

INONDATIONS DANS LA MÉTROPOLÉ DE SAO PAULO : ANALYSE DÉTAILLÉE DES ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX

SIMAS I.T.H.¹; RODRIGUES C.¹, SANT'ANNA NETO J.L.²

¹ Laboratório de Geomorfologia, Universidade de São Paulo, 338 Av Professor Lineu Prestes, 055080-900 São Paulo, Brésil. [iurysimas@usp.br] - [cleidrig@usp.br]

² Grupo de Pesquisas Interações Água, Superfície e Atmosfera, Universidade Estadual Paulista, 305 Roberto Simonsen, 19060900 Presidente Prudente, Brésil [joaolima@fct.unesp.com].

Résumé – Cette étude présente les résultats d'une recherche plus globale développée afin d'analyser la participation des forces des systèmes climatiques et hydro-géomorphologiques à l'occurrence des inondations dans un bassin versant urbanisé de la métropole de São Paulo, au cours des différentes phases de son urbanisation. Nous avons cherché des moyens pour analyser avec la plus grande précision spatiale et temporelle possible les précipitations journalières durant les inondations. Une recherche documentaire approfondie, la collecte des données de stations pluviométriques diverses, l'analyse des cartes synoptiques et images satellites étaient une partie des moyens employés. Nous constatons que, au cours de la dernière décennie, des inondations sont apparues non seulement pendant les journées avec des valeurs pluviométriques "extrêmes", comme par exemple au cours des années 1970, mais aussi à la suite de précipitations rapides et concentrées dans certaines régions inférieures et intermédiaires du bassin versant.

Mots-clés : Inondation, risque, extrêmes, Brésil, Sao Paulo.

Abstract – *Floodings at São Paulo metropolis: detailed investigation on rain events.* This study presents the results of a more in-depth research developed to analyze the role of the forces of climatic and hydro-geomorphological systems for the occurrence of floods in an urbanized hydrographic basin at the metropolis of São Paulo, during different phases of its occupation. For the analysis of the daily rain during the flood occurrences, ways to investigate with the greatest spatial and temporal precision as possible were thought. An extensive information retrieval, data collection from various pluviometric stations, analysis of synoptic charts and satellite imagery were some of the employed means. It was found that, during the last decade, floods were developed not only during the days with "extreme" rain values as for example during the 1970s, but also as a result of quick precipitation concentrated in certain regions of the basins lower and middle sections.

Keywords: Floodings, risk, extremes, Brazil, Sao Paulo.

Introduction

D'une superficie de 7.940 km² et plus de 20 millions d'habitants, la métropole de São Paulo, dans le sud-est du Brésil, est une région féconde pour l'étude des questions concernant la dynamique de l'environnement physique en milieu urbain. São Paulo, qui est la plus grande ville de l'hémisphère sud, s'est développée de façon explosive au cours des 80 dernières années, créant une situation dramatique d'exclusion sociale et qui a mis en place un vrai «piège de l'environnement». Ainsi, les catastrophes telles que les inondations, qui génèrent divers troubles et mettent en danger les habitants des régions socialement et écologiquement vulnérables, sont présentes dans la ville depuis longtemps. Dans ce contexte, cette recherche a visé à analyser en détail les événements de précipitations en périodes de catastrophes confirmées à l'intérieur d'un bassin versant urbanisé occupé par des populations vulnérables (Aricanduva dans la zone est de l'agglomération). L'objectif est de comparer les événements de précipitations générateurs de catastrophes au début de l'urbanisation de la zone (années 1970) et au cours de la dernière décennie.

1. La région d'étude

La ville de São Paulo est située dans la partie sud-est de l'État de São Paulo, qui à son tour est situé dans la région sud-est du Brésil (Figure 1). Étant une des plus grandes agglomérations du monde, São Paulo présente un environnement énormément modifié avec une grande accumulation historique de changements dans les systèmes hydro-géomorphologiques et météorologiques. Diverses études (comme Silva Dias *et al.*, 2013) soulignent l'augmentation du nombre de jours avec des valeurs élevées de pluie accumulée (>60mm). Il y a des changements significatifs à partir du début des années 1970 : une tendance à l'augmentation du total annuel des précipitations, ainsi qu'une tendance négative pour le nombre de jours avec précipitations de moins de 5 mm et une tendance positive pour

les jours de plus de 30 mm (Xavier *et al.*, 1994). Par rapport aux altérations du régime hydrologique dans la ville, des études récentes (comme Veneziani, 2014) montrent une augmentation des débits de pointe et des modifications significatives des temps de retour des débits d'inondations (valeur Q_{max} pour TR100 à 1962 est égale à la valeur pour TR5 à 2011). Ceci est expliqué par les interventions humaines dans les systèmes naturels des bassins versants, tels que les changements dans les caractéristiques d'écoulement et l'imperméabilisation des sols, la canalisation des cours d'eau, l'occupation des zones de débordement naturelles et la création ou le renforcement des zones de concentration d'écoulement superficiel. Afin d'étudier l'occurrence des inondations, un phénomène lié aux deux systèmes naturels cités, et le type de risque naturel le plus présent dans la ville, nous focalisons notre analyse sur un bassin versant situé dans la zone est de Sao Paulo, une région avec une forte vulnérabilité sociale et environnementale.

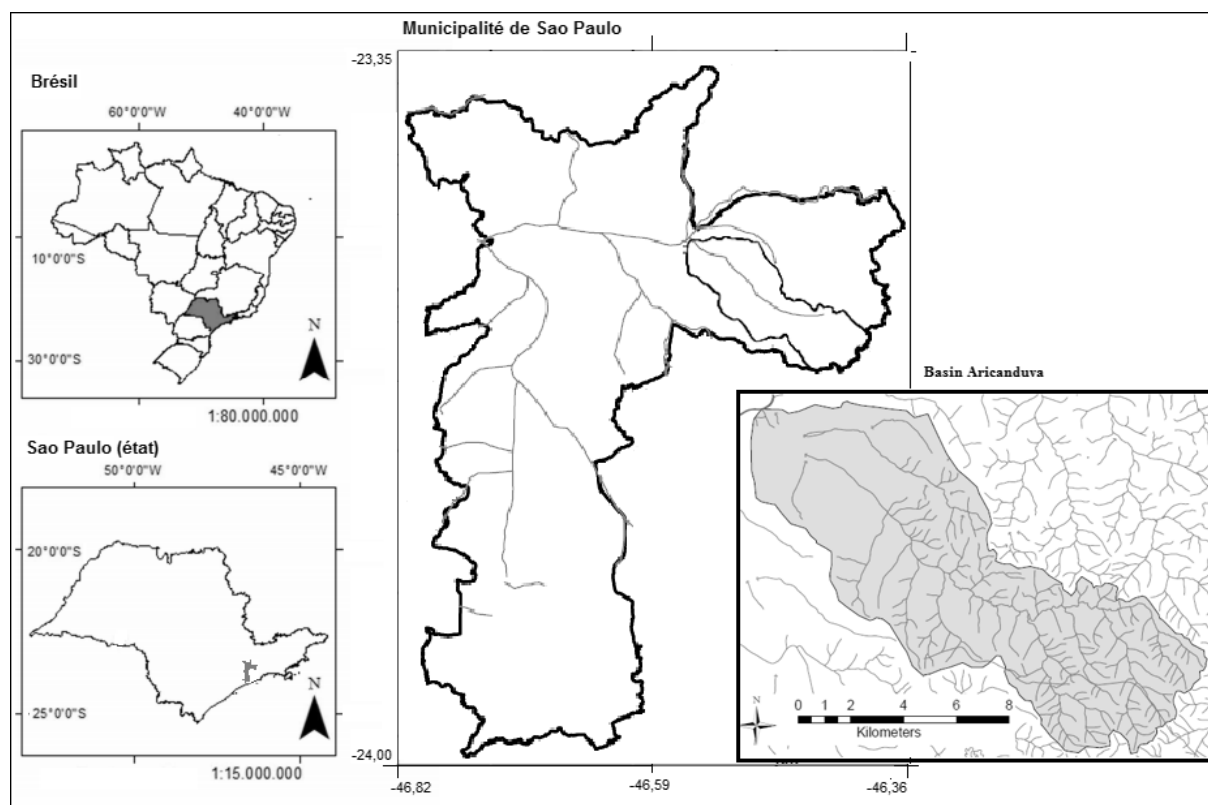


Figure 1. Localisation de la zone d'étude.

Le bassin versant du Rio Aricanduva a une superficie de drainage d'environ 100 km², de direction générale SE-NO. Il s'étend sur une longueur de 20 km et une largeur de 5 à 6 km. La pente du thalweg varie d'environ 0,025 m/m en tête de bassin à 0,005 m/m dans les parties intermédiaire et inférieure, ce qui permet de le classer comme un système à méandres. Le début de l'occupation du bassin remonte au XVIIe siècle, mais son urbanisation s'est fortement intensifiée durant la seconde moitié des années 1970, avec la construction de l'Avenue Aricanduva sur la rivière. Comme dans beaucoup de zones périphériques de la ville, les problèmes découlant de l'urbanisation spontanée ont été accentués. En effet, la concentration actuelle des bidonvilles (« favela ») à proximité des rivières secondaires du bassin, ainsi qu'à proximité du canal du Rio Aricanduva est très élevée. Ce canal est étranglé par le réseau routier et de nombreux bâtiments. Les secteurs intermédiaire et inférieur du bassin sont entièrement urbanisés. Actuellement, l'urbanisation s'étend aux zones qui ne sont pas encore entièrement bâties (situées surtout au sud-est du bassin), et qui sont soit des zones inondables, soit des régions à plus forte pente. Nous soulignons la situation socio-économique

précaire de la population qui y vit. Cela est associé au cadre environnemental plutôt défavorable qui accentue la vulnérabilité des résidents aux inondations.

2. Données et méthode

Tout d'abord, il était impératif d'utiliser comme unité physique de l'analyse un bassin hydrographique. Il est clair que l'absence de vue d'ensemble du bassin versant, qui constitue un système hydro-géomorphologique qui a des entrées et des sorties d'énergie et de matière directement liées aux conditions climatiques, a conduit historiquement à l'inefficacité des mesures d'atténuation des inondations. Étant donné que la zone d'étude a une saison des pluies et de récurrence des inondations bien définie (novembre à mars), il a été décidé de limiter l'analyse aux « saisons des pluies » des décennies étudiées (1970 et 2000). Les saisons de 1976-1977 et 2009-2010 ont été identifiées comme exceptionnelles sur base de critères tels que la pluviométrie totale accumulée au cours de la saison pluvieuse et la quantité maximale de précipitations tombées en 24 heures, en conséquence, elles sont idéales pour cette étude (Tableau 1). Les données pluviométriques utilisées proviennent de stations pluviométriques dispersées dans la zone d'intérêt, fournis par le Département de l'Eau et de l'Énergie (DAEE) et l'Entreprise Métropolitaine de l'Eau et de l'Énergie SA (EMAE). Toutefois, les stations disponibles varient au cours des différentes périodes en raison de la suppression de certaines stations et de l'installation de nouveaux points de collecte. Les stations A et B (Figure 2) sont utilisées pour les deux périodes, alors que les stations C, D et E ne sont utilisées que pour 1976-1977 et les stations F et G pour 2009-2010.

Tableau 1. Résumé des décennies et saisons des pluies étudiées.

Décennie/ Saison	Total (moyen)	Jours de pluie (moyen)	Jours de pluie < 1 mm	Jours de pluie > 20 mm
1971-80	932 mm	84	-	-
2001-10	963 mm	72	-	-
1976-77	960 mm	72	15	14
2009-10	1220 mm	85	6	27

La technique des quantiles a été appliquée aux totaux quotidiens enregistrés pour toutes les saisons considérées afin de classer le nombre de jours avec précipitations extrêmes, très élevées et élevées. La technique a la fonction: $\text{Prob}\{F(x) \leq Q(p)\} = p$, où P est un ordre quantique (de probabilité), F(x) est la fonction de la variable aléatoire de distribution x par rapport au quantile Q(p) de cette variable. Donc les quantiles dans la queue supérieure (maximum), seront ceux avec des valeurs proches de $p = 1$, tandis que la queue inférieure (valeurs minimales) aura des valeurs proches de $p = 0$. Les valeurs journalières totales des précipitations (en mm) ont été converties en percentiles d'ordre (q) 85, 95 et 99. Ensuite, ces valeurs ont été utilisées pour délimiter les gammes de jours par rapport à la concentration des précipitations pendant la saison. Les totaux pluviométriques journaliers ont été classés en « extrêmes » (percentile 0,99), « très élevés » (0,95), et « élevés » (0,85). Pour confirmer l'occurrence des inondations en saison des pluies de 1976 à 1977, de nombreuses sources documentaires ont été consultées dans l'hémérothèque de São Paulo. Ainsi, il était possible de récolter des détails sur les événements, tels que la zone touchée et l'ampleur des impacts. Pour les événements de la saison 2009-2010, on a également consulté la base de données du Centre de Gestion des Urgences de Sao Paulo, qui est relativement récente. Cette base de données est alimentée par des informations fournies par les agents de terrain en temps réel, et permet de déterminer l'emplacement exact des événements, ainsi que leur début et leur fin. Avec ces informations, une analyse des pluies développée à l'échelle du rythme des éléments

météorologiques est appropriée à l'étude des phénomènes extrêmes (tel que proposé par Monteiro, 1971). Pour détailler les événements de pluies qui ont accompagné les inondations, les systèmes météorologiques actifs et la variation du phénomène des pluies dans le temps et l'espace ont été identifiés. Cela a été possible dans le cas de la saison 2009-2010 avec l'interprétation d'images GOES-12 (fournis par l'Institut National de Recherche Spatiale, INPE) et d'images infrarouges composées pour identifier les masses nuageuses convectives. Ces images sont produites pour obtenir l'évolution temporelle et la trajectoire des systèmes convectifs, qui sont généralement associés à d'intenses précipitations et des rafales de vent (VILA et al, 2008). Les images satellites n'étant pas disponibles pour la saison 1976-1977, les détails des événements de fortes pluies ont été obtenus à partir des informations recueillies dans les sources documentaires et par l'interprétation des cartes synoptiques de la Marine du Brésil.

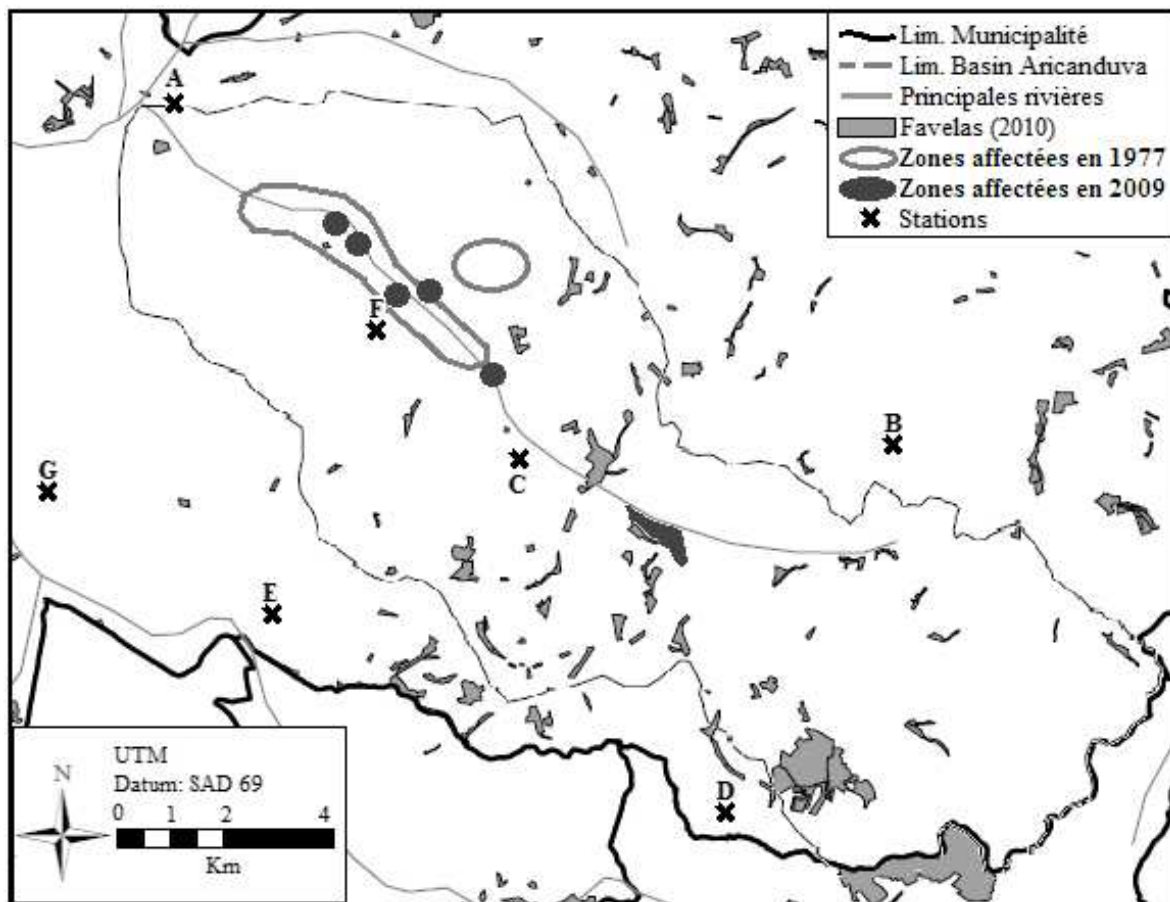


Figure 2. Les zones touchées dans les décennies (en estimation), l'emplacement des stations, et le total des zones occupées par les favelas en 2010 (selon l'Institut National de Géographie et Statistique).

3. Analyse des résultats

En observant les précipitations accumulées pendant les saisons des pluies, il apparaît que les saisons des années 2000 ont une moyenne supérieure à celle des années 1970. Une autre différence importante est que la saison la plus pluvieuse des années 2000 a eu plus de jours de pluie et aussi des totaux de précipitations supérieurs par rapport à celle de la décennie 1970. Toutes les stations pluviométriques dans la région ont enregistré des précipitations constantes au cours des jours précédant le déluge (Tableau 2). Ces pluies ont été générées par une séquence d'actions de systèmes frontaux (historiquement les plus importants producteurs de la pluie au sud-centre du Brésil), qui ont pour caractéristique de générer des précipitations réparties uniformément dans l'espace.

Entre le 18 et le 19 janvier 1977, à l'échelle synoptique, il y avait la formation de lignes de grains sur le sud du Brésil, un système responsable pour la pluie plus intense des années 1970. Comme indiqué par les rapports de l'époque, la pluie a commencé à tomber le 18 janvier 1977 à 22h00 locale et a maintenu une intensité constante jusqu'à 00h00. Les stations avec différents temps de collecte nous permettent d'observer ce fait: celles mises à zéro à 00h00 locale enregistrent des totaux extrêmes pour le 18 et des valeurs plus faibles pour le 19, tandis que les stations mises à zéro à 12h00 Z (9h00 locale) ont un total bas pour le 18 et des valeurs extrêmes pour le 19.

Tableau 2. Sommaire des inondations et précipitations accumulées. (Souligné: stations de collecte 12h00 Z, non souligné: 00h00 locale).

Jour	Début	Fin	Duration	Stations -	A	B	C	D	E
				12/01/1977	43,5	0,0	0,1	29,0	27,0
				13/01/1977	58,5	7,1	6,0	0,6	11,0
19/01/1977	01:00	-	2 jours	14/01/1977	6,0	0,0	0,2	10,8	0,0
	Type d'occurrence			15/01/1977	9,0	5,4	17,8	15,0	3,2
	Inondation lourdes pertes			16/01/1977	18,0	8,0	22,8	13,0	14,8
				17/01/1977	0,0	20,5	12,9	1,4	1,6
				18/01/1977	98,0	0,5	0,8	113,0	98,4
Quantiles	Extrême	Très haut	Haut	19/01/1977	10,0	96,6	101,0	9,0	5,4
				20/01/1977	0,0	6,0	2,3	0,2	0,0
Jour	Début	Fin	Duration	Stations -	A	B	F	G	
01/12/2009	11:17	12:05	0:48	24/11/2009	31,7	31,3	24,2	30,0	
	11:29	12:05	0:36	25/11/2009	2,7	3,2	2,3	7,0	
	11:32	12:18	0:46	26/11/2009	14,0	24,0	12,0	10,0	
	12:09	12:34	0:25	27/11/2009	15,6	12,3	21,0	7,0	
	14:13	15:33	1:20	28/11/2009	13,7	3,1	5,3	0,0	
	-	-	3 jours	29/11/2009	5,9	23,2	10,8	15,5	
	Type d'occurrence			30/11/2009	0,0	0,0	0,0	0,0	
	5 points d'inondation subite, lourdes pertes en zone de favela			01/12/2009	0,4	30,3	68,0	5,0	
				02/12/2009	25,0	4,4	11,0	16,0	

Par conséquent, nous avons de graves inondations qui ont eu lieu de façon concomitante à un événement de pluie extrême (dont l'intensité est estimée à 50 mm/h) qui a concerné la quasi-totalité du bassin (Figure 3).

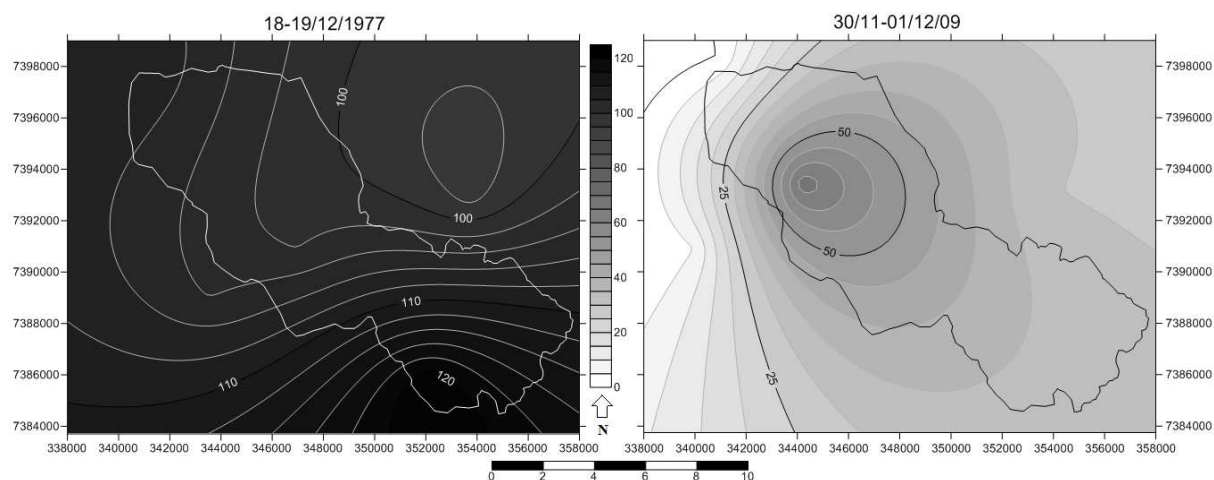


Figure 3. Isohyètes du total de pluie accumulé pendant les 24h avant l'inondation, produites par krigeage sur les données des stations de chaque période.

Le 01/12/2009, il y a eu cinq cas d'inondations subites (durée maximale de 1h20) le long de l'Avenue Aricanduva - sur les sections intermédiaire et inférieure de la rivière, actuellement canalisées et rectifiées (elles l'étaient partiellement en 1977). Les impacts les plus importants ont été enregistrés à la suite des inondations dans la zone près de la rivière dans une région de favelas plus en amont, où les résidents avaient de grandes pertes matérielles et des dizaines de personnes se sont retrouvées sans abri. En observant les données pluviométriques des stations utilisées pour cette période, il faut prêter attention aux différences de volume enregistrées pour chacune d'entre elles.

Uniquement la station F a enregistré un volume de précipitations classé comme extrême, la station B a mesuré un volume élevé, alors qu'aucune des stations avec la collecte de données à 00h00 locale n'a enregistré des précipitations. Par conséquent, sur base des images satellites, il a été possible de souligner le rôle d'un système convectif de méso-échelle (SCM), qui a duré environ deux heures (entre 13h et 15h Z, 10h et 12h locale), et a généré des précipitations très concentrées sur la zone des inondations subites (Figure 4).

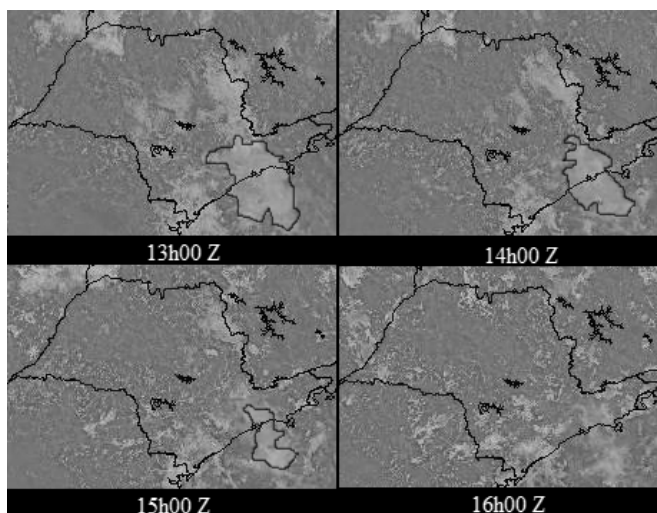


Figure 4. SCM identifié à 01/12/09.

Cette pluie inégalement répartie est présente sur la partie sud-est du bassin qui a enregistré les impacts les plus graves, cependant avec une intensité et un volume plus faibles en comparaison avec la partie nord-ouest du bassin (Figure 3). Ainsi, il a été observé par cette analyse que les événements de pluie enregistrés lors des jours des inondations des saisons 1976-1977 et 2009-2010 diffèrent principalement par les systèmes atmosphériques générateurs et la concentration spatiale des précipitations.

Conclusion

Les résultats sont cohérents avec ce qui est indiqué par des études scientifiques plus récentes sur les pluies à São Paulo (comme Silva Dias *et al.*, 2013). Ces études considèrent qu'en raison de changements des conditions climatiques dans un environnement urbain toujours plus modifié, São Paulo n'est plus une ville de bruine mais devient une ville de tempêtes. En conséquence, les événements liés à ce type de précipitations intenses, telles que les inondations, ont été plus largement signalés. Autrefois, les impacts étaient constatés pour des événements de précipitations de grande ampleur volumétrique, alors que les inondations récentes sont également enregistrées pendant des événements de pluie de plus faible volume et plus concentrés spatialement. Nous concluons qu'il faut s'assurer que la pluie est juste une variable, une entrée dans le système hydro-géomorphologique. Ces systèmes montrent des effets directs des interventions effectuées pendant le processus historique de l'urbanisation qui, à son tour, doit tenir compte des aspects sociaux indéniables pour gérer les risques.

Références bibliographiques

- Monteiro C. A. F., 1971 : Análise rítmica em climatologia : problemas da atualidade climática em Sao Paulo e achegas para um programa de trabalho. *Climatologia*, **1**, 29-44.
- Silva Dias M. A. F., Dias J., Carvalho L. M. V., Freitas E. D., Silva Dias P. L., 2013 : Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. *Climatic Change*, **116** (3-4), 705-722.
- Veneziani Y., 2014 : A abordagem da geomorfologia antropogênica e de modelagens hidrológica e hidráulica na bacia do Córrego Três Pontes (SP) para determinação de picos de vazão e da vulnerabilidade a inundações. Mémoire de máster em Géographie Physique, sous direction de Cleide Rodrigues, São Paulo, Universidade de São Paulo.
- Vila D. A., Machado L. A. T., Laurent H., Velasco I., 2008 : Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) Using Satellite Infrared Imagery: Methodology and Validation. The American Meteorological Society: *Weather and Forecasting*, **3**, 233-245.
- Xavier T. M. S., Xavier A. F. S., Silva Dias M. A. F., 1994 : Evolução da precipitação diária num ambiente urbano: o caso da cidade de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **9**, 44-53.