Campanha – inverno; f) SS: 3ª Campanha – inverno; g) Turbidez: Todas as campanhas; h) SS: Todas as campanhas

Através da análise dos níveis na lagoa pode-se verificar que a turbidez e os sólidos suspensos têm valores maiores quanto mais próximos estão dos eventos de chuva. A 3ª campanha se encontra 15 dias após um evento que elevou o nível da lagoa de 1,20m para 1,40m. A 2ª campanha está 37 dias após um evento que aumentou o nível da lagoa de 1,15m para 2,15m. A 1ª campanha não tem registro de chuvas que elevaram o nível da lagoa nos dois meses anteriores. Através das Figura 5.79, Figura 5.80 e Figura 5.81 podem ser visualizados os valores de sólidos suspensos, como também a relação entre valores calculados e valores observados pelas equações para as três campanhas nos pontos de amostragem Sul, Centro e Norte respectivamente. Segundo Cardoso (2001) as concentrações de sólidos totais nas campanhas seguiram o mesmo comportamento sazonal evidenciado pela turbidez, ou seja, máximas nos invernos e mínimas no verão. Existe a necessidade de um levantamento contínuo destas variáveis ambientais para verificar se a variabilidade encontrada é dependente da sazonalidade ou do carreamento de sedimentos oriundos de grandes eventos de precipitação que alteram o nível da lagoa e portanto todas as condições internas da lagoa.

Na 1ª campanha devido à direção do vento a variável Ao é maior do que nas demais campanhas para o ponto Sul e portanto aparece na equação de regressão. No ponto Sul a variável Ni não é significativa na 2ª campanha, justamente quando o vento predominante foi do quadrante SO (Tabela 5.14 e Tabela 5.15).

Em função do ponto Central estar bem próximo do meio da lagoa a variação do Ni não é tão acentuada como nas demais regiões, por isso nas correlações (Tabela 5.16) e nas equações de regressão múltipla (Tabela 5.17) esta variável normalmente não está presente.

O ponto Norte apresenta maiores variações de Ni e através das correlações (Tabela 5.18) e das equações (Tabela 5.19) verifica-se a importância desta variação na alteração dos valores dos sólidos suspensos e da turbidez. O valor negativo do coeficiente de Ni na equação para a turbidez da 1ª campanha pode estar relacionado a que neste período o vento predominante do quadrante NE causa um desnível na lagoa, no norte o nível diminui e no sul este nível aumenta.

Os valores negativos de Va devem estar relacionados a um defasamento entre causa e efeito, ou seja, existe um intervalo de tempo entre a elevação da intensidade da Va e a modificação no estado dos sólidos suspensos e da turbidez. Tentou-se a partir das médias diminuir este efeito, mas em alguns casos não foi possível. Estes valores negativos podem

estar relacionados também às Va utilizadas neste estudo que vêm da simulação do modelo e não foram comprovadas com dados reais, portanto estas velocidades podem estar em alguns casos diferentes das reais e causar erros nas estimativas dos coeficientes. A Va na coleta de verão teve desvio padrão da ordem de 1cm/s, 1,8cm/s e 1,1cm/s enquanto que nas demais coletas foi em torno de 4,5cm/s, 3,3cm/s e 2,8cm/s para os pontos Sul, Centro e Norte respectivamente. Esta menor variabilidade da Va no Sul da lagoa pode ser uma das causas para os coeficientes de Va encontrados na Tabela 5.15 sejam negativos.

Tabela 5.20 Resumo das Regressões Múltiplas entre as variáveis hidrodinâmicas e ambientais para cada o ponto de amostragem na lagoa Itapeva considerando todas as campanhas efetuadas em 1999

Var. Amb.	Var. Hidr.	Sul					Centro					Norte				
		Todas as Campanhas					Todas as Campanhas					Todas as Campanhas				
		p	R	Mh4			p	R	Mh4			p	R	Mh4		
		p1	p2	p3			p1	p2	p3			p1	p2	p3		
Turbidez	1				-	-				-	-				-	-
	2				-	-				-	-				-	-
	3				-	-				-	-				-	-
	12	0.103	0.36	0.277	0.035	-	0.001	0.72	0.042	0	-	0	0.83	0	0	-
	13	0.776	0.12	0.625	-	0.494	0	0.8	0.057	-	0	0	0.84	0	-	0
	23	0.187	0.31	-	0.081	0.926	0	0.79	-	0.217	0					
123	0.203	0.36	0.259	0.046	0.715	0	0.81	0.101	0.423	0.001	0	0.84	0	0.993	0.21	
SS	1				-	-				-	-				-	-
	2				-	-				-	-				-	-
	3				-	-				-	-				-	-
	12	0.335	0.25	0.79	0.228	-	0	0.59	0.007	0	-	0	0.67	0	0.021	-
	13				-	-				-	-				-	-
	23	0.125	0.34	-	0.063	0.157										
123	0.176	0.37	0.363	0.136	0.1	0.003	0.59	0.009	0.007	0.948	0	0.69	0	0.053	0.181	

Em Var. Hidr.: 1 - Ni, 2 - Va, 3 - Ao, 12 - Ni Va, 13 - Ni Ao, 23 - Va Ao, 123 - Ni Va Ao

Ni - nível da água, Va - velocidade da água, Ao - altura da onda

Mh1 - média horária de 1 hora, Mh2 - média horária de 2 horas, Mh4 - média horária de 4 horas

p - grau de significância, R - fator de correlação

p1 - grau de significância de Ni, p2 - grau de significância de Va, p3 - grau de significância de Ao

Tabela 5.21 Coeficientes das equações de Regressão Múltipla para cada o ponto de amostragem na lagoa Itapeva considerando todas as campanhas efetuadas em 1999

Regiões	Var. Amb.	Todas as Campanhas						
		Var. Hidr.	Média	R	c1	c2	c3	ϵ
Sul	Turbidez	12	4 horas	0.36	0.2	0.39	-	58.73
	SS	23	4 horas	0.34	-	-0.33	0.25	28.17
Centro	Turbidez	13	4 horas	0.80	0.21	-	0.8	36
	SS	12	4 horas	0.59	0.46	0.65	-	47.56
Norte	Turbidez	13	4 horas	0.83	0.55	-	0.48	62.19
	SS	12	4 horas	0.67	0.54	0.32	-	75.94

Em Var. Hidr.: 1 - Ni, 2 - Va, 3 - Ao, 12 - Ni Va, 13 - Ni Ao, 23 - Va Ao, 123 - Ni Va Ao

Ni - nível da água, Va - velocidade da água, Ao - altura da onda

R - fator de correlação

c1, c2, c3 - coeficientes de Ni, Va, Ao respectivamente e ϵ - erro

Quando analisadas todas as campanhas juntas nota-se o aparecimento da variável Ni , isto acontece pois cada campanha teve um intervalo diferente de Ni e para cada um destes intervalos observaram-se valores diferentes de sólidos suspensos e turbidez.

Tabela 5.22 Resumo das Regressões Múltiplas entre as variáveis hidrodinâmicas e ambientais para todos os pontos de amostragem na lagoa Itapeva considerando todas as campanhas efetuadas em 1999

		Sul, Centro e Norte				
		Todas as Campanhas				
		Mh4				
Var. Amb.	Var. Hidr.	p	R	p1	p2	p3
Turbidez	1				-	-
	2			-	-	-
	3			-	-	-
	12	0	0.68	0	0	-
	13	0	0.62	0	-	0
	23				-	-
	123	0	0.62	0	0.348	0.008
SS	1				-	-
	2			-	-	-
	3			-	-	-
	12	0	0.49	0	0.002	-
	13				-	-
	23				-	-
	123	0	0.5	0	0.29	0.331

Em Var. Hidr.: 1 - Ni, 2 - Va, 3 - Ao, 12 - Ni Va, 13 - Ni Ao, 23 - Va Ao, 123

Ni - nível da água, Va - velocidade da água, Ao - altura da onda

Mh1 - média horária de 1 hora, Mh2 - média horária de 2 horas, Mh4 - média

p - grau de significância, R - fator de correlação

p1 - grau de significância de Ni, p2 - grau de significância de Va, p3 - grau de

Tabela 5.23 Coeficientes das equações de Regressão Múltipla para todos os pontos de amostragem na lagoa Itapeva considerando todas as campanhas efetuadas em 1999

		Sul, Centro e Norte						
Campanhas	Var. Amb.	Var. Hidr.	Média	R	c1	c2	c3	ϵ
Todas	Turbidez	12	4 horas	0.68	0.42	0.47	-	12.54
	SS	12	4 horas	0.49	0.43	0.27	-	63.63

Em Var. Hidr.: 1 - Ni, 2 - Va, 3 - Ao, 12 - Ni Va, 13 - Ni Ao, 23 - Va Ao, 123 - Ni Va Ao

Ni - nível da água, Va - velocidade da água, Ao - altura da onda

R - fator de correlação

c1, c2, c3 - coeficientes de Ni, Va, Ao respectivamente e ϵ - erro

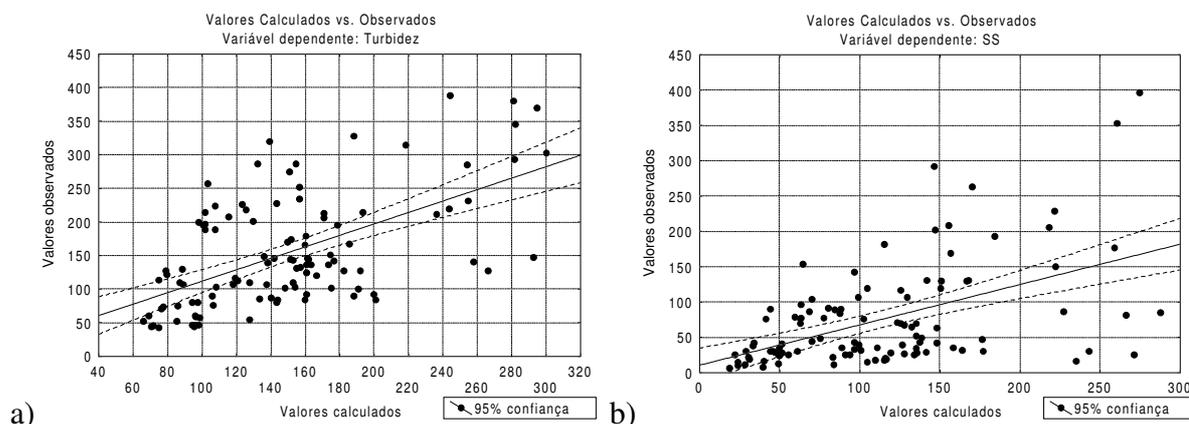


Figura 5.82 Valores calculados x observados de turbidez e SS nos três pontos de amostragem. a) Turbidez; b) SS

Através das Tabela 5.21 e Tabela 5.23 verifica-se que a variação de SS não é representada tão bem quanto a variação da Turbidez. Neste estudo ao reunir todas as informações (Tabela 5.22 e Tabela 5.23) resultaram como variáveis importantes Ni e Va. A estimativa de Ao não aparece nas equações considerando todo o período.

5.4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

As correlações diretas com cada variável ambiental, dos dados ‘instantâneos’, coletados a cada 15 minutos no caso da turbidez, a cada 4 horas para os sólidos suspensos e a cada 15 minutos das variáveis hidrodinâmicas calculadas pelo modelo e das alturas de onda estimadas pelo método de Hakanson (1987) deram uma idéia inicial do comportamento da lagoa.

Com os gráficos de superfície foi possível avaliar melhor as variações dos SS e da turbidez em função de duas das variáveis hidrodinâmicas a cada vez, caracterizando o sistema de maneira mais adequada e podem-se evidenciar alguns padrões de comportamento. Os comportamentos encontrados nos gráficos de superfície não foram verificados nas equações encontradas através das regressões múltiplas, pois estas regressões foram feitas com todos os dados e não apenas com os valores mais altos encontrados em cada campanha. Desta maneira os gráficos de superfície ajudaram a compreender melhor certos padrões de variação encontrados.

Na Tabela 5.24 estão apresentadas as variáveis, as correlações e a média utilizada nas equações da regressão linear múltipla para as campanhas de cada ponto de amostragem e para toda a lagoa.

Tabela 5.24 Resumo das variáveis, médias utilizadas e correlações das regressões para as campanhas de cada ponto de coleta

		Regiões								
		Sul			Centro			Norte		
Campanhas	Var. Amb.	Var. Hidr.	Média	R	Var. Hidr.	Média	R	Var. Hidr.	Média	R
1	Turbidez	Va, Ao	4 horas	0.91	Va	4 horas	0.79	Ni	4 horas	0.80
	SS	Ni, Va, Ao	4 horas	0.89	Ao	4 horas	0.65	Va	4 horas	0.68
2	Turbidez	Va	4 horas	0.78	Va	4 horas	0.88	Ni, Va	2 horas	0.91
	SS	Va, Ao	4 horas	0.72	Va, Ao	4 horas	0.77	Ni, Ao	2 horas	0.80
3	Turbidez	Ni, Va	4 horas	0.93	Ao	4 horas	0.92	Ni	4 horas	0.90
	SS	Ni	1 hora	0.89	Ni, Va, Ao	4 horas	0.93	Ni	4 horas	0.84
Todas	Turbidez	Ni, Va	4 horas	0.36	Ni, Ao	4 horas	0.80	Ni, Ao	4 horas	0.83
	SS	Va, Ao	4 horas	0.34	Ni, Va	4 horas	0.59	Ni, Va	4 horas	0.67
		Regiões								
		Sul, Centro e Norte								
Todas	Turbidez	Ni, Va	4 horas	0.68						
	SS	Ni, Va	4 horas	0.49						

Ni - nível da água, Va - velocidade da água, Ao - altura da onda

R - fator de correlação

Ao se pensar na lagoa como um todo e para qualquer período do ano, baseado nas amostragens das campanhas, as variações da turbidez podem ser explicadas em 68%,

enquanto que os dos sólidos suspensos em 49% pelas variações dos níveis e das velocidades da água.

A explicação para a modificação nas variáveis que influenciam cada campanha está relacionada principalmente ao vento e ao *fetch*. Através das Figura 5.79, Figura 5.80 e Figura 5.81 pode-se visualizar a variação da quantidade de sólidos suspensos e turbidez para cada ponto de amostragem e sua variação no decorrer das campanhas.

No verão, principalmente durante a campanha, o vento do quadrante NE foi o predominante, e a intensidade dele também foi forte. A variabilidade no tempo foi relativamente pequena, ou seja, a modificação na direção do vento não foi abrupta. O *fetch* para as regiões centro e sul foi mais significativo do que para o norte, por isso a altura de onda aparece nas equações destas regiões.

No outono, os ventos mais fortes foram do quadrante SO, a variabilidade foi alta com períodos de calmaria. Os valores dos sólidos suspensos e da turbidez decresceram para as regiões mais ao sul da lagoa e foram superiores nas regiões ao norte da lagoa.

No inverno, este comportamento foi semelhante, para os ventos do quadrante SO. A turbidez e os SS na região sul tiveram valores baixos, na região central estes valores eram superiores, e no norte atingiam seus valores mais altos. Quando o vento mudou de direção, os valores ficaram invertidos. Este mesmo comportamento para turbidez e sólidos suspensos foi encontrado por Cardoso, 2001.

Ao se analisar todas as campanhas juntas, o ponto Central e o Norte apresentam as variáveis ambientais dependentes das mesmas variáveis hidrodinâmicas (Tabela 5.24). Esta diferença com o ponto Sul pode estar relacionada ao fato que as correlações encontradas para este ponto foram bem inferiores quando comparadas às demais.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo hidrodinâmico e ambiental da lagoa Itapeva foi capaz de avaliar que a variação do nível de água em função dos aportes de água é lenta quando comparada à modificação dos níveis e às seiches criadas pelo efeito do vento sobre a lagoa e que estas variações de níveis e de velocidades têm importância significativa na variabilidade das variáveis ambientais: sólidos suspensos e turbidez.

Através das trajetórias das boias fictícias analisadas, baseados nos resultados do modelo bidimensional horizontal, podem-se evidenciar que a correntologia para o período estudado é fortemente regida pela ação do vento, de grandes vazões afluentes e pela geomorfologia da lagoa que induz também a direção do escoamento. A região norte tende a ser uma região distinta das demais, por ser uma região estreita, menos profunda e sem aportes de água de afluentes. Apesar disso quando há ventos fortes de SO ou grande vazão afluente na lagoa a região Norte tem suas águas renovadas. A região central funciona como um ponto de mistura da lagoa.

Após o estudo hidrodinâmico foram feitas inicialmente correlações entre algumas variáveis hidrodinâmicas e as variáveis ambientais utilizando os dados instantâneos. Estas correlações deram uma idéia de comportamento da interdependência entre as variáveis.

Com os gráficos de superfície foi possível avaliar melhor as variações de SS e turbidez em função de duas variáveis a cada vez, caracterizando o sistema de forma mais adequada. Através dos gráficos teve-se a noção de que as velocidades da água juntamente com a altura da onda tinham maior influência do que os níveis, em função da pequena variação deste durante as campanhas.

Para finalizar os estudos, foram feitas regressões lineares múltiplas a fim de se tentar quantificar quanto da variação das variáveis ambientais era explicada pelas variáveis hidrodinâmicas supondo uma relação linear entre as variáveis. Com os resultados apresentados constatou-se a hipótese testada utilizando valores médios de quatro horas. Para cada campanha as variáveis hidrodinâmicas explicaram de 70% a 95% das variações ambientais e ao considerar toda a lagoa e todo os períodos de campanha chegou-se entre 49% a 68% para sólidos suspensos e turbidez, respectivamente.

Em função do defasamento entre a alteração das variáveis ambientais pelos efeitos das variáveis hidrodinâmicas muitas vezes os coeficientes encontrados para as equações tiveram valores inversamente proporcionais, não sendo representativos.

A hipótese de divisão da lagoa em três regiões fica evidenciada apenas em relação à hidrodinâmica na região norte, enquanto que nas regiões sul e centro ela fica dependente do regime de ventos característico de cada estação e constatado nas campanhas. Quando ocorre a inversão de ventos NE, as regiões centro e sul podem ser estudadas como uma única região, quando o vento tem direção SO a região central se aproxima mais da região norte.

Pela dificuldade na coleta de dados, recomenda-se que na bacia de drenagem do Rio Três Forquilhas seja instalado um pluviógrafo, um linígrafo e que seja elaborada a curva-chave, para que seja possível a previsão de vazões afluentes na lagoa Itapeva. Aconselha-se também que seja instalado um linígrafo na lagoa dos Quadros, para poder analisar a influência desta lagoa como controle de nível para a lagoa Itapeva.

Em razão da simulação, para traçar a correntologia da lagoa devem-se futuramente fazer medições de corrente e implantar flutuadores que possibilitariam verificar o modelo. Também é importante caracterizar a vegetação nas áreas próximas às margens para uma melhor estimativa dos coeficientes de atrito.

Atualizar constantemente o programa IPH-A e implementar ferramentas para entrada de dados, como por exemplo contorno móvel, vento em vários pontos, precipitação e evaporação sobre a lagoa, contribuição subterrânea e cálculo da altura da onda.

Para aprofundar o estudo dever-se-ia analisar a A_o , V_a , N_i nos dias anteriores e fim de demonstrar que a condição que precede é tão importante quanto a atual para prever os valores iniciais de turbidez e sólidos suspensos. Também poderiam ser consideradas outras variáveis que não sejam as hidrodinâmicas, como velocidade e direção do vento, *fetch*, precipitação, vazão, temperatura nas regressões múltiplas.

As hipóteses sugeridas neste estudo foram comprovadas com os resultados apresentados e espera-se que este estudo possa contribuir para a compreensão das lagoas costeiras associando a hidrodinâmica à ressuspensão de partículas, à turbidez e futuramente a outras variáveis ambientais.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABBOTT, M. B. 1980 – Computational hydraulics: elements of theory o free surface flows. **Monographs and surveys in water resources engineering**. n°1 p.326
2. ARFI, R.; GUIRAL, D.; BOUVY, M. 1993 – Wind Induced resuspension in a shallow tropical lagoon. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. n°36, 587-604
3. AZEVEDO, L.S.P. 1984 – Considerações geoquímicas das lagoas do litoral leste do Estado do Rio de Janeiro. In: Restingas: origem, estrutura, processos. L.D. de Lacerda (org.). Niterói, **CEUFF**. 123-135
4. BAILEY, M. C.; HAMILTON, D. P. 1997 – Wind induced sediment resuspension: a lake-wide model. **Ecological Modeling**, n° 99, 217-228
5. BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN L. H. 1999 – A third-generation wave model for coastal regions. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 104, n° C4, 7649–7666, April 15
6. BORCHE, A., IPH-A 1996 – Aplicativo para modelação de estuários e lagoas. Manual de utilização do sistema. **UFRGS** – Porto Alegre, p.37
7. CARDOSO, L. de S. 2001 – Variações da estrutura planctônica da lagoa Itapeva (sistema lagunar costeiro do Rio Grande do Sul) em função da hidrodinâmica. (Tese de doutorado) **PPG Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental / UFRGS**. Porto Alegre.
8. CARMOUZE, J.P., KNOPPERS, B. & VASCONCELOS, P. 1991 – Metabolism of a subtropical Brazilian lagoon. **Biogeochemistry**, n° 14, 129-148
9. CARRICK, H.J.; ALDRIDGE, F.J. & SCHELSKE, C.L. 1993 – Wind influences phytoplankton biomass and composition in a shallow, productive lake. **Limnol. Oceanogr.**, n° 38 (6), 1179-1192

10. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. 1992a. Lei nº6.938 de 31/08/1981. In: **Resoluções do CONAMA**. Ed. Brasília, IBAMA
11. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. 1992b. Resolução nº20 de 18/06/1986. In: **Resoluções do CONAMA**. Ed. Brasília, IBAMA
12. CRISTOFOR, S., VADINEANU, A., IGNAT, G. & CIUBUC, C. 1994 – Factors affecting light penetration in shallow lakes. **Hydrobiologia**, nº 275/276, 493-498
13. DEMERS, S.; THERRIault, J-C.; BOURGET, E. & BAH, A. 1987 – Resuspension in the shallow sub littoral zone of a macrotidal estuarine environment: wind influence. **Limnol. Oceanogr.**, 32 (2), 327-339
14. DOKULIL, M. 1994 – Environmental control of phytoplankton productivity in turbulent turbid systems. **Hydrobiologia**, nº 289, 65-72
15. DOKULIL, M.; PADISÁK, J. 1994 – Meroplankton dynamics in a saline, turbulent, turbid shallow lake (Neusiedlersee, Austria and Hungary). **Hydrobiologia**, nº 289 (1-3), 23-42
16. DOKULIL, M. T.; PADISAK, J. 1994a – Long-term compositional response of phytoplankton in a shallow, turbid environment, Neusiedlersee (Austria/Hungary). **Hydrobiologia**, nº 275/276, 125-137
17. DOMINGOS, P. 1991 – Estrutura da comunidade fitoplanctônica e produção primária na Lagoa de Saquarema, RJ. **CPG Geociências**, UFF, Niterói (dissertação)
18. ECOPLAN Engenharia Ltda. 1997 – Avaliação da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea do litoral norte do Rio Grande do Sul, englobando todos os corpos hídricos que drenam para o Rio Tramandaí. Relatório Técnico Final. **ECOPLAN**. São Paulo.

19. ESTEVES, F. de A. 1998 – Lagoas costeiras: origem, funcionamento e possibilidades de manejo. In: Ecologia das Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ). F. de A. Esteves (ed.), **NUPEM**, UFRJ, 63-87
20. GUILLÉN, J.; JIMÉNEZ, J.A.; PALANQUES, A.; GRACIA, V.; PUIGA, P.; ARCILLA, A. S. 2002 – Sediment resuspension across a microtidal, low-energy inner shelf. **Continental Shelf Research** n° 22, 305–325
21. HAKANSON, L. 1976 – The influence of wind, fetch, and water depth on the distribution of sediments in lake Vänern, Sweden. **Can. Journal Earth Science**, n° 14, 397-412
22. HAKANSON, L. 1981 – A manual of lake morphometry. **Springer-Verlag Berlin Heidelberg**. pg78.
23. HAKANSON, L.; PARPAROV, A.; HAMBRIGHT, K.D. 2000 – Modeling the impact of water level fluctuations on water quality (suspended particulate matter) in lake Kinneret, **Israel. Ecological Modeling** n° 128, 101–125
24. HANSEN, L. C. L.; VALEUR, J.; PEJRUP, M.; JENSEN, A. 1997 – Sediment fluxes, re-suspension and accumulation rates at two wind-exposed coastal sites and in a sheltered bay. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** n° 44, 521–531
25. HERNANDEZ, R. P.; MONBALI, M. 2001 – Energy balance of wind waves as a function of the bottom friction formulation. **Coastal Engineering** n° 43, 131–148
26. HOWICK, G. L.; WILHM, J. 1985 – Turbidity in lake Carl Blackwell: effects of water Depth and wind. **Proc. Okla. Acad. Science** n° 65, 51-57
27. KJERFVE, B. 1990 – Costal lagoons. **The world & I**, Washington D.C., n° 5 (5), 312-317

28. KJERFVE, B. & KNOPPERS B.A. 1991 – Tidal choking in a coastal lagoon. In: Tidal phenomena on shelves and in embayments tidal hydrodynamics. B.B. Parker (ed.). **Juhn Wiley & Sons**: New York. Cap. 9, 169-181
29. KJERFVE, B. & MAGILL, K.E. 1989 – Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. **Marine Geology**, nº 88, 187-199
30. KNOPPERS B.A. 1994 – Aquatic primary production in coastal lagoons. In: Costal lagoon processes. B. Kjerfve (ed.). **Elsevier Oceanography series**, nº 60, 243-286
31. KNOPPERS B.A & MOREIRA, P.F. 1988 – The short term effect of physical processes upon nutrients, primary production and sedimentation in Guarapina lagoon (RJ), Brazil. **Acta Limnol. Brasil**, nº 2, 405-430
32. KNOPPERS B.A & MOREIRA, P.F. 1990 – Material em suspensão e sucessão fitoplanctônica na Lagoa de Guarapina-RJ. **Acta Limnol. Brasil**, nº 3 291-317
33. LEENDERTSE, J. J. 1967 – Aspects of a Computational Model for Long-Period Water Wave Propagation. RM-5294-PR, **Rand Corp.**
34. MARQUES, D. L. M. 2000 – **Carta Consulta** – Edital 00/198 p.5
35. MEDEIROS, P. R. P. 1992 – **Estudo do Sistema Lagunar-Estuarino de Tramandaí-Imbé: Física e Química da Água**. Porto Alegre, CPG Ecologia/UFRGS. p112 (dissertação)
36. MILLET, B. & CECCHI, P. 1992 – Wind-induced hydrodynamic control of the phytoplankton biomass in a lagoon ecosystem. **Limnol. Oceanogr.**, nº 37 (1), 140-146
37. MOREIRA, P.F. & KNOPPERS, B.A. 1990 – Ciclo anual de produção primária e nutrientes na lagoa de Guarapina, RJ. **Acta Limnol. Brasil**, nº 3 (1), 275-290

38. MORENO, J. A. 1961 – Clima do Rio Grande do Sul. **Boletim Geográfico do Estado do Rio Grande do Sul**. n°6 (1), 49-54
39. NAVARRO, P. G.; HUBBARD, M. E.; PRIESTLEY, A 1995 – Genuinely multidimensional up winding for the 2D shallow water equations. **Journal of Computational Physics**. n° 121, 79-93
40. ODUM, E. P. 1988 – **Ecologia**. Ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro. P.434
41. ORLOB, G. T. – Mathematical modeling of water quality: streams, lakes and reservoirs. **International Institute for Applied Systems Analysis**. 1983
42. PADISAK, J.; TOTH, L. G.; RAJCZY, M. 1990 – Stir-up effect of wind on a more-or-less stratified shallow lake phytoplankton community, lake Balaton, Hungary. **Hydrobiologia**, n° 191, 249-254
43. REYNOLDS, C. S. 1993 – Scales of disturbance and their role in plankton ecology. **Hydrobiologia**, n° 249, 157-171
44. ROSAURO, N. M. L. 1986 – Seiches e suas ocorrências na lagoa dos Patos e rio Guaíba (RS - Brasil). **RBE** Vol.4, n° 2
45. SALENÇON, M.-J. & THEBAULT, J.-M. 1996 – Simulation model of a mesotrophic reservoir (Lac de Pareloup, France): MELODIA, na ecosystem reservoir management model. **Ecological Modelling**, n° 84 (1-3), 163-187
46. SARKKULA et al. 1991, Measuring and modeling wind induced flow in shallow lakes. Hydrology of Natural and Manmade Lakes – **IAHS Public**. n° 206, Edited by G. Schiller, R. Lemmela & M. Spreafico
47. SCHÄFER, A. 1988 – Tipificação ecológica das lagoas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. **Acta Limnológica Brasileira** – Vol. 11 29-55
48. SCHOELLHAMER, David H. 1995 – Sediment resuspension mechanisms in old Tampa Bay, Florida. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** n° 40, 603–620

49. SCHOELLHAMER, David H. 1996 – Anthropogenic sediment resuspension mechanisms in a shallow micro tidal estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** n° 43, 533–548
50. SCHWARZBOLD, A. & SCHÄFER, A. 1984 – Gênese e morfologia das lagoas costeiras do Rio Grande do Sul - Brasil. **Amazoniana**, n° 9 (1), 87-104
51. SHEN, Y.; ZHENG, Y; KOMATSU T.; KOHASHI N. 2002 – A three-dimensional numerical model of hydrodynamics and water quality in Hakata Bay. **Ocean Engineering** n° 29, 461–473
52. SILVEIRA, A. L. da, 1986 – Modelo hidrodinâmico bidimensional com aplicação ao Rio Guaíba. (Dissetação de Mestrado) **PPG Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental / UFRGS** – Porto Alegre. p.237
53. SONG, Z. W.; ROOSE, D.; BERLAMONT, J. 1995 – Investigation of different time integration schemes for the 2D shallow water equations on distributed memory parallel computers. **Simulations, Practice and Theory** n° 3, 287-305
54. THÉBAULT, J.-M. & SALENÇON, M.-J. 1993 – Simulation model of a mesotrophic reservoir (Lac de Pareloup, France): biological model. **Ecological Modeling**, n° 65 (1-2), 1-30
55. TUCCI, C. E. M. 1987 – Modelos para gerenciamento de Recursos Hídricos v.1 **Coleção ABRH de Recursos Hídricos** São Paulo - SP p.526
56. TUCCI, C. E. M. 1993 – Hidrologia – Ciência e Aplicação. **Coleção ABRH de Recursos Hídricos** v.4 Ed. da UFRGS p.943
57. TUNDISI, J.G. 1990 – Distribuição espacial, seqüência temporal e ciclo sazonal do fitoplâncton em represas: fatores limitantes e controladores. **Rev. Bras. de Biol.** n° 50(4), 937-955

58. US ARMY CORPS OF ENGINEERS 1984 – Shore Protection Manual. Vol.1. 4^a Edição. **HEC**. Washington, D.C. p.608

59. WEYAN, T. 1992 – Shallow water hydrodynamics: Mathematical theory and numerical solution for a two-dimensional system of shallow water equations. **Elsevier Oceanography series**. – p.435

60. YÁÑEZ-ARANCIBIA, A. 1987 – Lagunas costeras y estuarios: cronología, criterios y conceptos para una clasificación ecológica de sistemas costeros. In: **Simpósio sobre ecossistemas da costa sul e sudeste brasileira: síntese dos conhecimentos**. Cananéia, ACIESP. v. 3, 1-38